



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E  
DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

**VAGNER SOUZA MACHADO**

**VALIDAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIES A PARTIR DA  
INTEGRAÇÃO DE BANCOS DE DADOS GEOGRÁFICOS**

Presidente Prudente - SP

2020



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E  
DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

**VAGNER SOUZA MACHADO**

**VALIDAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIES A PARTIR DA  
INTEGRAÇÃO DE BANCOS DE DADOS GEOGRÁFICOS**

Dissertação de mestrado apresentada à Pró-reitora de Pesquisa e Pós-Graduação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional (MMADRE). Área de Concentração: Ciências Ambientais.

Linha II: Planejamento ambiental e Desenvolvimento Regional

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Ana Paula Marques Ramos

**Colaborador externo:** Prof. Dr. José Marcato Junior (UFMS)

Presidente Prudente - SP

2020

333.72  
M149

Machado, Vagner Souza.

Validação de modelos digitais de superfícies a partir da integração de bancos de dados geográficos / Vagner Souza Machado. – Presidente Prudente, 2020.

46 p.: il.

Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional) - Universidade do Oeste Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2020.

Bibliografia.

Orientador: Ana Paula Marques, José Marcato Junior.

1. Controle de qualidade. 2. Acurácia vertical. 3. Padrão de Exatidão Cartográfica. 4. Banco de dados geográfico. I. Ramos, Ana Paula Marques. II. Marcato Jr., Jose.

**VAGNER SOUZA MACHADO**

**VALIDAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIES A PARTIR DA  
INTEGRAÇÃO DE BANCOS DE DADOS GEOGRÁFICOS**

Dissertação de mestrado apresentada à  
Pró-reitora de Pesquisa e Pós-Graduação  
como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Mestre em Meio Ambiente e  
Desenvolvimento Regional (MMADRE).  
Área de Concentração: Ciências  
Ambientais.

Linha II: Planejamento ambiental e  
Desenvolvimento Regional

Presidente Prudente, 05 de maio de 2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Ana Paula Marques  
Universidade do Oeste Paulista – Unoeste  
Presidente Prudente-SP

---

Prof. Dr. Marcelo R. Alves  
Universidade do Oeste Paulista – Unoeste  
Presidente Prudente-SP

---

Prof. Dr. Adilson Berveglieri  
Universidade Estadual Paulista – UNESP/FCT  
Presidente Prudente-SP

## DEDICATÓRIA

Aos meus filhos Miguel e Manuela, fontes da minha vontade de  
perseverar e vencer.

E à minha mãe que, com muito carinho e apoio, não mediu esforços  
para que eu concluísse essa etapa da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à Deus, pelo dom da vida e por todas as graças derramadas em meus caminhos. O teu Amor cobre as minhas fraquezas e a tua Fidelidade é maior que todos os obstáculos na minha vida.

Aos amigos que ganhei no PPGMADRE, Rosana Amaral Carrasco, Felipe Gomes, Renata Mafra, Mayara Maezano Faita Pinheiro, Noemi de Oliveira Dias, Mariany Kerriany Gonçalves de Souza e Lucas Prado Osco, pelos dias de animação, companheirismo e solicitude no Neageo.

À orientadora e amiga Dra. Ana Paula Marques Ramos, por ser mais que uma orientadora e colega de profissão, pois sua paciência e confiança depositadas em mim foram essenciais para que eu não perdesse o foco e sempre buscasse a minha superação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida e incentivo à ciência. À Fundação Instituto de Terras do Estado de São Paulo (Itesp), pelo fornecimento dos dados utilizados na pesquisa e pelo seu Programa de Incentivo à Educação, que me proporcionou a realização deste sonho.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente colaboraram ao longo dos últimos anos eu deixo meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

### **Validação de modelos digitais de superfícies a partir da integração de bancos de dados geográficos**

A preocupação com a disposição adequada dos resíduos sólidos está diretamente associada à qualidade ambiental, o que justifica a elaboração de pesquisas que visam a sustentabilidade e manutenção da qualidade dos recursos hídricos. Sob este prisma, o objetivo desse trabalho foi validar diferentes Modelos Digitais de Superfície (MDS) aplicando-se o conceito de Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Tradicionalmente essa validação é realizada com pontos de verificação coletados em campo. Porém, essa abordagem é onerosa, e por isso uma quantidade reduzida de amostras é usada na maioria das vezes. Nesse sentido, foi investigada a qualidade dos dados disponibilizados pela plataforma online e gratuita do SIGEF (Sistema de Gestão Fundiária) utilizados como fonte dados de referência na validação de um MDS, na qual culminou no desenvolvimento do manuscrito 1. Com esse manuscrito concluiu-se que o banco de dados do SIGEF pode ser uma alternativa viável para ser incorporada em estudos de validação de acurácia vertical de MDS, pois possibilita o adensamento de pontos de verificação, reduzindo a necessidade de levantamentos de campo. No entanto, é necessária uma filtragem desses dados antes de iniciar o processo de validação. Posteriormente foi desenvolvida uma metodologia para integração dos bancos de dados do SIGEF e da Fundação Itesp na validação dos MDS SRTM-v3, ALOS-Palsar, ASTER GDEM2 e Bare-Earth SRTM resultando no manuscrito 2, onde observou-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.

**Palavras-chave:** Controle de qualidade. Acurácia vertical. Padrão de Exatidão Cartográfica. Banco de dados geográfico.

## **ABSTRACT**

### **Validation of digital models of surfaces from the integration of geographic databases**

The preoccupation with the disposal of solid waste is associated with environmental quality, which justifies the development of research regarding the sustainability and maintenance of water resources' quality. In this perspective, the objective of this paper was to validate different Digital Surface Models (DSM) by applying the concept of Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD). Traditionally the evaluation of DSM is performed with checkpoints collected in the field. However, this is an expensive approach, hence, a few samples are used in most cases. In this sense, the quality of the data available by the free online platform of SIGEF (Land Management System), used as the source of reference data in the validation of an MDS, was investigated. In this manuscript it was concluded that the SIGEF database can be a viable alternative to be incorporated in studies of validation of vertical accuracy of MDS, as it allows the densification of verification points, reducing the need for field surveys. Still, it is necessary to filter this data before starting the validation process. Here, a novel method was also developed to integrate the SIGEF and ITESP Foundation databases in the validation of MDS SRTM-v3, ALOS-Palsar, ASTER GDEM2, and Bare-Earth SRTM, resulting in the second manuscript, where It was observed that DSM ALOS-Palsar is the most accurate for the study area, followed by DSM v3 SRTM, both being shown for the elaboration of products in the 1:50.000 scale.

**Keywords:** Quality control. Vertical accuracy. Cartographic Accuracy Standard. Geographic Database.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de trabalho. ....	17
Figura 2 - MDS SRTM 3 e distribuição dos pontos do SIGEF (vermelho) e da Fundação ITESP (azul). ....	17
Figura 3 - Comparação dos RMSE obtidos das diferenças entre as altitudes do SRTM e as altitudes dos pontos de verificação (SIGEF e ITESP). ....	20
Figura 4 - Gráfico boxplot das discrepâncias da altitude ortométrica_EGM96. ....	21
Figura 5 - Área de estudo: Pontal do Paranapanema. ....	33
Figura 6 - Distribuição dos pontos de verificação na área em estudo. ....	36
Figura 7 - Discrepâncias altimétricas para cada MDS. ....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais. .....	19
Tabela 2 - Acurácia altimétrica dos bancos de dados com dados sem filtragem, filtrados pelo valor do NDVI e filtrados pelo valor do NDVI e com remoção de outliers. ....	22
Tabela 3 - Porcentagem (%) de pontos que apresentam discrepâncias inferiores ao PEC-PCD dos conjuntos de dados sem filtragem, filtrados pelo valor do NDVI e filtrados pelo valor do NDVI e com remoção de outliers. ....	23
Tabela 4 - Densidade de Pontos utilizados nos trabalhos. ....	30
Tabela 5 - Características dos MDS estudados. ....	33
Tabela 6 - Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais. .....	37
Tabela 7 - Análise estatística dos valores de discrepâncias obtidos para cada MDS .....	39
Tabela 8 - Estatísticas descritivas para o banco de dados após remoção de outliers de cada limiar. ....	40
Tabela 9 - Porcentagem de pontos que apresentam discrepâncias altimétricas inferiores ao valor do PEC-PCD em função da escala da carta para cada MDS em análise. ....	41
Tabela 10 - Validação dos MDS para cada faixa de exclusão. ....	41

