

Comparação nas análises da acurácia vertical entre os Modelos Digitais de Elevação Nasadem, SRTM, AW3D30 e Copernicus DEM para o estado do Rio Grande do Sul

Comparison of vertical accuracy analyses between Nasadem, SRTM, AW3D30 and Copernicus DEM Digital Elevation Models for the state of Rio Grande do Sul

Morvana Machado ¹

Clódis de Oliveira Andrade Filho ²

Sérgio Florêncio de Souza ³

Beatriz da Rosa Cargnin ⁴

Eléia Righi ⁵

Resumo

Este trabalho avalia à acurácia vertical dos modelos digitais de elevação (MDEs) AW3D30, NASADEM, SRTM e COPERNICUS-DEM (COP-30), com resolução espacial de 30m, no território do Estado do Rio Grande do Sul. A base de referência de avaliação compõe as estações de referência de nível (RRNN) fornecida pela rede altimétrica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, obtidas pelo Sistema Geodésico Brasileiro. A metodologia desta pesquisa seguiu as seguintes etapas: I) compatibilização do Datum vertical dos MDEs em EGM2008 utilizando o serviço do ICGEM (*International Centre for Global Gravity Field Models*); II) filtragem das 2957 RRNN fornecidas pelo IBGE para a totalidade do território do Rio Grande do Sul e obtenção de um montante de 894 pontos homólogos entre os quatro MDEs, utilizando os dados do SGB; ; III) avaliação da acurácia vertical, realizada a partir de análise estatística e apreciação das resultantes com base no Padrão de Exatidão Cartográfica dos

- 1 Engenheira Cartógrafa e Agrimensora, mestrandona Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – LATITUDE (UFRGS/CNPq), Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), morvana.machado@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-9703-2672>;
- 2 Doutorado em Geociências (Geoquímica e Geotectônica) pela Universidade de São Paulo / Professor Adjunto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. E-mail: clodisfilho@gmail.com; Orcid: 0000-0002-8050-6719;
- 3 Doutor em Geofísica pela Universidade de São Paulo / Professor titular da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Professor permanente do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR). E-mail: sergio.florencio@ufrgs.br; <https://orcid.org/0000-0002-4720-6714>;
- 4 Mestre e doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR), Instituto de Geociências (IGeo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Grupo de Pesquisa LATITUDE (UFRGS/CNPq), Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM); E-mail: darosabeatriz6@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-1675-839X>;
- 5 Doutora, professora adjunta da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS). Pós-doutoramento no Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto – UFRGS. E-mail: eleia-righi@uergs.edu.br; Orcid: 0000-0002-2766-8719;

Produtos Cartográficos Digitais (PEC/PCD), a aferição de acurácia das RRNN junto aos DEMs em programação Python. Conclui-se que: I) houve aderência dos MDEs junto as RRNN, embora os MDEs avaliados sejam oriundos de diferentes sistemas orbitais de sensoriamento remoto; II) em termos de acurácia vertical e variabilidade dos dados, os MDEs apresentaram resultados expressivamente similares, portanto, ambos compatíveis para uso em estudos que necessitem análises de relevo em contextos regionais.

Palavras-Chave: Acurácia altimétrica, Modelo digital de elevação, PEC-PCD.

Abstract

This work evaluates the vertical accuracy of the AW3D30, NASADEM, SRTM and COPERNICUS-DEM (COP-30) digital elevation models (DEMs), with a spatial resolution of 30m, in the state of Rio Grande do Sul. The evaluation reference base consists of the level reference stations (RRNN) provided by the altimetric network of the Brazilian Institute of Geography and Statistics, obtained by the Brazilian Geodetic System. The methodology of this research followed the following steps: I) compatibility of the vertical datum of the DEMs in EGM2008 using the ICGEM (International Centre for Global Gravity Field Models) service; II) filtering of the 2957 RRNN provided by the IBGE for the entire territory of Rio Grande do Sul and obtaining an amount of 894 homologous points between the four DEMs, using the SGB data; III) evaluation of vertical accuracy, based on statistical analysis and evaluation of the results based on the Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC/PCD), and measurement of the accuracy of the RRNN with the DEMs in Python programming. It was concluded that: I) the DEMs adhered to the NRENs, even though the DEMs evaluated came from different orbital remote sensing systems; II) in terms of vertical accuracy and data variability, the DEMs showed expressively similar results, and both are compatible for use in studies that require relief analysis in regional contexts

Keywords: Altimetric accuracy, Digital elevation model, PEC-PCD.

Introdução

Vários estudos já foram realizados no Brasil, no intuito de avaliar modelos digitais de elevação (MDEs) disponibilizados abertamente (Araújo *et al.*, 2018; Souza *et al.*, 2019; Viel *et al.*, 2020; Cremon *et al.*, 2021), entretanto, poucas foram as pesquisas direcionadas para uma avaliação comparativa da qualidade dos MDEs, sobretudo considerando a acurácia vertical utilizando parâmetros de análises na comparação entre MDEs de diferentes naturezas. A comunidade

acadêmica e profissional utiliza amplamente esses MDEs em áreas como engenharia, cartografia, geologia, geomorfologia, climatologia, biologia, agronomia etc. (Guth *et al.*, 2021).

O Sistema Geodésico de Referência (SRG) (Oliveira, 1998) é um sistema associado a algumas características terrestres, essa definição de posições sobre a superfície terrestre através da geodésia implica na adoção de dois SGR, um horizontal e outro vertical. O SGR vertical fornece a referência para determinar o componente altimétrico do SGB (Sistema Geodésico Brasileiro), já o SGR horizontal fornece a referência para determinar as componentes planimétricas (latitude e longitude).

