



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
Vertical Accuracy Assessment of Digital Surface Models Using the Land Management System Data Base: A Case Study in the West of São Paulo State

Vagner Souza Machado¹; José Marcato Junior²;
Mariany Kerriany Gonçalves de Souza³; Lucas Prado Osco⁴ & Ana Paula Marques Ramos¹

¹ Universidade do Oeste Paulista, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, Rodovia Raposo Tavares, km 572, 19067-175, Presidente Prudente, SP, Brasil

² Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Pioneiros, Cidade Universitária, 79070-900, Campo Grande, MS, Brasil

³ Universidade do Oeste Paulista, Faculdade de Engenharia Ambiental e Sanitária, Rodovia Raposo Tavares, km 572, 19067-175, Presidente Prudente, SP, Brasil

⁴ Universidade do Oeste Paulista, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Rodovia Raposo Tavares, km 572, 19067-175, Presidente Prudente, SP, Brasil

E-mails: vagcarto@gmail.com; jose.marcato@ufms.br; kerriany_gon@yahoo.com.br; pradoosco@gmail.com; anamos@unoeste.br

Recebido em: 30/04/2019 Aprovado em: 18/07/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_4_139_147

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

1 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 serem 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 km² (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.

2 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 km². 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).

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.

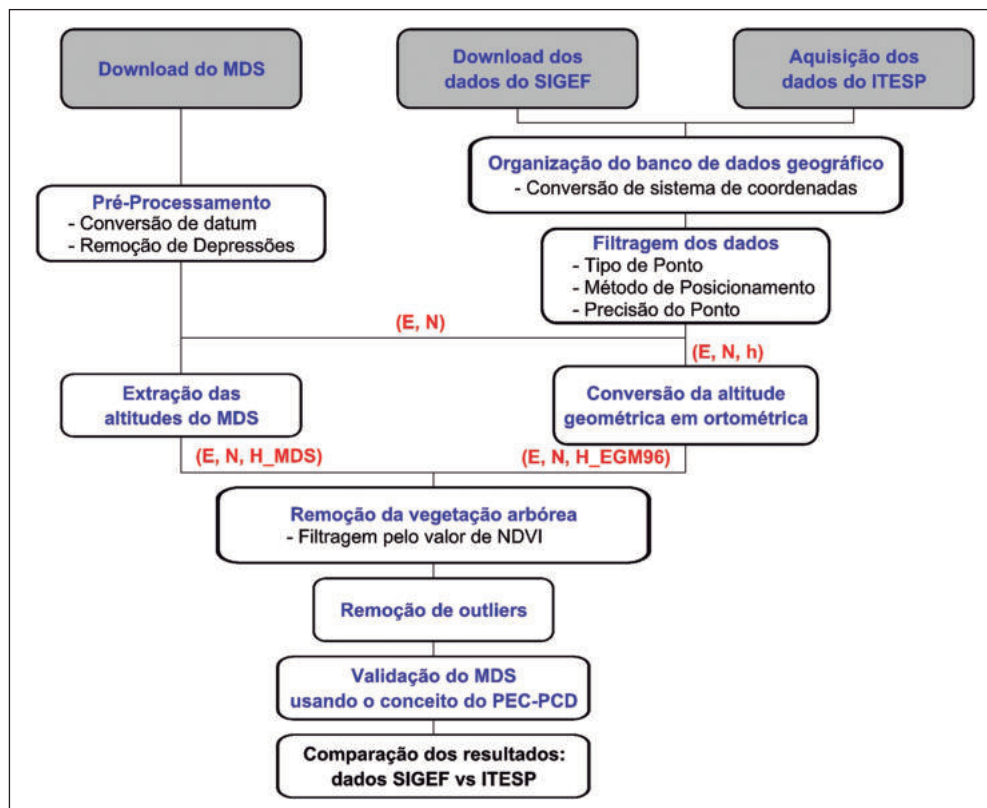


Figura 1 Fluxograma de trabalho.