## LISTA DE SIGLAS

ASTER	- <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer</i>
CAPES	- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
DN	- <i>Digital Number</i>
EP	- Erro Padrão
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INCRA	- Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
ITESP	- Instituto de Terras do Estado de São Paulo
MDA	- Ministério de Desenvolvimento Agrário
MDE	- Modelos Digitais de Elevação
MDS	- Modelos Digitais de Superfícies
MDT	- Modelo Digital do Terreno
MNT	- Modelo Numérico do Terreno
NDVI	- <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NOAA	- <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
PEC-PCD	- Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais
PPGMADRE	- Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional
PROINTER	- Programa de Pesquisa Interdisciplinar
RMSE	- <i>Root Mean Square Error</i>
SIGEF	- Sistema de Gestão Fundiária
SRTM	- Shuttle Radar Topography Mission
UNOESTE	- Universidade do Oeste Paulista
USGS	- <i>United States Geological Survey</i>
UTM	- Universal Transversa de Mercator

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>MANUSCRITOS.....</b>	<b>13</b>
2.1	MANUSCRITO 1 .....	13
2.2	MANUSCRITO 2 .....	28
<b>3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>46</b>

## 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A presente dissertação tem por intuito apresentar o trabalho desenvolvido no Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional (PPGMADRE) da Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE) e fomentado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

O objetivo deste estudo é a validação de diferentes Modelos Digitais de Superfícies (MDS) como suporte para estudos ambientais na região do Pontal do Paranapanema. Os MDS são importantes fontes de dados digitais representativos da superfície terrestre. A utilização deles na elaboração da base cartográfica que dará suporte ao monitoramento, planejamento e as ações de intervenção de um ambiente geográfico, possibilita o estudo de um determinado fenômeno sem a necessidade de se trabalhar diretamente na região escolhida.

A validação de diferentes MDS, bem como a identificação do MDS de maior qualidade estão intrinsecamente ligados a um dos objetivos específicos do Programa de Pesquisa Interdisciplinar (PROINTER), o qual consiste em: “Realizar a produção cartográfica para o auxílio ao diagnóstico dos problemas ambientais e ao planejamento sustentável dos recursos no Pontal do Paranapanema”. O PROINTER é fundado na reflexão sobre a sustentabilidade e desenvolvimento econômico e regional para a região do Pontal do Paranapanema.

A pesquisa foi dividida em duas etapas, onde a primeira consistiu na investigação da qualidade dos dados disponibilizados pela plataforma online e gratuita do SIGEF (Sistema de Gestão Fundiária) na validação de um MDS, na qual culminou na elaboração do manuscrito 1. Na segunda etapa, foi desenvolvido uma metodologia para integração dos bancos de dados do SIGEF e da Fundação Itesp na validação de diferentes MDS resultando no manuscrito 2.

## 2 MANUSCRITOS

### 2.1 MANUSCRITO 1

#### VALIDAÇÃO DA ACURÁCIA VERTICAL DE MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE UTILIZANDO O BANCO DE DADOS DO SISTEMA DE GESTÃO FUNDIÁRIA: UM ESTUDO DE CASO NO OESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

##### Resumo

Modelos Digitais de Superfícies (MDS) são importantes fontes de dados digitais representativos do relevo terrestre. Para identificar a acurácia vertical de um MDS, é necessário realizar a sua validação para a área de interesse. Uma possível fonte de dados com altimetria, disponível para todo o território brasileiro, é a plataforma online e gratuita do SIGEF (Sistema de Gestão Fundiária). Entretanto, a confiabilidade desses dados para o processo de validação de MDS ainda não foi verificada. Esse estudo avalia se o banco de dados do SIGEF pode ser utilizado como dados de referência na validação da acurácia vertical de MDS. Para isso, comparou-se os resultados das validações altimétricas do MDS SRTM 3, com 30 metros (1 arcseg) de resolução espacial, obtidas com os bancos de dados da Fundação ITESP e do SIGEF. As análises estatísticas e os processamentos dos dados foram realizados em softwares livres (PAST 3.25 e QGIS 2.18). O controle de qualidade do MDS SRTM 3 foi baseado no Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Após realizar um processo de filtragem nos dados do SIGEF, obteve-se a classificação B, escala 1:50.000 (PEC menor do que 10,00 m e EP menor do que 6,66 m), para o MDS SRTM 3. Resultados similares foram obtidos com o banco de dados da Fundação ITESP. Sem considerar a filtragem nos dados do SIGEF, obteve-se Classe B, escala 1:100.000. Concluiu-se que os dados altimétricos do SIGEF podem ser utilizados em validações da acurácia vertical de MDS após filtragem e remoção de *outliers*.

**Palavras-chave:** Controle de qualidade; Acurácia vertical; Padrão de Exatidão Cartográfica

##### Abstract

Digital Surface Models (DSM) are important digital data sources representative of terrestrial relief. In order to identify the vertical accuracy of a DSM, it is necessary to carry out its validation for the area of interest. A possible data source with altimetry, available for all Brazilian territory, is the free online platform of SIGEF (Land Management System). However, the reliability of these data for a DSM validation was not yet verified. This study assesses if the SIGEF database can be used as reference data in the vertical accuracy evaluation of DSM. For this, the results of the altimetric validations of a DSM SRTM 3, with 30 meters (1 arcsecond) spatial resolution, conducted with the ITESP and the SIGEF database were compared. Statistical analysis and data processing were performed in free software (PAST 3.25 and QGIS 2.18). The quality control of the DSM SRTM 3 was based on the Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD). After filtering the SIGEF data, a rank B, scale 1: 50.000 (PEC less than 10,00 m and EP less than 6,66 m) was obtained for the DSM SRTM 3. Similar results were achieved with the ITESP Foundation database. Without considering filtering the SIGEF data, it was obtained a class B, scale 1: 100.000. It was concluded that the SIGEF altimetric database can be used to assess the vertical accuracy of a DSM after filtering and removal of outliers.

**Keywords:** Quality control; vertical accuracy; Cartographic Accuracy Standard

##### Introdução

Modelo Numérico de Terreno (MNT) é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma

região da superfície terrestre (Felgueiras & Câmara, 2004). Essa definição é similar ao apresentado em Li *et al.* (2005); “um conjunto ordenado de pontos amostrais que representam a distribuição espacial de algum atributo sobre o terreno”. Porém, os autores adotam o termo Modelo Digital de Terreno (MDT), ao invés de MNT. Assim, o termo MNT (Felgueiras & Câmara, 2004) ou MDT (Li *et al.* 2005) é genérico, sendo utilizado para diversos atributos do terreno, como altitude, temperatura, pluviosidade, geologia, entre outros.

Li *et al.* (2005) fazem duas importantes particularizações do MDT: o MDE (Modelo Digital de Elevação) e o MDS (Modelo Digital de Superfície). O termo MDE é adotado para caracterizar a representação da superfície do terreno, imersa ou emersa, sem cobertura vegetal ou edificações, isto é, trata-se da representação da altitude do solo (do terreno). O termo MDS é utilizado para caracterizar a representação da altitude do terreno acrescida de qualquer objeto acima dele, como edificações e cobertura vegetal. Neste trabalho será adotado a terminologia utilizada por Li *et al.* (2005). Os dados de elevação capturados por Sensoriamento Remoto, em geral, são originalmente MDS.

Existe uma série de MDS disponibilizados gratuitamente com diferentes resoluções espaciais. O MDS SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) é uma fonte de dados muito difundida por ser a primeira missão a mapear a topografia da Terra com a maior amplitude de cobertura, em torno de 80%, disponibilizando dados entre as latitudes 60°N e 56°S. Desde o ano de 2005, os dados SRTM são disponibilizados para o território brasileiro na resolução de 90 metros (3 arcseg). Porém, a partir de 2014, passaram a ser fornecidos na resolução de 30 metros (1 arcseg).

