



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Avaliação da Acurácia Vertical de MDEs de Fonte Aberta na Região Amazônica a Partir de Dados LIDAR

Philippe Souza Simões¹, Ulisses Silva Guimarães², Carlos Rodrigo Tanajura Caldeira³

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Av. dos Astronautas, 1758 – Jardim da Granja – CEP 12227-010 – São José dos Campos – SP. E-mail: philipe.eca@gmail.com ²Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia – Centro de Coordenação Geral – SPO, Área 5, quadra 3, bloco K – CEP: 70610-200 – Brasília – DF. E-mail: ulisses.silva@sipam.gov.br ³Universidade Federal Rural da Amazônia – Campus Sede – Av. Presidente Tancredo Neves, 2501 – Terra Firme – CEP 66077-830 – Belém – PA. E-mail: caldeiract@gmail.com.

Artigo recebido em 19/10/2020 e aceito em 04/08/2021

RESUMO

Diversos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) derivados de sensores orbitais têm sido disponibilizados sem custo à usuários de todo o globo, e têm subsidiado estudos em geociências com informações topográficas em médias e pequenas escalas. Desse modo, é pertinente haver conhecimento por parte do usuário, dos erros verticais que compõem o dado ou produto, visto que nenhum deles está isento da presença de erros posicionais. O presente estudo tem o objetivo avaliar a acurácia vertical dos MDEs de fonte aberta SRTM Version 3.0 Global 1 Arc-Second (GL1), SRTM/X-SAR DEM, SRTM GL1 Alaska Satellite Facility (ASF) Up Sampled, TOPODATA, AW3D30 e ASTER GDEM 2, para a região de Belém-PA, tendo como referência a utilização de dados LIDAR. A avaliação se deu através do cálculo do estimador Root Mean Square Error (RMSE) bem como em termos de parâmetros independentes, sendo eles tendência e precisão, com o propósito de testar os erros verticais em relação ao Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Obteve-se o melhor RMSE para o MDE AW3D30, na ordem de 4,01 m, enquanto os demais MDEs testados, alcançaram RMSE entre 4,53 e 14,72 m, observando-se o ASTER GDEM 2 com pior desempenho. Ao aplicar o PEC-PCD, as escalas compatíveis foram entre 1:25.000 a 1:50.000, variando entre as categorias B, C e D. Ao considerar as tolerâncias da classe A, os MDEs SRTM/X-SAR DEM e TOPODATA apresentaram compatibilidade à escala 1:50.000, enquanto os demais MDEs às escalas 1:100.000 e 1:250.000.

Palavras-Chave: Modelos Digitais De Elevação. Acurácia Vertical. Controle De Qualidade.

Vertical Accuracy Assessment of Open Source DEMs to the Amazon Region

ABSTRACT

Several Digital Elevation Models (DEMs) derived from orbital sensors has been available for free to users around the world and supporting studies in geosciences with topographic information at small and medium scales. The user must know the vertical errors that make up the data or product. Thus, this paper purposes to assess the vertical accuracy of open source DEMs SRTM Version 3.0 Global 1 Arc-Second (GL1), SRTM/X-SAR DEM, SRTM GL1 Alaska Satellite Facility (ASF) Up Sampled, TOPODATA, AW3D30 e ASTER GDEM 2 to Belem's region, in Pará State, based on LIDAR data sets. The assessment took place calculating the Root Mean Square Error (RMSE) and calculating the independent parameters bias and precision following the Brazilian Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD). The AW3D30 DEM achieved RMSE equals to 4,01 m, the best ones, and the others achieved RMSE between 4,53 and 14,72 m, focusing at the worst RMSE to ASTER GDEM 2. When applying the PEC-PCD, the compatibles scales were between 1:25.000 and 1:50.000, varying between categories B, C and D. When considering the A class tolerances, the possible scales for SRTM/X-SAR DEM and TOPODATA were 1:50.000 while for the other DEMs were 1:100.000 and 1:250.000 scales.

KEYWORDS: Digital Elevation Models. Vertical Accuracy. Quality Control.