Entre MDEs mais utilizados estão o NASADEM, AW3D30, SRTM e o COPERNICUS DEM (COP-30), todos com resolução espacial de cerca de 30 metros. Estes modelos são amplamente aplicados em estudos regionais que demandam dados de elevação, sendo gerados por sensores ópticos, radares, conforme a técnica empregada (Gerente *et al.*, 2018, Toutin, 2008).

Segundo Gerente *et. al.* (2018), os MDEs podem ser obtidos por sensores ópticos, radares de abertura sintética (SAR) e também por light detection and ranging (LiDAR), além de topografia em campo. Os modelos gerados por LiDAR se aplicam em estudos locais, dado a alta resolução espacial. Os dados de elevação gerados por imagens de sensores ópticos geralmente são obtidos por técnicas de estereoscopia. Os modelos derivados de radar de abertura sintética podem ser gerados por técnicas de interferometria (InSar), polarimetria e clinometria (Toutin, 2008).

Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) consistem, essencialmente, em dois componentes principais: um modelo de dados no formato Raster, que representa a superfície do terreno através de uma grade regular de células, e um modelo matemático, que permite a análise e interpretação do relevo. Estes modelos são amplamente utilizados para a extração de informações geométricas, numéricas e visuais (Pike, 2000). Além disso, os MDEs podem ser gerados a partir de cartas topográficas pré-existentes, por derivação de curvas de nível ou através de levantamentos terrestres (Guth *et al.*, 2021).

A análise da acurácia vertical dos MDEs no Estado do Rio Grande do Sul é especialmente relevante, dada a falta de mapeamentos precisos na região. Portanto, este estudo visa identificar o

MDE que melhor se adere ao relevo do Estado, oferecendo uma base sólida para futuras aplicações que demandem maior acurácia vertical.

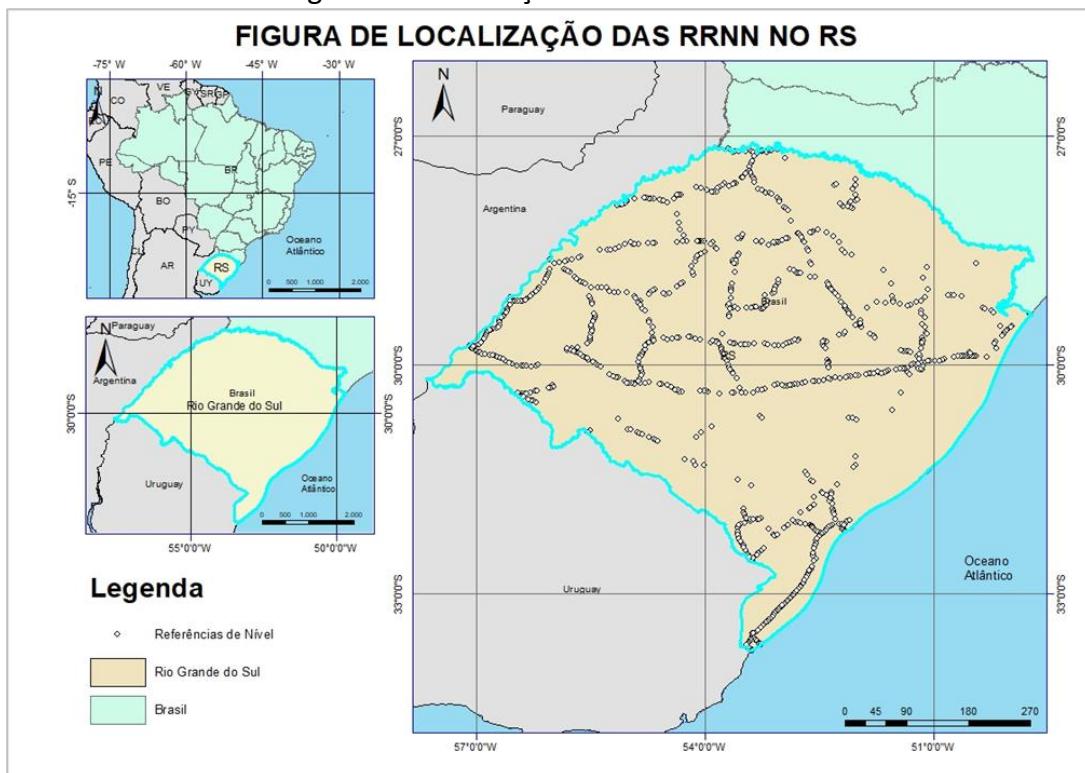
Materiais e Métodos

O estudo realizou-se para o Estado do Rio Grande do Sul, visando a acurácia altimétrica dos MDEs NASADEM, AW3D30, SRTM e COP-30, com base nas estações de referência de nível fornecida pela rede altimétrica do IBGE do SGB para os MDEs. Os métodos empregados no processo de análise desta pesquisa envolvem o levantamento dos dados da rede altimétrica disponível pelo IBGE, a aplicação de análises estatísticas e a filtragem das amostras dos dados para a classificação de produtos cartográficos quanto à sua qualidade posicional altimétrica.