Segundo Mukul *et al.* (2017), o MDS do SRTM possui em média a acurácia global vertical de 16m, com 90 % de confiança, e um RMSE (*Root Mean Square Error*) de 9,73m. Mukul *et al.* (2017) avaliaram a acurácia vertical do SRTM para a região peninsular e do Himalaia indiano, utilizando 220 pontos de verificação obtidos por GPS (*Global Positioning System*) de alta precisão. Outras validações regionais do SRTM também foram realizadas na Índia, Tailândia & Estados Unidos, Polônia, Grécia e no Brasil (Agrawal *et al.*, 2006; Gorokhovich & Voustianiouk, 2006; Karwel & Ewiak, 2008; Mouratidis *et al.*, 2010; Marini *et al.*, 2017).

Apesar da validação da acurácia dos MDS ser tema de interesse em diferentes regiões do mundo, a quantidade de pontos de validação utilizada tem sido

relativamente pequena. Isso porque esses pontos demandam levantamentos de campo, o que depende de tempo e recursos financeiros. Não obstante, marcos de redes geodésicas como a brasileira são uma opção de pontos de validação (Marini *et al.*, 2017), mas requerem uma distribuição homogênea na área de interesse, o que nem sempre ocorre.

Pereira *et al.* (2019) propõem uma nova fonte de dados para a validação da acurácia vertical de MDS, que é o banco de dados do Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF). O SIGEF foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) e pelo Ministério de Desenvolvimento Agrário (MDA) para gestão de informações fundiárias do meio rural brasileiro. Por ele, são efetuadas a recepção, a validação, a organização, a regularização e a disponibilização de informações georreferenciadas de imóveis rurais. Até meados de junho de 2019, 468.582 imóveis rurais foram validados e certificados em todo o território brasileiro, totalizando uma área de 1.823.199 km<sup>2</sup> (SIGEF, 2019). Esses dados, georreferenciados ao Sistema Geodésico Brasileiro, foram medidos e submetidos à certificação por centenas de profissionais de diferentes áreas profissionais (SIGEF, 2019).

No trabalho de Pereira *et al.* (2019) foram utilizados 305 pontos de verificação na validação de diferentes MDS em duas bacias hidrográficas no estado do Tocantins. No entanto, o estudo não aferiu a acurácia desses pontos usados como dados de referência. Assim, até o presente momento, ainda não foi comprovado se os dados do SIGEF devem ser submetidos a alguma espécie de filtragem antes de serem considerados pontos de referência para a validação de MDS. Essa investigação é essencial, pois irá responder se os dados do SIGEF podem ser utilizados em substituição aos pontos de verificação obtidos em campo por levantamentos topográfico ou geodésico.

Diante do contexto apresentado, pretende-se avaliar se há diferença no resultado da validação da acurácia vertical de MDS utilizando o banco de dados do SIGEF e o banco de dados da Fundação ITESP (Fundação Instituto de Terras do Estado de São Paulo – “José Gomes da Silva”), gerado com receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*). O ITESP tem a missão de promover a Regularização Fundiária Urbana e Rural em parceria com os municípios paulistas (ITESP, 2019) e, para tanto, possui um banco de dados com um grande volume de

coordenadas Este, Norte e Altitude (E,N,H) de pontos, levantados com equipamentos geodésicos de alta precisão.

Adotou-se para estudo de caso uma cena do MDS SRTM 3 de 30m para a região oeste do estado de São Paulo, conhecida como Pontal do Paranapanema; local onde se concentra o maior número de assentamentos rurais no estado. Essa região, no passado, foi palco de muitos conflitos entre movimentos de trabalhadores rurais sem terra e grandes latifundiários, o que demandou trabalhos de intervenção do estado pela Fundação ITESP. A principal contribuição desse trabalho é responder se o banco de dados do SIGEF, que está disponível para todo o Brasil com um grande volume de dados, pode ser utilizado como dados de referência confiável na validação da acurácia vertical de MDS.

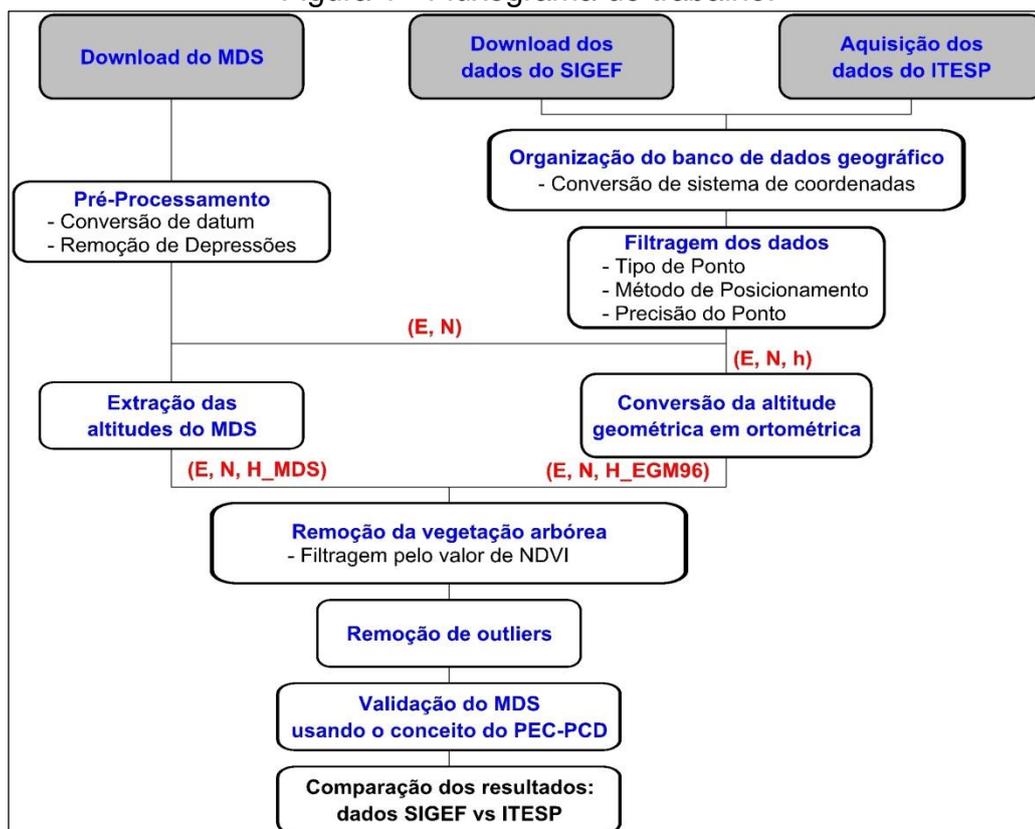
### **Materiais e Métodos**

A Figura 1 ilustra o fluxo de trabalho realizado, cujas etapas são descritas a seguir. A área de estudo (Figura 2) é coberta pela cena S23\_W053 do MDS SRTM 3, com 1 arcseg (30 metros de resolução espacial), que possui cerca de 11.500 km<sup>2</sup>. A imagem foi originalmente obtida no ano 2000 e disponibilizada na resolução citada em 2014. O download foi realizado na plataforma Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) do USGS (*United States Geological Survey*).

O banco de dados com os pontos (E,N,H) certificados pelo SIGEF, em formato .csv, foi obtido no site de Certificação de Imóveis Rurais do INCRA. Um total de 7.318 pontos estão disponibilizados para a área de estudo. O banco de dados da Fundação ITESP foi cedido pelo próprio instituto, com um total de 3.631 pontos (E,N,H) para a área de interesse.