Introdução

Modelos Digitais de Elevação (MDEs) podem ser gerados a partir de técnicas em sensoriamento remoto, tais como a aplicação de métodos de correlação de imagens digitais estereoscópicas (baseada nos princípios da fotogrametria), *Rational Function Models* (RFMs), radargrametria e interferometria SAR (*Synthetic Aperture Radar*), ou por métodos que possuem coleta de dados em campo, a exemplo de processos topográficos clássicos e sistemas *Real-time Kinematic* (RTK), contudo, cada método de aquisição está associado à seu custo relativo, ordem de acurácia, resolução, velocidade de aquisição, requerimentos dos usuários finais, de pós-processamento e domínio de aplicação (Li et al., 2004; Nelson et al., 2009; Wilson, 2012; Schumann e Bates, 2020; Talchabhadel et al., 2021).

No escopo de MDEs de cobertura global, o WorldDEM™ obtido a partir da missão TerraSAR-X *add-on for Digital Elevation Measurement* (TanDEM-X), compõe o estado da arte, devido sua acurácia na ordem de 2;12 m para altimetria e planimetria respectivamente e aquisições entre 2010 e 2014 (Wessel et al., 2014; Airbus, 2019a; 2019b). Todavia, o WorldDEM™ em seu melhor *pixel spacing*, configura-se como um produto comercial.

Contudo, existem modelos de resolução moderada e de uso livre, tais como os obtidos por interferometria SAR (InSAR), da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e os obtidos a partir de pares estereoscópicos, como o *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS) *World 3D-30m* (AW3D30) e *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model* (ASTER GDEM), todos com erro altimétrico nominal da ordem de 5 à 15 m, que suportam demandas de mapeamento de usuários ao redor do globo (Farr et al., 2007; Tachikawa et al., 2011; Caglar et al., 2018; Gottwald et al., 2021).

Duas grandes iniciativas de mapeamento sistemático na Amazônia correspondem aos projetos RADAM (década de 1970) e Cartografia da Amazônia (ano de 2008). Os produtos do projeto RADAM consistem em mosaicos semicontrolados na escala 1:250.000 (CPRM, 2020). Com a proposta de suprimir o “vazio cartográfico” de cerca de 35% da Região Amazônica, que até então não dispunham de

cartografia em escala 1:100.000, lançou-se o projeto Cartografia da Amazônia, coordenado e executado por entidades vinculadas ao Governo Federal Brasileiro (CENSIPAM, 2020).

A cartografia altimétrica e planimétrica em grandes escalas do município de Belém, no Estado do Pará, por cerca de 16 anos esteve defasada temporalmente, com as principais produções cartográficas da região, realizadas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG), pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pela Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém (CODEM), para fins de gestão e planejamento municipal, no contexto do Cadastro Técnico Multifinalitário (CTM). A produção cartográfica mais recente para o município é datada de 2014, realizada para subsidiar o recadastramento imobiliário do município de Belém e possui caráter privado e comercial.

Atualmente, pode-se ter acesso de forma gratuita às cartas de Belém, produzidas em escala 1:50.000 e 1:250.000 pela DSG (datadas de 1977 e 1999, respectivamente) e também aos mapas temáticos e topográficos fornecidos pelo IBGE em escalas que variam entre 1:250.000 e 1:1.000.000.

Tais cartas têm como fonte, dados compilados e vetorização de imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM) e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+). Desse modo, observa-se dados em pequenas escalas e desatualizados, logo, é conveniente que usuários demandantes de produtos cartográficos atualizados e compatíveis à maiores escalas de mapeamento, busquem dados recentes obtidos por sensoriamento remoto orbital.

De acordo com Guimarães et al. (2018), o mapeamento de ambientes costeiros em regiões tropicais húmidas demanda a utilização de MDEs, sobretudo, os obtidos a partir de dados SAR. Contudo, em processos de mapeamento cartográfico que se utilizam de MDEs, é imperativo obter informações referentes às acurácias posicionais teóricas e efetivas dos dados que estão sendo utilizados, a partir da análise estatística das discrepâncias entre os dados de teste e os dados de referência, objetivando derivar produtos a partir de uma fonte confiável e com erros controlados (Polidori e El Hage, 2020).

No contexto Brasileiro, o Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984, estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas e distribuição dos erros para a cartografia nacional,

definindo o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), no qual 90% dos pontos observados devem possuir discrepância menor ou igual aos valores das coordenadas de referência (Brasil, 1984; DSG, 2016). Todavia, tal regimento não acompanhou a evolução tecnológica da produção cartográfica, assim, a DSG estabeleceu novos padrões de qualidade para distintos produtos cartográficos e definiu o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) (DSG, 2016).