Área de Estudo

Situado na região Sul do Brasil, o Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1) faz fronteira com o Uruguai ao sul, a Argentina a oeste e o Estado de Santa Catarina ao norte. Com um clima subtropical, apresenta uma geomorfologia diversa e altitudes que variam de 0 a aproximadamente 1.403 metros (IBGE, 2022). Ao Norte, destacam-se os planaltos com altitudes superiores a 1.000 metros, enquanto a região central é marcada por depressões. Ao Sul, predominam planícies com altitudes médias de cerca de 100 metros, como no Vale do Taquari. As altitudes mais elevadas concentram-se na porção leste do estado, variando entre 600 e 1.300 metros, o que resulta num relevo acidentado e numa distribuição desigual das (RRNN), devido às variações topográficas e à grande amplitude altimétrica (CPRM, 2006, 2010). O território estadual está localizado entre as coordenadas de latitude 32° 02' 06" e longitude 52° 05' 55", referenciadas ao SIRGAS 2000, e possui uma área total de 281.707,15 km² (IBGE, 2022).

Figura 1 – Localização da área de estudo.



Fonte: Autores (2024).

Pré-processamento dos MDES

Os modelos analisados nessa pesquisa (NASADEM, SRTM, AW3D30 e COP-30) foram obtidos através da plataforma OpenTopography (<http://opentopography.org>) de acesso gratuito. Tendo em vista que o MDE COP-30 possui como Datum vertical o EGM2008 e os demais o EGM96, foi necessário fazer a conversão para compatibilizar os modelos. Que se iniciou com o cálculo para converter do Datum vertical EGM96, utilizando o serviço do ICGEM (International Centre for Global Gravity Field Models) foi feito o download dos dados geoidais para os MDEs NASADEM, SRTM e AW3D30 para o Datum vertical EGM2008, afim de que, estes MDEs estejam no mesmo Datum vertical do MDE COP-30 mais atual, tendo em vista que o modelo EGM2008 tem acurácia de 5-10 cm, o que representa um acréscimo de até 6 vezes sobre o modelo EGM96 (Cremon et al., 2022). Para os modelos NASADEM, AW3D30 e SRTM o experimento está descrito nas seguintes equações matemáticas para a acurácia dos modelos:

Método simples: Para a aplicação deste método segue o processo de cálculo, abrange as quatro etapas seguintes:

Etapa 1: O método para validação dos modelos do Datum vertical EGM96, é a correção das ondulações obtidas por meio de GNSS/Nivelamento em RRNN, equações 1 a 5:

$$N_{REF} = h_{geop} - H_{EGM96} \quad (1)$$

$$C_{RRNN} = N_{REF} + H_{EGM2008} \quad (2)$$

Etapa 2: De posse das correções de referência obtidas pelas RRNN e das ondulações geoidais, faz-se a correção dos MDEs para o Datum vertical EGM2008, através da equação 3:

$$C_{DEM} = (h_{geop} - H_{EGM96}) + H_{EGM2008} \quad (3)$$

Etapa 3: Procede-se o cálculo para aferir se há diferença significativa entre as RRNN e o DEM.

Equação 4:

$$\Delta_{mod} = N_{REF} - N_{mod} \quad (4)$$

Etapa 4: Realiza-se o cálculo do RMS, segundo a equação 5:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum(\Delta_{mod})^2}{n}} \quad (5)$$

Pré-Processamento dos dados de referência

Após obter os dados altimétricos do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), realizou-se o processo de filtragem dos mesmos onde foram filtrados 894 pontos homólogos entre os 2957 pontos das RRNN fornecidas pelo IBGE para o Estado do Rio Grande do Sul.

Avaliação do PEC/PCD

Para esta pesquisa os MDEs foram avaliados seguindo as exigências do Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais – PEC/PCD, conforme o Decreto Federal nº 89.817 de 20 de julho de 1984 (BRASIL, 1984), que estabelece que a tolerância vertical e o erro médio quadrático (EQM) respeitem a equidistância entre as curvas de nível, ou seja, para uma determinada categoria ser aceita, 90% dos pontos de altitude não deverão apresentar discrepância superior ao PEC altimétrico estabelecido através do erro quadrático médio ao qual é possível calcular o indicativo de dispersão relativo da probabilidade, que corresponde a 1,6449 vezes o erro médio (BRASIL, 1984),

conforme (Tabela 1). A acurácia vertical dos quatro MDEs foi avaliada por meio de análise estatística e do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC/PCD), programado em Python para aferir a precisão e a acurácia.

Tabela 1 - Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais em relação à acurácia altimétrica de MDEs

PEC/PCD	1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	Eqm = 10m		Eqm = 20m		Eqm = 50m		Eqm = 100m	
	PEC (m)	EP (m)	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	27,00	16,67
B	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
C	6,00	4,00	12,00	12,00	30,00	20,00	60,00	40,00
D	7,50	5,00	15,00	15,00	37,50	25,00	75,00	50,00

Fonte: Engesat.

Na metodologia utilizada para o cálculo, calcula-se o erro/diferença da altitude (DH) subtraindo o valor de referência (H_{REF}) o valor dado que se deseja avaliar (H_{MDE}), conforme a equação 6:

$$DH = H_{REF} - H_{MDE} \quad (6)$$

O resultado dessas diferenças é avaliado primeiramente, quanto à existência de erros sistemáticos, e após, quanto a aderência ao PEC-PCD.