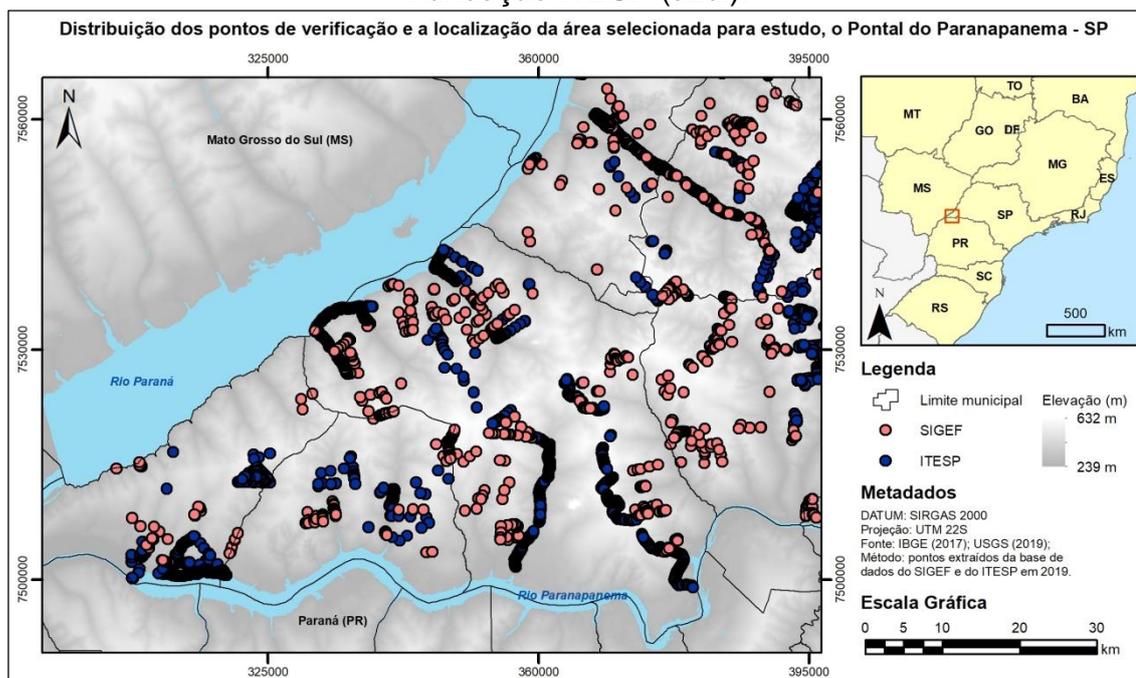
Utilizou-se o *software* livre QGIS 2.18 (QGIS Development Team, 2019) para a compatibilização de datum, do MDS SRTM, dos pontos do SIGEF e da Fundação ITESP. Adotou-se o datum oficial do Brasil, o SIRGAS2000, e a projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), fuso 22 Sul. O algoritmo *pit remove* da ferramenta TauDEM 5.2 no QGIS 2.18 foi aplicado para remover todas as depressões presentes no MDS SRTM 3. No raster, esses “poços” (pit) consistem em células de pontos mais baixas, normalmente cercadas por um relevo elevado. Com a remoção dessas inconsistências, tem-se um MDS hidrologicamente consistente (Chaves, 2002).

Figura 1 - Fluxograma de trabalho.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 2 - MDS SRTM 3 e distribuição dos pontos do SIGEF (vermelho) e da Fundação ITESP (azul).



Fonte: elaborado pelos autores.

Aplicou-se três filtragens no banco de dados do SIGEF visando a eliminação de possíveis erros grosseiros. Isso porque os dados do SIGEF são levantados por profissionais de diferentes áreas e durante esses levantamentos podem ser utilizados métodos de posicionamento distintos e equipamentos com diferentes precisões. As filtragens consistem em:

1. Seleção apenas de pontos do tipo M (Marco, i.e., levantados de forma direta e materializados) e do tipo P (Ponto, i.e., levantados de forma direta e não materializados), uma vez que o outro tipo de pontos, tipo V (Virtual) foi 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) e;
3. Seleção de pontos com desvio-padrão nas coordenadas E, N e H menor que 1 metro. Essa decisão visa utilizar pontos levantados com alta acurácia.

Esses mesmos três 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 1.561 pontos do SIGEF e 3.534 pontos da Fundação ITESP. A altitude correspondente a cada um dos pontos no MDS SRTM 3 foi extraída de modo automático no *software* QGIS 2.18, pelo complemento *Point Sampling Tool*. O resultado é 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 representada no MDS para esse ponto. Esse processo foi feito para os pontos do SIGEF e da Fundação ITESP.

O MDS SRTM 3 disponibiliza a coordenada vertical (H) em altitude ortométrica referenciada ao datum vertical EGM96 ( $H_{EGM96}$ ). Nos pontos do SIGEF e da Fundação ITESP a coordenada vertical (H) é representada em altitude geométrica referenciada ao datum SIRGAS2000. Para converter a altitude geométrica desses pontos em altitude ortométrica referenciada ao EGM96, utilizou-se o *software* Vdatum do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Marini *et al.* (2017) utilizaram o *software* MAPGEO 2015 do IBGE (IBGE, 2019) para

efetuar essa conversão de altitude. No presente estudo, para fins de comparação, também foi realizado o cálculo das altitudes ortométricas dos pontos de verificação com o *software* MAPGEO 2015.

No intuito de eliminar os pontos sobre as árvores, o que representaria um alto resíduo entre a altitude do ponto de verificação e a altitude amostrada no MDS SRTM 3, optou-se por realizar outras duas análises em ambos os pontos do SIGEF e ITESP: análise com base no valor de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e; análise da discrepância das altitudes usando um gráfico na forma de *BoxPlot*. O NDVI foi gerado a partir de imagem LANDSAT 5, Sensor TM+, da mesma época da imagem do SRTM 3 no ano 2000.

Por meio de análise visual conjunta do mapa de NDVI e uma imagem LANDSAT 5, Sensor TM+, na composição RGB(543), para o ano de 2000, observou-se que para a área em estudo os pontos com NDVI maior ou igual a 0,65 podem ser considerados vegetação arbórea. Essa filtragem resultou em 1283 pontos de verificação para o conjunto amostral do SIGEF e 2428 pontos para o conjunto da Fundação ITESP. A presença de vegetação densa e de outros objetos na superfície terrestre (por exemplo, construções) promovem a existência de falsos picos em MDS gerados a partir de dados de sensoriamento remoto (O’loughlin *et al.*, 2016; Gallant & Read, 2016; Correa *et al.*, 2017). Em seguida, a distribuição dos resíduos pelo gráfico *Boxplot*, criado no *software* PAST 3.25 (Hammer *et al.*, 2001), serviu para avaliar o conjunto de pontos de verificação com NDVI menor que 0,65 no intuito de determinar se há *outliers* nas amostras.

Para a validação do MDS SRTM 3 por meio dos conjuntos amostrais SIGEF e ITESP, aplicou-se o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais - PEC-PCD (CONCAR, 2011). A abordagem de validação da acurácia altimétrica de MDS com base no conceito de PEC-PCD (Tabela 1) é tradicional no Brasil (Souza *et al.*, 2009; Lousada & Fernandes, 2017; Marini *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2019).

Tabela 1 - Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais.

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

PEC-PCD	1:25.000		1:50.000		1:100.000	
	PEC (m)	EP(m)	PEC (m)	EP(m)	PEC (m)	EP(m)
D	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00

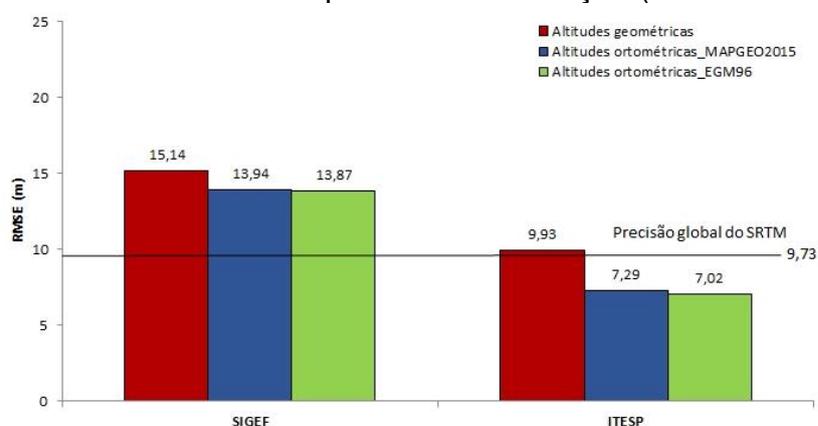
Fonte: CONCAR (2011) modificado pelos autores.

Para que um MDS seja classificado como Classe A na escala 1:50.000, o RMSE deve ser menor que o Erro Padrão de 3,3 m (EP - 5ª coluna da Tabela 1). Além disso, mais de 90% dos pontos de verificação devem possuir discrepância altimétrica ( $H_{MDS} - H_{\text{ponto\_verificação}}$ ) menor que o Padrão de Exatidão Cartográfica de 5,50 m (PEC - 4ª coluna da Tabela 1).