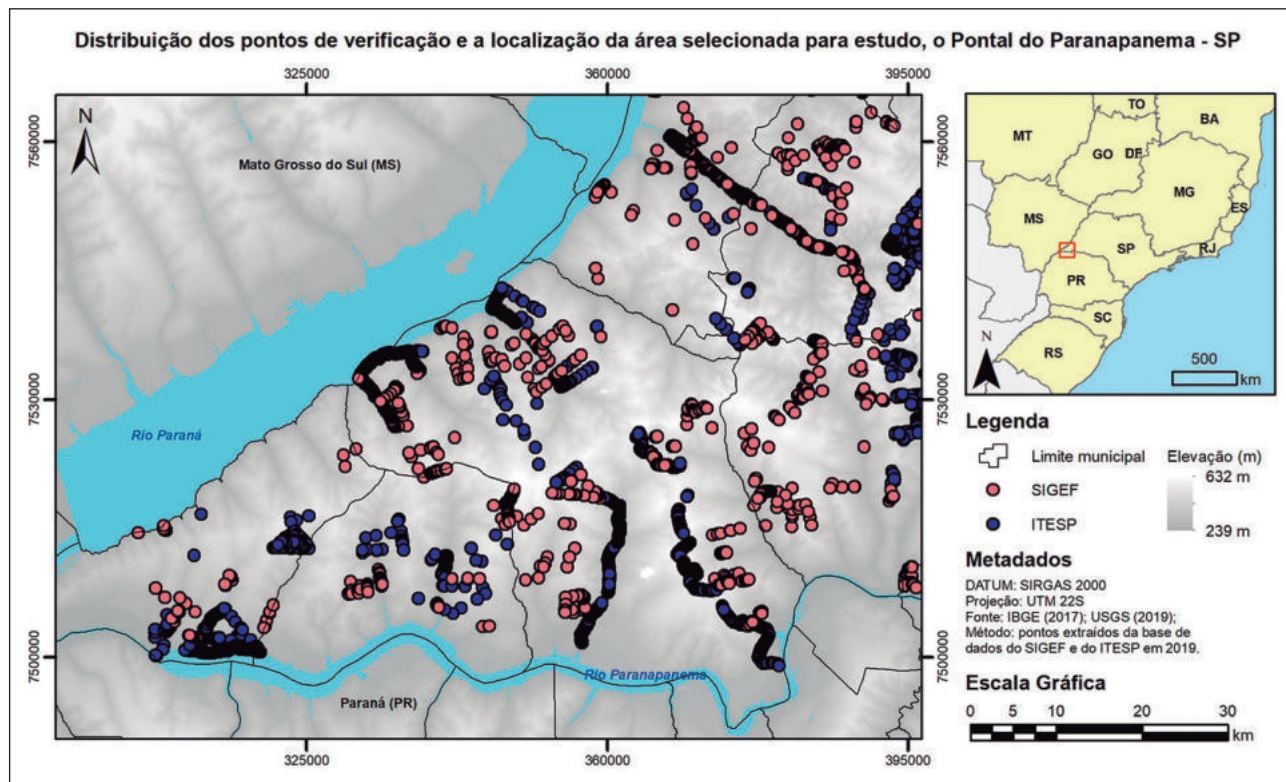


Figura 2 MDS SRTM 3 e distribuição dos pontos do SIGEF (vermelho) e da Fundação ITESP (azul).

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 *Box-Plot*. 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 considera-

dos 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).

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
D	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00

Tabela 1 Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais. Fonte: (CONCAR, 2011).

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).

3 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.

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 Fun-

dação 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.

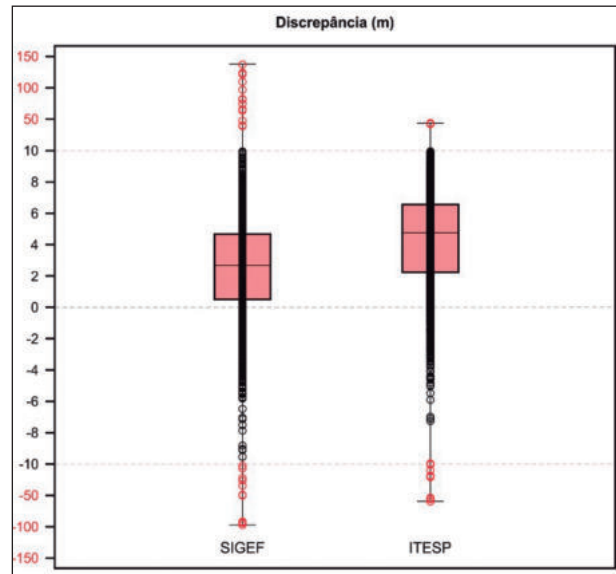


Figura 4 Gráfico boxplot das discrepâncias da altitude ortométrica_EGM96.