A avaliação quanto a existência de propensão sistemática foi usada o método estatístico do modelo “t” de Student e o Teste ANOVA. O valor de “t” amostral é obtido através de equação 7:

$$t_x = \frac{DH}{S_{DH}} n^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Onde o DH é a medida dos erros e o S_{DH} é o desvio padrão do conjunto de erros e n é o número de pontos em que os erros foram avaliados. O intervalo de confiança do teste “t” de Student é dado pela equação 8:

$$|t_x| < t_{(n-1, \alpha/2)} \quad (8)$$

Quando o módulo do valor calculado de “t” for menor que o valor de “t” tabelado para $n-1$ graus de liberdade e nível de significância α levando em conta o produto de livre tendência sistemática. As análises de precisão realizada na comparação entre o desvio padrão dos erros com o Erro

Padrão (EP) especificado através do PEC/PCD para cada escala e classe, aplicou-se o teste de hipótese, equação 9 e 10:

$$H_0 = S_{DH}^2 = \sigma_H^2 \quad (9)$$

$$H_1 = S_{DH}^2 > \sigma_H^2 \quad (10)$$

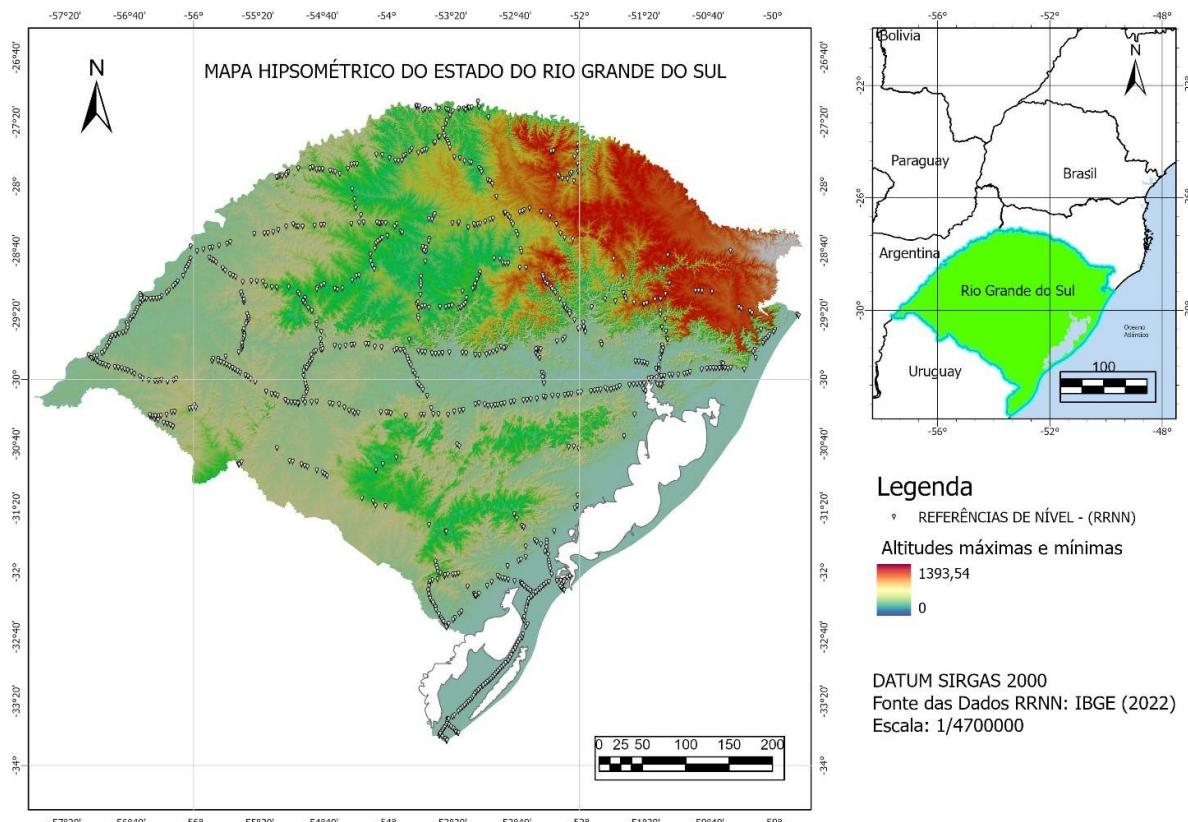
A qual σ_H corresponde ao desvio padrão correspondente a coordenada x em questão, e aplica-se o teste do Qui-quadrado amostral, para qual o parâmetro do Qui-quadrado (X^2) é calculado através das equações 11 e 12:

$$\sigma_x = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

$$X_x^2 = (n - 1) \frac{S_{DH}^2}{\sigma_x^2} \quad (12)$$

O valor do Qui-quadrado calculado for maior que o tabelado com $n-1$ graus de liberdade a um intervalo de confiança α , assim, o produto não tende à precisão da escala e classe de análise (Moura *et al*, 2014). A figura 2, representa a hipsometria do Estado do Rio Grande do Sul elaborado através do MDE COP-30.

Figura 2 - Hipsometria



Fonte: Autores (2024).

Resultados e Discussões

Analizando os dados estatísticos dos MDEs (Tabela 2), observou-se discrepâncias máximas, médias e desvio padrão. Todos os modelos apresentaram elevações mínimas de zero, indicando que utilizaram o nível médio do mar como referência padrão para as medições de elevação, observando os valores de máxima obtidas para o MDE NASADEM (10,93 m) e o SRTM obteve o menor valor (4,44m). Também se observou que o modelo que obteve o menor desvio padrão foi o AW3D30 (1,94 m) e o maior foi o MDE NASADEM (2,44 m), quando o RMSE o menor valor obtido foi o MDE SRTM.

Tabela 2 - Discrepâncias máximas, mínimas, desvio padrão e RMSE (*Root Mean Square Error*) entre os MDEs e as RRNN em m.

	NASADEM	SRTM	AW3D30	COP-30
Máxima	10.93	4.44	7.09	10.65
Mínimo	0	0	0	0
Média	5.96	4.29	4.40	4.98
Desvio Padrão	2.44	2.00	1.94	2.18
RMSE	2.44	2.07	2.10	2.23

Fonte: Autores (2024).