## Resultados e Discussão

Na Figura 3 apresentam-se os RMSE das discrepâncias altimétricas ( $H_{MDS} - H_{\text{ponto\_verificação}}$ ) para os pontos de verificação do SIGEF e da Fundação ITESP, utilizando as altitudes geométricas, ortométricas\_MAPGEO2015 e ortométricas\_EGM96. Observa-se que houve uma melhora de 1,27 m (redução de 9,2%), para o caso do SIGEF, e de 2,91 m (redução de 41,5%), para o caso dos pontos da Fundação ITESP, ao se comparar os RMSE das discrepâncias pelas altitudes geométricas e altitudes ortométricas\_EGM96. Além disso, houve pequena melhora no RMSE ao utilizar as altitudes ortométricas referenciadas ao *datum* vertical EGM96 no lugar das altitudes ortométricas referenciadas o MAPGEO2015. Para o caso do SIGEF, essa melhora foi de 0,07 m, e, para o caso do ITESP de 0,27 m.

Figura 3 - Comparação dos RMSE obtidos das diferenças entre as altitudes do SRTM e as altitudes dos pontos de verificação (SIGEF e ITESP).

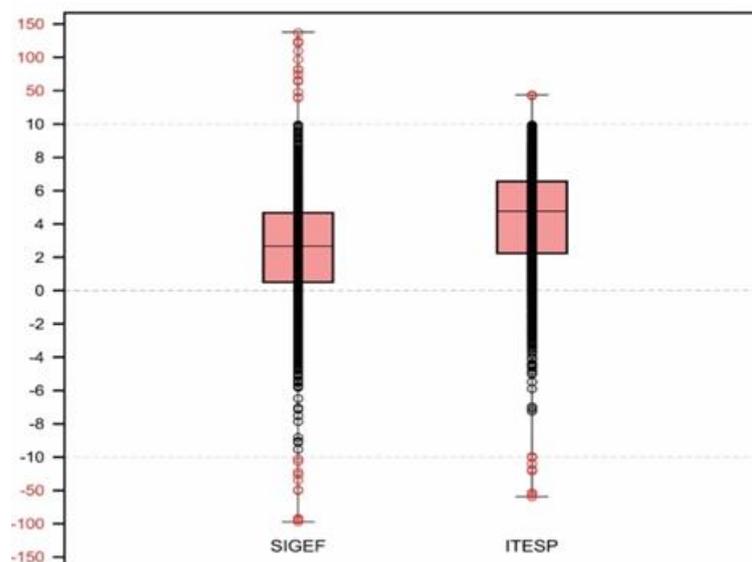


Fonte: elaborado pelos autores.

Outro fator também evidenciado na Figura 3, seja em MAPGEO2015 ou EGM96, é que o RMSE das discrepâncias nos pontos da Fundação ITESP resultou abaixo do RMSE global do MDS SRTM, que é de 9,73 m (Mukul *et al.*, 2017). Com os pontos do SIGEF, isso não ocorre, o que é um indicativo de inconsistências nos dados do SIGEF. Segundo Mukul *et al.* (2017), os dados altimétricos do SRTM precisam ser cuidadosa e sistematicamente estudados antes da realização de uma validação da acurácia, pois em muitas regiões existem “buracos” de informações (*voids*) e a presença de *outliers*.

A Figura 4 mostra a representação das discrepâncias pelo gráfico *Boxplot* para a identificação de *outliers*. Os valores de discrepâncias maiores que 10 m e menores que -10 m para o SIGEF, e os valores maiores que 10 m e menores que -7 m para a Fundação ITESP podem ser considerados como *outliers*. Porém, buscando-se um valor comum para ambas as amostras, optou-se por considerar como *outliers* os pontos de verificação com discrepâncias altimétricas superiores a 15m.

Figura 4 - Gráfico boxplot das discrepâncias da altitude ortométrica\_EGM96.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Tabela 2 encontram-se a quantidade de pontos de verificação, a média, o RMSE e o desvio-padrão das discrepâncias (altitude ortométrica\_EGM-96) para cada banco de dados em três avaliações realizadas: (1) dados sem filtragem; (2) dados filtrados pelo valor do NDVI (pontos com NDVI abaixo de 0,65); e (3)

dados filtrados pelo valor do NDVI e com remoção de *outliers* (NDVI < 0,65 e discrepância abaixo de 15m).

Nota-se que 1.106 pontos da Fundação ITESP estavam localizados em região de vegetação (NDVI acima de 0,65), e a remoção desses pontos proporcionou uma melhora de 1,06m (17,8%) no RMSE. Além disso, 13 pontos foram removidos por serem considerados *outliers*, o que proporcionou a melhora de 0,54m (9,9 %) no valor do RMSE. Com relação ao SIGEF, 278 pontos foram removidos por estarem localizados em áreas de vegetação, resultando em um RMSE de 14,76m, e 64 pontos foram removidos por serem *outliers*, proporcionando a melhora no RMSE de 10,44m.

Na Tabela 3 apresenta-se a porcentagem de pontos com discrepâncias em altitudes ortométricas\_EGM96 menores que o valor tabelado no PEC-PCD (Tabela 1) para as classes de A à D na escala 1:50.000, e classe A na escala 1:100.000. Mais de 90% dos pontos de verificação apresentaram discrepâncias nas altitudes ortométricas\_EGM96 menor que o valor tabelado para a classe B, escala 1:50.000, nas três avaliações realizadas utilizando os pontos do SIGEF. Todavia, a cada filtragem realizada, houve um aumento na porcentagem de pontos, isto é, melhora nos resultados. Isso demonstra a importância de se filtrar os dados antes de realizar a validação do MDS, corroborando com o estudo de Mukul *et al.* (2017).

Tabela 2 - Acurácia altimétrica dos bancos de dados com dados sem filtragem, filtrados pelo valor do NDVI e filtrados pelo valor do NDVI e com remoção de outliers.

<b>Descrição</b>	<b>SIGEF</b>	<b>ITESP</b>
Dados sem filtragem		
Nº de pontos	1561	3534
RMSE	13,87	7,03
Média	3,40	5,53
Desvio Padrão	13,45	4,34
Filtragem pelo valor do NDVI (<0,65)		
Nº de pontos	1283	2428
RMSE	14,76	5,97
Média	2,70	4,38
Desvio Padrão	14,51	4,05

Descrição	SIGEF	ITESP
Filtragem pelo NDVI e <i>outliers</i> (NDVI<0,65 e $\Delta H < 15m$ )		
N° de pontos	1219	2415
RMSE	4,32	5,43
Média	2,51	4,42
Desvio Padrão	3,51	3,16

Fonte: elaborado pelos autores.

Com relação ao conjunto amostral da Fundação ITESP, na análise da porcentagem de pontos, nota-se (Tabela 3) que o valor tabelado para a Classe B, escala 1:50.000, foi alcançado após a remoção dos pontos localizados em áreas de vegetação arbórea (filtragem pelo valor de NDVI), com 96,13% das discrepâncias inferiores ao PEC-PCD. Esse valor é melhor (96,65%) quando os pontos de verificação são filtrados por ambos: valor de NDVI (<0,65) e remoção de outliers ( $\Delta H < 15m$ ).

Tabela 3 - Porcentagem (%) de pontos que apresentam discrepâncias inferiores ao PEC-PCD dos conjuntos de dados sem filtragem, filtrados pelo valor do NDVI e filtrados pelo valor do NDVI e com remoção de outliers.

Escala	Classe	Pontos de verificação sem filtragem		Pontos de verificação com filtragem pelo NDVI (<0,65)		Pontos de verificação com filtragem pelo NDVI (<0,65) e remoção de outliers ( $\Delta H < 15m$ )	
		SIGEF	ITESP	SIGEF	ITESP	SIGEF	ITESP
1:50.000	A	68,20%	47,60%	76,85%	59,06%	80,89%	59,38%
	B	91,00%	88,40%	92,91%	96,13%	97,79%	96,65%
	C	93,70%	94,90%	94,54%	98,60%	99,51%	99,13%
	D	95,10%	99,00%	95,01%	99,46%	100,00%	100,00%
1:100.000	A	94,60%	97,80%	94,78%	99,38%	99,75%	99,92%

Fonte: elaborado pelos autores.