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

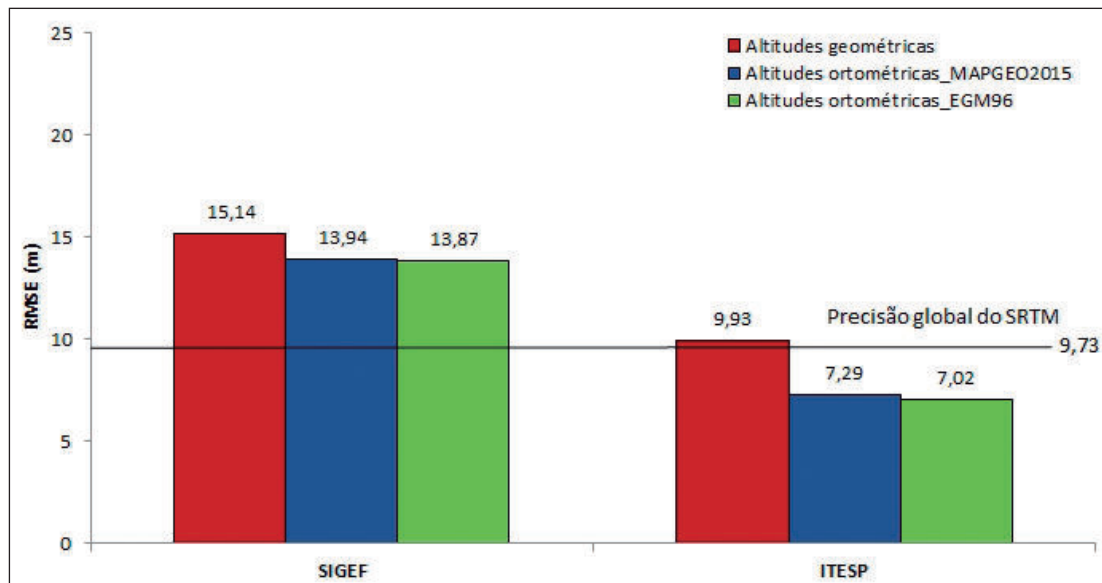


Figura 3 Comparação dos RMSE obtidos das diferenças entre as altitudes do SRTM e as altitudes dos pontos de verificação (SIGEF e ITESP).

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).

Descrição	SIGEF	ITESP
Dados sem filtragem		
N° 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)		
N° de pontos	1283	2428
RMSE	14,76	5,97
Média	2,70	4,38
Desvio Padrão	14,51	4,05
Filtragem pelo NDVI e outliers (NDVI<0,65 e ΔH<15m)		
N° de pontos	1219	2415
RMSE	4,32	5,43
Média	2,51	4,42
Desvio Padrão	3,51	3,16

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.

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 ($\Delta H < 15m$).

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%

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.

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 filtrações, 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.

4 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 filtração desses dados antes de iniciar o processo de validação.

A aplicação do processo de filtração 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 filtração empregado, e, não necessariamente, com a qualidade dos MDS. Assim, o processo de filtração 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.

5 Agradecimentos

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

6 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

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

Vagner Souza Machado; José Marcato Junior; Mariany Kerriany Gonçalves de Souza; Lucas Prado Osco & Ana Paula Marques Ramos

- FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, Goa, Índia, p. 25-30.
- Chaves, M.A. 2002. *Modelos Digitais de Elevação Hidrológica 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.; Mioto, 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.
- Gorokhovich, Y. & Voustianouk, 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. *Palaeontologia Electronica*: 9pp. Disponível em: <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>. 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.
- Li, Z., Zhu, Q. & Gold, C. M. 2005. *Digital Terrain Modeling. 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.