Este comportamento é esperado, pois esses modelos são projetados para representar alturas relativas a uma base geográfica consistente. Segundo (Guth, 2021), a variação observada nas elevações máximas reflete diferenças na capacidade de detalhamento de cada modelo em áreas de alta altitude. Alguns MDEs podem ser mais eficazes na captura de elevações extremas, enquanto outros apresentam limitações relacionadas à resolução espacial ou à cobertura dos dados.

Entre os modelos analisados, o MDE COPERNICUS (COP-30) e o NASADEM mostraram maior robustez na representação de elevações extremas, evidenciando maior sensibilidade em áreas de alta altitude. Em contrapartida, os modelos SRTM e AW3D30 apresentaram valores máximos menores. Modelos com maior resolução espacial, como o COP-30 e o NASADEM (Guth, 2021), conseguem capturar variações topográficas mais sutis em áreas montanhosas, enquanto modelos como o SRTM podem apresentar maior generalização, resultando em menor precisão na identificação de elevações extremas.

As análises estatísticas dos MDEs mostraram que as médias apresentaram diferenças superiores a 1 metro, indicando que os modelos refletem o comportamento geral em áreas de diferentes altitudes. Essas diferenças podem ser influenciadas pelas elevações observadas MDEs, organizadas em termos de frequência e magnitude. Quando um modelo tende a subestimar ou superestimar as elevações de forma consistente, a média é afetada (Viel *et al.*, 2020). Já os erros sistemáticos, que oscilam ao redor da média sem um padrão claro, podem se anular parcialmente

ao calcular a média ou impactar de maneira desproporcional quando há discrepâncias extremas.

Conforme (Viel *et al.*, 2020) a variabilidade dos erros aleatórios, representada pelo desvio padrão, é uma métrica fundamental para entender se os erros estão concentrados em torno da média ou amplamente dispersos. O MDE NASADEM, por exemplo, apresenta uma média de erro maior, o que pode ser atribuído a valores extremos (elevações muito discrepantes). Análises adicionais da distribuição dos erros ajudariam a esclarecer se o problema é generalizado (muitos erros moderados) ou pontual (alguns erros muito grandes).

Para o modelo COP-30 apresenta média ligeiramente superior à do SRTM, sugerindo que, em geral, o modelo tende a apresentar discrepâncias de elevação pouco maior em relação aos valores de referência, podendo ser sensível a variações locais ou aos erros sistemáticos em certas regiões. Portanto, o MDE COP-30 é mais detalhado, especialmente em áreas de maior complexidade topográfica, levando a uma maior variabilidade nos erros e médias ligeiramente mais altos. Essa característica pode ser atribuída às particularidades do processamento e dos métodos de aquisição de dados.

De modo, o modelo SRTM apresenta uma média de erro menor e maior consistência, com desvio padrão reduzido. Isso indica um comportamento mais previsível e próximo das elevações reais. Contudo, apesar de sua precisão global, o SRTM pode ser menos eficiente para capturar variações topográficas em áreas de maior complexidade, mostrando-se mais propenso a suavizar os detalhes.

O RMSE mede a acurácia dos MDEs, ou seja, o quanto próximo o modelo está das elevações observadas ou reais. Valores mais baixos de RMSE indicam maior proximidade dos valores previstos pelo modelo digital com os valores observados das RRNN, enquanto valores muito altos indicam maior discrepância.

Nas análises observadas, os valores mais altos de RMSE nos modelos COP-30 e NASADEM podem ser associados às diferenças nos métodos de aquisição e processamento dos dados, que pode capturar variações topográficas, e também pode apresentar maior variabilidade entre o modelo e o dado observado, introduzindo um ruído em áreas de difícil modelagem. Para os modelos

AW3D30 e SRTM, ambos apresentam desempenho consistente em termos de acurácia, sugerindo que os modelos são capazes de representar as elevações mais próximas das observadas e aderência junto as RRNN, refletindo uma menor discrepância e um bom desempenho global.

O teste ANOVA (Tabelas 3 e 4), revelou diferenças estatisticamente significativas entre os erros médios dos quatro MDEs (SRTM, NASADEM, AW3D30 e COP-30) com um valor de F igual a 63,99 e um valor-p de $2,69 \times 10^{-40}$, indicando que pelo menos um dos modelos possui desempenho significativamente diferente dos demais. Essas diferenças decorrem da aderência de cada modelo às RRNN utilizadas, ou seja, às elevações observadas no relevo estudado. O COP-30 apresentou a maior média de erro (0,47), seguido pelo NASADEM (0,04), enquanto o SRTM (-0,53) e o AW3D30 (-0,81) apresentaram médias negativas, sugerindo uma tendência de subestimação das elevações. A variância dos erros foi maior no NASADEM (5,97) e menor no AW3D30 (3,79), refletindo diferenças na dispersão dos erros entre os modelos.

Tabela 3 - Resumo para o teste ANOVA.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
SRTM	894	-477,15	-0,53	4,01
NASADEM	894	36,15	0,04	5,97
AW3D30	894	-724,84	-0,81	3,79
COP-30	894	422,85	0,47	4,77

Fonte: Autores (2024).

Tabela 4 - Teste estatístico ANOVA – fator único.

Fonte de Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor - p	F crítico
Entre grupos	889,44	3	296,48	63,99	$2,69 \times 10^{-40}$	2,61
Dentro dos grupos	16549,99	3572	4,63			
Total	17439,44	3575				

Fonte: Autores (2024).