O MDS SRTM 3 não foi classificado na Classe A, escala 1:50.000, quando validado por qualquer dos conjuntos de dados, considerando qualquer tipo de filtragem, em termos de porcentagem de pontos. Isso mostra que para a área em estudo o MDS SRTM 3 pode ser utilizado para mapeamento na escala 1:50.000, porém o erro padrão associado é de 6,66 m.

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 1). O MDS SRTM 3 validado com os pontos da Fundação ITESP atingiu o PEC-PCD Classe B, escala 1:50.000 (90% dos pontos menores que 10,00 m e RMSE menor que 6,66 m), após a filtragem para a remoção de pontos sobre área de vegetação arbórea ( $NDVI < 0,65$ ). Antes disso, o MDS se enquadrava na Classe C, escala 1:50.000.

Com relação aos dados do SIGEF, antes das filtragens, o RMSE era alto (13,87m) e o MDS era classificado na Classe B, escala 1:100.000, indicando uma acurácia inferior aos dados da Fundação ITESP. Após a remoção dos *outliers*, o RMSE (4,32m) foi reduzido, impactando diretamente na escala de utilização para mapeamento do MDS SRTM 3. Dessa forma, o MDS avaliado com os pontos de verificação do SIGEF também atingiu o PEC-PCD da classe B, na escala 1:50.000. Esses resultados corroboram a importância de se checar os dados antes de iniciar validação dos MDS, sobretudo, quando se tratam de dados livres, como é o caso do banco de dados do SIGEF. Essa condição não foi observada no estudo de Pereira *et al.* (2019), por exemplo.

Na validação do MDS SRTM 3 para todo o estado do Mato Grosso do Sul, realizado por Marini *et al.* (2017), foi obtido um RMSE de 3,21 m, sendo o modelo classificado como classe A, na escala 1:50.000 (90% dos pontos menores que 5,5 m e RMSE menor que 3,33 m). Esse resultado superior pode ser atribuído ao número reduzido de pontos de verificação utilizados nesse estudo (total de 122 pontos), representando os marcos da rede geodésica do IBGE. Portanto, o método empregado neste estudo demonstra que o adensamento de pontos de verificação torna mais criterioso o processo de validação da acurácia dos modelos digitais de superfície. Além disso, o presente estudo demonstra a importância da validação local dos MDS, uma vez que o resultado de Marini *et al.* (2017) não foi replicado para outras áreas além do estado do Mato Grosso do Sul.

## **Conclusões**

Numerosos estudos foram realizados no sentido de se avaliar a acurácia vertical de MDS e, na maioria, a quantidade de pontos utilizados na validação foi relativamente pequena. O presente estudo demonstra que o banco de dados do SIGEF pode ser uma alternativa viável para ser incorporada em estudos

de validação de acurácia vertical de MDS, pois possibilita o adensamento de pontos de verificação, reduzindo a necessidade de levantamentos de campo. Diante disso, conclui-se que é necessária uma filtragem desses dados antes de iniciar o processo de validação.

A aplicação do processo de filtragem envolvendo a remoção de pontos localizados em áreas cobertas por vegetação arbórea, e de pontos considerados como *outliers* da amostra, pode melhorar a acurácia do MDS. Isso demonstra que há problemas com os dados do SIGEF, dos quais foram minimizados com o processo de filtragem empregado, e, não necessariamente, com a qualidade dos MDS. Assim, o processo de filtragem mostrou-se benéfico ao ser aplicado com os dados da Fundação ITESP. A melhora no RMSE e o aumento de pontos com discrepâncias menores que 10 m possibilitou o enquadramento do MDS SRTM 3 na classe B, escala 1:50.000.

Conclui-se que a utilização de altitudes ortométricas referenciadas ao datum vertical EGM96 resulta em uma melhora efetiva no valor do RMSE, isto é, contribui para o processo de validação. Essa constatação fornece embasamento para a recomendação dessa abordagem na execução de trabalhos semelhantes, o que não se tem visto até o presente momento, uma vez que os trabalhos realizados no Brasil têm, majoritariamente, utilizado o MAPGEO2015.

Sugere-se a validação de outros MDS disponibilizados gratuitamente para a mesma área em estudo, visando identificar o modelo de maior acurácia vertical para a região. Por último, sugere-se também o emprego da abordagem metodológica aqui apresentada para áreas além da região do Pontal do Paranapanema, de modo que os resultados possibilitem a indicação do MDS mais acurado na extração de produtos cartográficos de diferentes finalidades.

## Referências

Agrawal, R.; Mahtab, A.; Jayaprasad, P.; Pathan, S.K. & Ajai. 2006. Validating SRTM DEM with Differential GPS Measurements - A Case Study with Different Terrains. *In*: SYMPOSIUM OF INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, Goa, India, p. 25-30.

Chaves, M.A. 2002. *Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes para a Bacia Amazônica*. Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Tese de Doutorado, 115p.

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

Correa, N.F.; Ribeiro, V.O.; Mito, C.L. & Filho, A.C.P. 2017. Obtenção de MDE Corrigido para a Delimitação de Bacia Hidrográfica com Auxílio de Geotecnologias Livres. *Anuário do Instituto de Geociências*, 40(1), p. 217-225.

Felgueiras, C.A. & Câmara, G. 2004. Modelagem Numérica de Terreno. *In: CÂMARA, G. et al. Introdução À Ciência da Geoinformação*. São José Dos Campos, INPE, 345p.

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

Gallant, J.C. & Read, A.M. 2016. A Near-Global Bare-Earth DEM from SRTM. *In: THE INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES*, Xli-B4, Xxiii Isprs Congress, Prague, Czech Republic, p. 137-141.

Gorokhovich, Y. & Voustianiouk, A. 2006. Accuracy Assessment of The Processed SRTM-Based Elevation Data by CGIAR Using Field Data from USA and Thailand and its Relation to The Terrain Characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 104, p. 409-415.

Hammer, O., Harper, D.A.T. & Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Eletrônica*: 9pp. Disponível em: <[http://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm)>. Acesso em: 12 jun. 2019.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2019. MAPGEO2015. Versão 1.1. Disponível em: <[https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/oquee\\_geoide.shtm](https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/oquee_geoide.shtm)>. Acesso em: 12 jun. 2019.

Karwel, A.K. & Ewiak, I. 2008. Estimation of the Accuracy of the SRTM Terrain Model on the Area of Poland. *In: THE INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES*. 37, B7, p. 169-172.

Li, Z., Zhu, Q. & Gold, C. M. 2005. *Digital Terrain Modelling. Principles and Methodology*. CRC Press: New York. 340p.

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*. 69(7), p. 1263-1276.

Marini, L.B.; Marcato Jr., J.; Ramos, A.P.M.; Filho, A.C.P.; Barros, W.M. & Higa, L.T. 2017. 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*, 40(3), p. 48-54.

Mouratidis, A.; Briole, P. & Katsambalos, K. 2010. SRTM 30 DEM (Versions 1, 2, 3, 4) Validation by Means of Extensive Kinematic GPS Measurements: A Case Study from North Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 31(23), p. 6205-6222.

Mukul, M.; Srivastava, V.; Jade, S. & Mukul, M. 2017. Uncertainties in the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. *Nature: Scientific Reports* – 7:41672, Doi:10.1038, Srep41672.

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

O'loughlin, F.E.; Paiva, R.C.D.; Durand, M.; Alsdorf, D.E. & Bates, P.D.A. 2016. Multi-Sensor Approach Towards a Global Vegetation Corrected SRTM DEM Product. *Remote Sensing of Environment*, 182, p. 49-59.

Pereira, H.L.; Catalunha, M.J.; Junior, C.R.B.; Sousa, P.T.G. 2019. 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*, 12(1), p. 187-200.

QGIS Development Team, 2019. *QGIS Geographic Information System. Versão 2.18*. Disponível em <<http://qgis.osgeo.org>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

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

Souza, L.G.; Sousa, G.M.; Coura, P.H.F. & Fernandes, M.C. 2009. Avaliação de Modelos Digitais de Elevação para Estudos Geoecológicos no Maciço da Pedra Banca, Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 40(3), p. 48-54.

United States Geological Survey - USGS, 2019. EarthExplorer. Disponível em:<<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

## 2.2 MANUSCRITO 2

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

## RESUMO

A confiabilidade geométrica de um Modelo Digital de Superfície (MDS) afeta diretamente a qualidade dos produtos gerados a partir dele. Tradicionalmente a validação de um MDS é realizada com pontos de verificação coletados em campo. Porém, essa abordagem é onerosa, e por isso uma quantidade reduzida de amostras é usada na maioria das vezes. 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.

## ABSTRACT

The geometric reliability of Digital Surface Model (DSM) affects the quality of the products generated from it. Traditionally the evaluation of DSM is performed with checkpoints collected in the field. However, this is an expensive approach, hence, a small number of samples is used. 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 do superfície terrestre. Aliados às técnicas de geoprocessamento, os MDS se tornam importantes ferramentas em diversas aplicações (MOURA et al., 2008; PINTO; 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 4 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 4 - Densidade de Pontos utilizados nos trabalhos.

<b>Pesquisa</b>	<b>área de estudo aprox. (km<sup>2</sup>)</b>	<b>quantidade de pontos</b>	<b>densidade (pontos/km<sup>2</sup>)</b>
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

<b>Pesquisa</b>	<b>área de estudo aprox. (km<sup>2</sup>)</b>	<b>quantidade de pontos</b>	<b>densidade (pontos/km<sup>2</sup>)</b>
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 Wolrd3d 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.

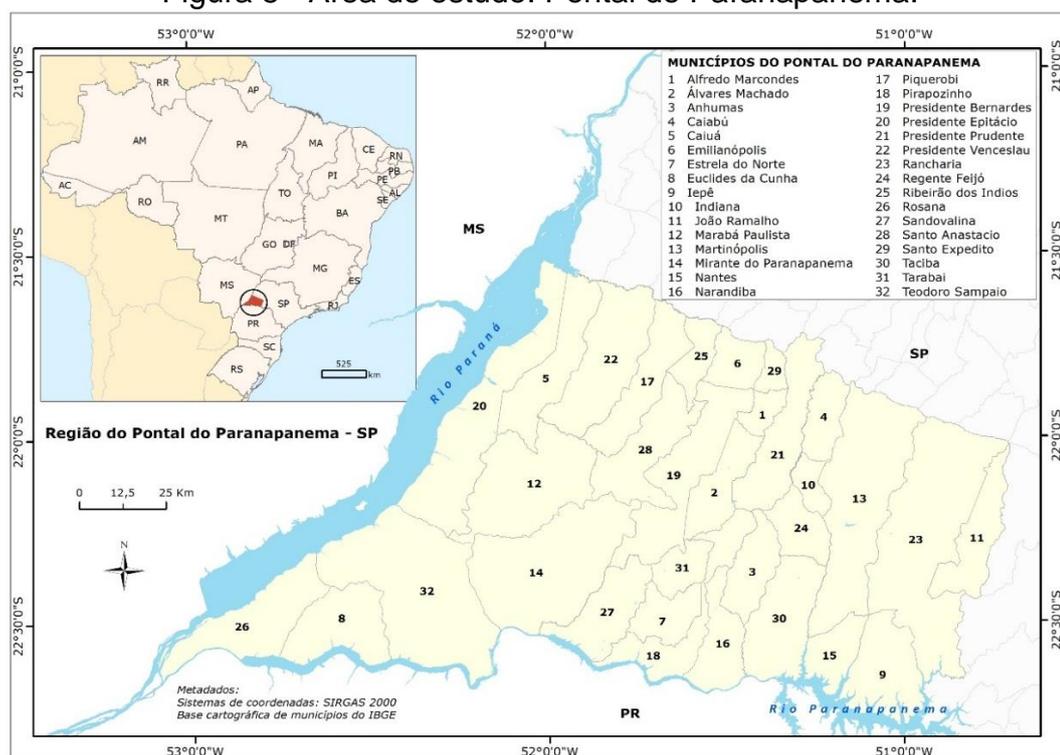
O presente trabalho propõe-se a avaliação da acurácia altimétrica de variados MDS gratuitos para toda a região do Pontal do Paranapanema, considerando um denso conjunto de pontos de verificação provenientes da integração dos bancos de dados SIGEF e da Fundação Instituto de Terras do Estado de São Paulo (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.

## **Materiais 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 5) e denominada de Pontal do Paranapanema. Segundo Torres e Silva Jr. (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 5 - 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 5).

Tabela 5 - 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

<b>MDS</b>	<b>Período de aquisição das imagens</b>	<b>Resolução espacial</b>	<b>Nº de Imagens utilizadas</b>	<b>Método de aquisição</b>
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 USGS (United States Geological Survey). A imagem do MDS referente ao Bare-Earth SRTM foi obtida na página da Universidade de Bistol, Reino Unido. As imagens do MDS do ALOS-Palsar foram obtidas na página Alaska Satellite Facility.

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):

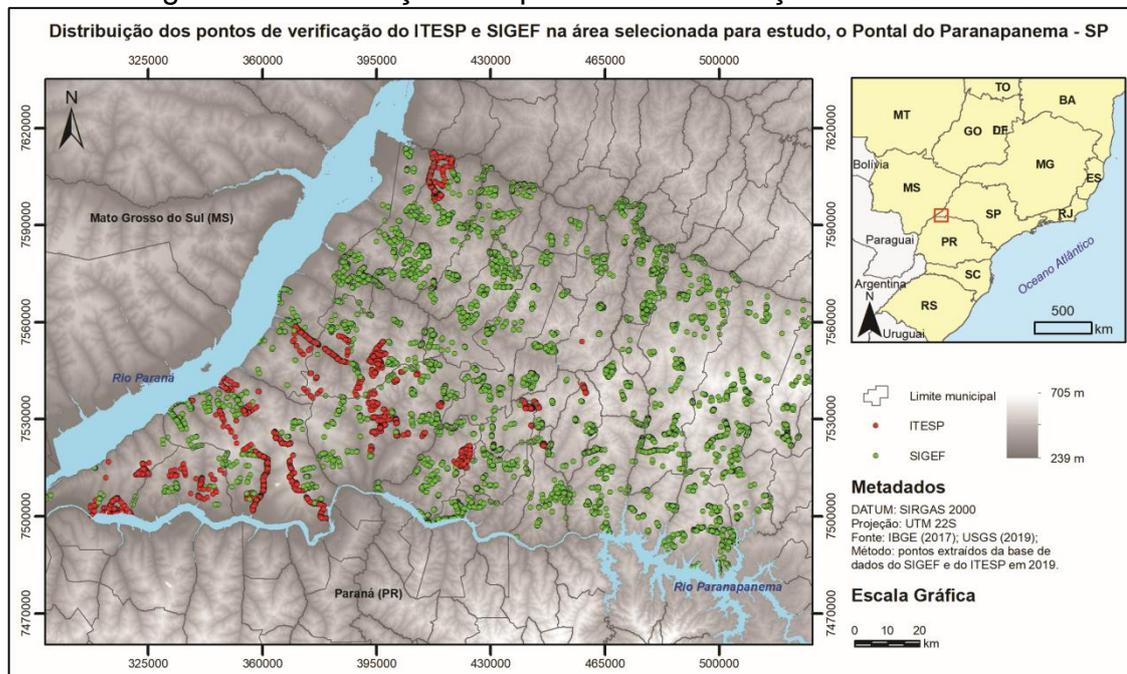
1. Seleção de pontos apenas do tipo M (Marco, isto é, levantados de forma direta e materializados no terreno) e do tipo P (Ponto, isto é, levantados de forma direta e não materializados no terreno). Há no banco de dados do SIGEF pontos de outros tipos, como tipo V (Virtual), que é determinado de forma 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 6), 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 6) 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 6 - Distribuição dos pontos de verificação na área em estudo.