Esses resultados destacam como os métodos de aquisição dos dados, as técnicas de processamento e as características do relevo do Estado do Rio Grande do Sul influenciam o desempenho dos modelos na altimetria, especialmente devido à distribuição não homogênea das RRNN na topografia do Estado. Para as análises do PEC-PCD (Tabela 1), considerando a escala 1:25.000 e a classe A, é exigido que 90% dos 894 pontos das RRNN apresentem $PEC \leq 2,70m$ e $EP \leq 1,67m$, conforme o decreto federal (Tabela 5). Os MDEs analisados atendem a esses critérios para cada classe e escala:

Tabela 5 - Classificação dos pontos dos MDEs para as Cartas 1:25.000 e 1:50.000.

MDE	Escala 1:25.000				Escala 1:50.000			
	Classes				Classes			
	A	B	C	D	A	B	C	D
NASADEM	682	136	50	24	830	60	2	1
COP-30	702	112	43	23	824	56	7	6
AW3D30	788	83	23	0	874	20	0	0
SRTM	752	103	33	0	871	23	0	0

Fonte: Autores (2024).

Os resultados de classificação das estações em diferentes classes para os MDEs analisados indicam diferenças significativas na acurácia de cada modelo em relação ao padrão cartográfico digital. Para a classe de 1:25.000 o MDE AW3D30 apresentou o melhor desempenho geral, com 88,14% das estações classificadas na classe A e nenhuma estação na classe D, demonstrando alta precisão em relação às demais classes. O SRTM também obteve um bom desempenho, com 84,79% das estações na classe A e nenhuma na classe D, sugerindo consistência em escalas cartográficas superiores.

O COP-30 apresentou 78,52% das estações na classe A, seguido pelo NASADEM com 76,29% na classe 1:25.000, indicando que ambos os modelos possuem boa acurácia em representar o relevo, mas com desempenho ligeiramente inferior ao AW3D30 e ao SRTM. No entanto, ambos os modelos ainda tiveram vértices classificadas nas classes C e D, sugerindo a presença de maior variabilidade nos erros de elevação em algumas áreas. Esses resultados refletem a capacidade variável dos MDEs

em atender aos padrões exigidos junto as RRNN, dependendo da complexidade do relevo e da resolução do modelo.

A análise de classificação para a Tabela 5, o MDE NASADEM identificou que quatro vértices (0,45%) RRNN foram listadas como “não classificadas” por não atenderem aos critérios exigidos pela legislação federal para o padrão cartográfico digital. No MDE COP-30, 14 vértices (1,57%) RRNN atenderam aos critérios do padrão cartográfico digital, mas também foram consideradas “não classificadas” por não cumprirem os requisitos legais. Já no MDE AW3D30, 88,14% dos pontos analisados apresentaram erro inferior a 2,70 m, atendendo à classe A dessa escala, enquanto as demais classes estão detalhadas na Tabela 5. Por fim, o MDE SRTM foi classificado como adequado tanto para a escala 1:25.000 quanto para escalas superiores.

Os resultados para a carta na escala 1:50.000 mostram que os MDEs NASADEM, COP-30, AW3D30 e SRTM apresentaram desempenhos distintos em relação ao atendimento das classes de acurácia cartográfica. O MDE NASADEM classificou 92,84% dos vértices na Classe A, com 6,71% na Classe B e uma pequena parcela nas Classes C (0,22%) e D (0,11%), indicando maior concentração em níveis de relevo altimétrico, mas com algumas inconsistências em relação aos outros modelos. O COP-30 apresentou 92,17% dos vértices na Classe A, com um leve aumento de vértices nas Classes C (0,78%) e D (0,67%), o que pode indicar maior sensibilidade a variações do relevo local.

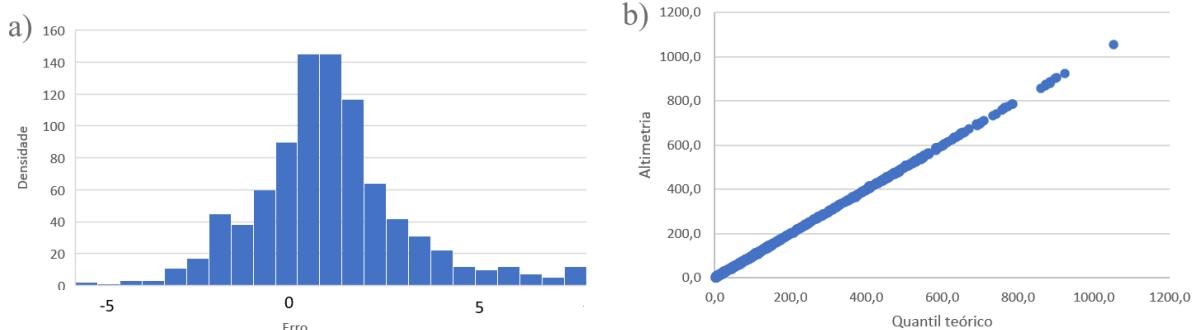
Contudo, o MDE AW3D30 e o SRTM mostraram os melhores desempenhos, com 97,26% e 97,43% dos vértices, respectivamente, classificadas na Classe A, e o restante na Classe B, sem vértices de RRNN registradas nas Classes C e D. Esses resultados mostram a aderência das RRNN junto aos MDEs no relevo do Estado do Rio Grande do Sul.

O processamento do MDE NASADEM revelou que, para a escala e classe analisadas, apenas 1 estação de RRNN (0,11%) não atendeu aos critérios legais estabelecidos, sendo listada como "não classificada". Dos 894 vértices avaliadas, 893 foram classificadas dentro dos parâmetros exigidos. No caso do MDE COP-30, os resultados indicaram que mais de 90% das RRNN atenderam aos critérios na escala 1:50.000, conforme apresentado na Tabela 5, com apenas 1 estação (0,11%) não sendo classificada por não cumprir os requisitos legais. O MDE AW3D30 com 97,26% atendeu plenamente

às normas estabelecidas para as escalas analisadas, sem nenhuma estação de RRNN listada como "não classificada". De forma similar, o MDE SRTM não apresentou vértices fora dos critérios legais avaliados.