Os MDS estudados disponibilizam a coordenada vertical em altitude ortométrica ( $H$ ) e referenciada ao datum EGM96 (HEGM96). 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 Vdatum do NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

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 ( $H_{MDS} - H_{\text{ponto\_verificação}}$ ), 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 6 (CONCAR, 2011). Essa abordagem de validação é tradicional (SOUZA et al., 2009; LOUSADA; 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 6 - 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

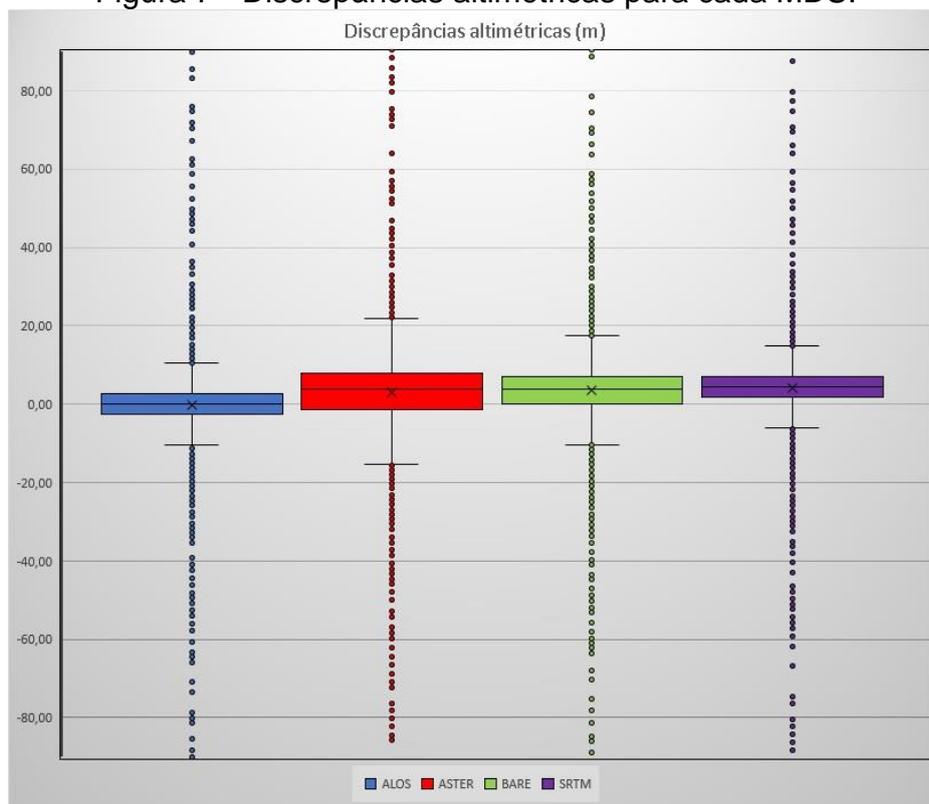
Fonte: CONCAR (2011) modificado pelos autores.

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 (HMDS – Hponto\_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 7 mostra as discrepâncias altimétricas para cada MDS validado. Essa representação gráfica, juntamente com os resultados da análise exploratória (Tabela 7), possibilitam a identificação de outliers no conjunto amostral de 15.176 pontos.

Figura 7 - Discrepâncias altimétricas para cada MDS.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 7, 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 7. 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 7).

Nos MDS analisados (Tabela 7), 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 7), 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 7 - Análise estatística dos valores de discrepâncias obtidos para cada MDS.

<b>Estatística das discrepâncias (m)</b>	<b>ALOS-Palsar</b>	<b>ASTER GDEM2</b>	<b>Bare-Earth SRTM</b>	<b>MDS v3 SRTM</b>
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
1° quartil (Q1)	-2,51	-1,32	0,10	1,84
2° quartil (mediana)	0,11	3,84	3,92	4,55
3° 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 7) 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  $\pm 20\text{m}$ ,  $\pm 15\text{m}$  e  $\pm 10\text{m}$  para analisar o comportamento dos dados na remoção dos outliers de acordo com cada limite definido. A Tabela 8 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 8 - 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. 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 8 com a Tabela 6, 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 6) 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; BARRETO, 2016), caso que pode ser comprovado ao se observar os valores de média e medianas das discrepâncias altimétricas antes (Tabela 7) e após (Tabela 8) a remoção dos outliers com base em cada limiar ( $\pm 10$ m,  $\pm 15$ m e  $\pm 20$ m).

Foi determinado (Tabela 9), para cada MDS, as porcentagens de pontos de verificação com discrepâncias altimétricas inferiores ao valor do PEC-PCD (Tabela 6) 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 6).

O modelo ASTER GDEM2 apresentou os piores resultados para a área estudada, (Tabela 9). 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 9 - 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 6). Sendo assim, apresenta-se na Tabela 10 o resultado da validação de cada MDS, segundo o conceito de PEC-PCD.

Tabela 10 - Validação dos MDS para cada faixa de exclusão.

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

Os modelos Bare-Earth SRTM e MDS v3 SRTM apresentam resultados similares (Tabela 10) quando aplicados os limiares de  $\pm 10\text{m}$ ,  $\pm 15\text{m}$  ou  $\pm 20\text{m}$ , obtendo a classificação classe C, escala 1:50.000. Uma exceção foi na aplicação do limiar de  $\pm 10\text{m}$ , 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.

## Referências

CARDOSO, F. A. C. et. al. Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente para a bacia do rio Doce: elaboração e análise. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.09, n.06, p.1978-1989, 2016.

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. 2.ed. 2011.

CORREA, N. F. et. al. Obtenção de MDE Corrigido para Delimitação de Bacia Hidrográfica com Auxílio de Geotecnologias Livres. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 40-1, p. 217-225, 2017.

CUNHA, H. N. et. al. Análise da Suscetibilidade à Erosão da Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã (RS). **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia – MG, v. 19, n. 65, p. 16-28, 2018.

ITESP. **Fundação Instituto de Terras do Estado de São Paulo – “José Gomes da Silva”**. Disponível em: <http://201.55.33.20/>. Acesso em: 12 set. 2019.

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

MACHADO, V. S. et. al. 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 - UFRJ**, v 42-4, p. 139-147, 2019.

MARINI, L. B. et. al. 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 - UFRJ**, v. 40-3, p. 48-54, 2017.

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, p. 195-202, 2008.

MOURA, L. Z.; BIAS, E. 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**, v. 1, n. 66, 2014.

MUKUL, M. et. al. Uncertainties in the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. **Scientific Reports**. v. 7, n. 41672, 2017.

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. et. al. Multi-Sensor Approach Towards a Global Vegetation Corrected SRTM DEM Product. **Remote Sensing of Environment**, v. 182, p. 49-59, 2016.

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, p. 7-16, 2016.

PEREIRA, H. L. et. al. 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**, v. 12, n. 1, p. 187-200, 2019.

PINTO, M. S.; AMORIM, A. Ortorretificação de Imagem Quickbird com Diferentes Modelos Digitais de Terreno: Análise da Qualidade Geométrica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 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. et. al. 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**, n. 68, p. 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**, v. Xli-B4N, n. Xxiii Isprs Congress, Prague, Czech Republic, 2016.

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, p. 101-117, 2015.

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

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

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

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a realização da pesquisa sobre a validação de diferentes modelos digitais de superfícies como suporte para estudos ambientais na região do Pontal do Paranapanema, foram preparados os dois manuscritos correspondentes às duas etapas realizadas para a divulgação da proposta em revistas científicas.

O Manuscrito 1 foi publicado no volume 42-4, ano 2019, da revista “Anuário do Instituto de Geociências” (ISSN: 0101-9759 e 1982-3908) da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, classificada como B2 pelo novo Qualis CAPES. Nesta etapa, observou-se que o banco de dados do SIGEF pode ser uma alternativa viável para ser incorporada em estudos de validação de acurácia vertical de MDS, pois possibilita o adensamento de pontos de verificação, reduzindo a necessidade de levantamentos de campo. No entanto, é necessária uma filtragem desses dados antes de iniciar o processo de validação.

Observou-se também que a utilização de altitudes ortométricas referenciadas ao datum vertical EGM96 resulta em uma melhora efetiva no valor do RMSE, isto é, contribui para o processo de validação. Essa constatação fornece embasamento para a recomendação dessa abordagem na execução de trabalhos semelhantes, o que não se tem visto até o presente momento, uma vez que os trabalhos realizados no Brasil têm, majoritariamente, utilizado o MAPGEO2015.

O Manuscrito 2 foi submetido e encontra-se em análise na revista “Caminhos de Geografia” (ISSN: 1678-6343) do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Uberlândia – UFU, classificada como A2 no novo Qualis CAPES. Pode-se concluir nessa etapa 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 todo o 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. No entanto, observou-se que

ambos bancos de dados, SIGEF e ITESP, requerem processos de filtragem para garantir confiabilidade na acurácia dos pontos.

Após defesa da dissertação, trabalhou-se nas recomendações que a banca examinadora realizou ao trabalho, visando melhorar o nível científico do mesmo.