Os resultados obtidos revelam diferenças de comportamento entre os MDEs analisados. A variabilidade entre as métricas aplicadas entre os dados altimétricos dos modelos e os dados de referência altimétricos do IBGE, possui forte correlação com o coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,99% (Figura3). A distribuição dos módulos dos erros entre os 4 MDEs analisados e os dados de referência constata que, os maiores erros estão associados a maiores valores de declividade uma vez que é possível encontrar maior valores de erro nas partes íngremes do que nas partes planas. Esta constatação é fundamentada em trabalhos como (Morais *et al.*, 2017; Jair *et al.*, 2017) onde os erros dos MDEs analisados tendem a aumentar com o aumento da declividade.

Figura 3 - Visualização da distribuição estatística do erro do MDE COP-30 e os dados de referência do IBGE. a) histograma da variabilidade geomorfológica do Estado; e b) Histograma do quantil-quantil.



Fonte: Autores (2024).

A qualidade dos MDEs varia entre as escalas analisadas e entre os modelos avaliados, refletindo as particularidades do relevo do Estado do Rio Grande do Sul. Este estado apresenta uma geomorfologia diversa, marcada por vales profundos, extensas drenagens, escarpas abruptas e áreas de grande amplitude altimétrica em curtas distâncias no plano horizontal. Essas características representam um desafio adicional para a precisão dos MDEs, especialmente em escalas mais detalhadas.

Na escala 1:25.000 (Tabela 5) o MDE AW3D30 destacou-se como o mais preciso, com 88,14% dos vértices na Classe A, seguido pelo SRTM (84,79%), COP-30 (78,52%) e NASADEM (76,29%). Para (Souza *et al.*, 2019; Jair *et al.*, 2017; Cremon *et al.*, 2021) o desempenho reflete a capacidade do AW3D30 de capturar com maior fidelidade as variações abruptas de relevo, como escarpas e drenagens complexas, características comuns no estado. Em contrapartida, os modelos COP-30 e NASADEM apresentaram maior dispersão nas classes B e C, possivelmente devido a dificuldades em representar detalhadamente as mudanças topográficas em regiões de relevo acentuado.

Todos os modelos apresentaram melhoria na distribuição dos vértices para a Classe A, como esperado devido à generalização inherente à escala. O SRTM foi o mais consistente, com 97,76% dos vértices atendendo aos critérios da Classe A, seguido pelo NASADEM (92,84%), MDE COP-30 (92,17%) e AW3D30 (91,34%). Essa escala reduz a sensibilidade a mudanças topográficas rápidas, favorecendo modelos como o SRTM, que tende a representar bem formas mais amplas de relevo, típicas de áreas menos complexas.

Ao comparar os MDEs, observa-se que o AW3D30 é particularmente adequado para regiões de relevo acidentado, como aquelas com escarpas e drenagens profundas, características presentes em várias regiões do Estado, especialmente na Serra Geral. Já o SRTM demonstra alta consistência em ambas as escalas, sendo ideal para análises regionais que incluem tanto áreas de relevo mais suave, como os planaltos do centro-sul, quanto regiões mais complexas. O COP-30 e o NASADEM apresentaram desempenho intermediário, com o COP-30 levemente superior em captar as variações, embora com menor precisão em áreas de relevo abrupto.

A influência da geomorfologia do Rio Grande do Sul também evidencia o impacto da escala. Na escala 1:25.000, a maior dispersão entre as classes reflete a sensibilidade a mudanças topográficas bruscas e a dificuldade dos MDEs em representar com exatidão áreas com alta amplitude altimétrica em curtas distâncias. Já na escala 1:50.000, a generalização geométrica favorece uma maior conformidade, mesmo em áreas mais complexas.

De forma geral, os resultados destacam que todos os modelos apresentam qualidade elevada para representar a variada topografia do Rio Grande do Sul. A escolha do modelo ideal

depende do objetivo da análise: todos os MDEs são indicados para estudos detalhados em áreas de relevo complexo, contudo, o MDE COP-30 e NASADEM se mostra mais adequado para análises em maior escala, com alta consistência e confiabilidade.

Conclusão

Conclui-se que, para a área de estudo, os MDEs AW3D30 e SRTM apresentaram os menores valores de PEC/PCD em comparação aos dados dos MDEs NASADEM e COP-30. Esses resultados estão alinhados com a especificação técnica global do COP-30 (Airbus, 2020) e com a legislação federal que rege a cartografia digital no Brasil.

No Estado do Rio Grande do Sul, observou-se que as discrepâncias entre os dados do IBGE e os MDEs, em sua maioria, estão abaixo de 6 metros. Todos os MDEs apresentaram valores de RMSE abaixo de 2,5 metros, cumprindo, assim, os requisitos estabelecidos pelas normas brasileiras do PEC/PCD para cartas topográficas nas escalas 1:25.000, 1:50.000 e superiores.

Adicionalmente, foi identificado um viés altimétrico em razão da distribuição não homogênea das RRNN na área de estudo. Essa característica está associada à geomorfologia diversificada do Estado do Rio Grande do Sul, que inclui vales, escarpas e grandes variações de amplitude altimétrica em curtas distâncias horizontais.

Os resultados apresentados indicam que todos os MDEs avaliados são adequados para uso nas escalas abordadas. Contudo, para aplicações específicas e estudos futuros, a escolha do MDE mais compatível deve considerar as condições do relevo local e os requisitos do projeto. Esta pesquisa fornece subsídios para que os usuários possam tomar decisões informadas sobre qual modelo oferece a maior acurácia para cada tipo de aplicação no Estado do Rio Grande do Sul. Além disso, o procedimento descrito pode ser replicado em outras áreas com características semelhantes.

Por fim, visto que todos os MDEs passaram pelo crivo de parâmetros e definição de qualidade de acurácia posicional vertical, todavia, houver incerteza pelo usuário qual dos MDEs empregar, a pesquisa dá subsídio dentro das condições de cada relevo, a escolha daquele que obteve maior acurácia.

Referências

- AIRBUS. Copernicus Digital Elevation Model – Product Handbook. Airbus Defence and Space. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3eeoQtr>. Acesso em: 26 nov. 2024.
- ARAÚJO, P. V.; *et al.* Acurácia Vertical e Calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) para a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, Rio Grande do Norte. Brasil. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, 351 – 364. 2019. [DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_1_351_364](http://dx.doi.org/10.11137/2018_1_351_364)
- BRASIL. Decreto-lei no 89.817 de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Diário Oficial da União, Brasília, 1984.
- CREMON, Édipo H.; BETTIOL, G. M.; JUNIOR, J. P. M.; MACEDO, F. C.; RABELO, M. W. de O. Avaliação da altimetria do MDE COP-30 no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 74, n. 3, p. 536–546, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n3-60846. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/60846>. Acesso em: 2 dez. 2024.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Mapa geodiversidade do Brasil. Escala 1:2.500.000. Legenda expandida. Brasília: CPRM, 2006. 68 p.
- CPRM. Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010. 250 p.
- FARR, T. G., *et al.* **The Shuttle Radar Topography Mission**, Ser. Geophys., 45, RG2004. 2007. [doi:10.1029/2005RG000183](https://doi.org/10.1029/2005RG000183).
- GERENTE, J. Aplicação de variáveis geomorfométricas ao mapeamento de padrões de relevo na bacia do Rio Itajaí-Açu/SC. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018. Disponível em: <http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.26.03.12/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2024.
- GUTH, P. L.; *et al.* Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. **Remote Sens.** 2021, 13, 3581. <https://doi.org/10.3390/rs13183581>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. MAPGEO: Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal. Versão 1.0, Brasil: IBGE, 2022.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs>. Acesso em: 2 dez. 2024.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução da Presidência. RPR 01/2005. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_2015_sirgas2000.pdf Acesso em: 2 dez. 2024.

JAIR, A. O.; THAKER, T.; CHAURASIA, P. P.; SINGH, A. K. Vertical accuracy evaluation of SRTM-GL1, GDEM-V2, AW3D30 and CartoDEM-V3.1 of 30-m resolution with dual frequency GNSS for lower Tapi basin India. **Geocarto International**, v. 33, n. 11, p. 1237-1256, 2017. [DOI: 10.1080/10106049.2017.1343392](https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1343392).

MELLO, Y. R. de; SILVEIRA, C. T. da. Análise de Modelos Digitais de Elevação e geração de atributos topográficos para a região da Serra do Mar do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geografia Física**. V. 11, nº 06, 2029 – 2045, 2018.

MORAIS, J.; FARIA, T.; ELMIRO, M.; NERO, M.; SILVA, A.; NOBREGA, R. Altimetry assessment of Aster Gdem V2 and SRTM V3 Digital Elevation Models: a case study in urban area of Belo Horizonte, MG, Brazil. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 4, p. 654-668, 2017. [DOI: 10.1590/S1982-21702017000400043](https://doi.org/10.1590/S1982-21702017000400043).

MOURA, L. Z.; *et al.* Avaliação MG: da Acurácia Vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDES) nas bacias do Paranoá e São Bartolomeu. **Revista Brasileira de Cartografia**. n.66/01, p.1-14, 2019.

OLIVEIRA, Leonardo Castro de. Realizações do Sistema Geodésico Brasileiro associadas ao SAD 69: uma proposta metodológica de transformação. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 1998. [doi:10.11606/T.3.1998.tde-08112005-081539](https://doi.org/10.11606/T.3.1998.tde-08112005-081539)

PIKE, R.J. Geomorphometry: diversity in quantitative surface analysis. **Progress in Physical Geography**, v.24, n.1, p.1–20, 2000.

RIO GRANDE DO SUL, Estado. Fepam, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler. **Qualidade Ambiental**. Porto Alegre, 2012. Disponível em: http://ww3.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_jacui/jacui.asp. Acesso em: 15 ago. 2024.

SOUZA, M. R.; *et al.* Análise da Acurácia Altimétrica do Modelo Digital de Superfície ALOS AW3D30 para o Mato Grosso do Sul. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. ISSN: 0101-9759 and ISSN: 1982-3908, Vol. 42 - 3/2019. <http://www.anuario.igeo.ufrj.br>

TOUTIN, T. ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, n.7, p.1855-1875, 2008. [DOI:10.1080/01431160701408477](https://doi.org/10.1080/01431160701408477).

VALERIANO, M. M. **TOPODATA**: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72p. (INPE-15318- RPQ/818).

VIEL, J. A.; *et al.* Avaliação da Acurácia Vertical dos Modelos Digitais de Elevação SRTM, ALOS WORD 3D e ASTER GDEM: Um Estudo do Caso no Vale dos Vinhedos, RS – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**. V.13, n.05 (2020) 2255-2268. Disponível em: <http://www.periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>. Acesso em: 15 ago. 2024.