O PEC-PCD configura-se como uma atualização do PEC. Os estudos que conduziram ao PEC-PCD são encontrados de forma detalhada na Especificação Técnica de Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG). É observado pela DSG (2016) que para que um PCD seja aceito como produto de referência do Sistema Cartográfico Nacional (SCN), o mesmo deve apresentar valores de Erro Padrão iguais ou melhores aos previstos no PEC-PCD.

Desse modo, o presente artigo busca investigar se os MDEs mais recentes são, também, mais acurados. Para isso, será avaliada a acurácia vertical dos MDEs de fonte aberta SRTM *Version 3.0 Global 1 Arc-Second* (GL1), SRTM/X-SAR DEM, SRTM GL1 *Alaska Satellite Facility* (ASF) *Up Sampled*, TOPODATA, AW3D30 *Version 2.1* e ASTER GDEM *Version 2* para o município de Belém-PA, à luz de Galo e Camargo (1994) e Congalton e Green (2009), no regimento do PEC-PCD e por meio do estimador *Root Mean Square Error* (RMSE).

Material e Métodos

Área de Estudo

Segundo a Prefeitura Municipal de Belém (PMB, 2020a), Belém possui uma extensão territorial de 1.059,46km² de área não contínua, contemplando 39 ilhas, 71 bairros, 14 bacias hidrográficas e 40% do território abaixo no nível no mar, além de ser classificada como capital brasileira com maior índice pluviométrico. Os estudos de Martorano et al. (1993), mostram que Belém encontra-se em uma zona com taxas médias de precipitação anual variando entre 2500 e 3000 mm.

De acordo com o último censo do IBGE (2010), a densidade demográfica do município de Belém é da ordem de 1.315,26 hab/km² e a população estimada em 1.492.745 pessoas no ano de 2019. Ainda de acordo com o IBGE, o PIB per capita no ano de 2017 foi igual a R\$ 20.821,46 e o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 0,746, no ano de 2010 (IBGE, 2020a).

Tendo como referência os setores costeiros da Zona Costeira Amazônica (ZCA) definidos por Zamboni e Nicolodi (2008) no Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil, observa-se o município de Belém presente no Setor Costeiro Continental Estuarino. Desse modo, sob risco de inundação médio à muito alto na região continental de Belém e seu entorno, influência de retrogradação da linha de costa na Ilha de Mosqueiro e amplitude de maré de 3,5 à 4,0 metros. A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo, juntamente com os *tiles* dos modelos testados.

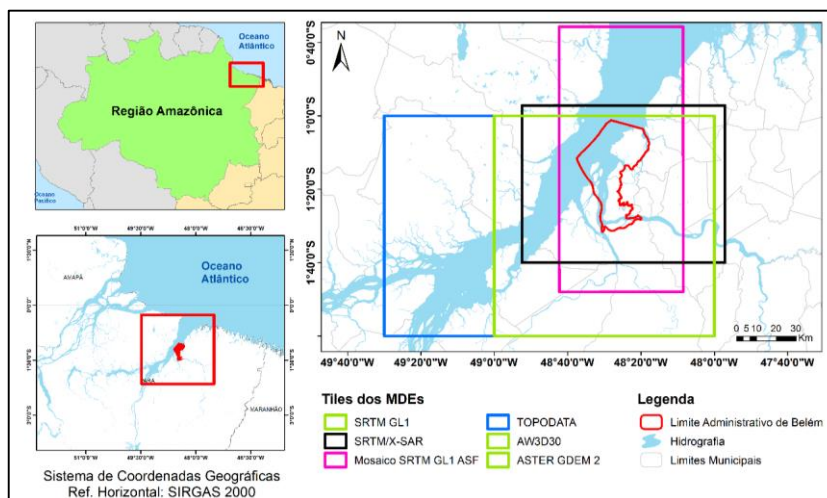


Figura 1. Localização da área de estudo. Por estar inserido na ZCA, destacam-se as ocorrências inerentes à dinâmica de ambientes costeiros, tal como a dinâmica sedimentar, colocada por Tessler e Goya (2005), regida pelos condicionantes oceanográficos: clima de ondas e regime de marés.

Esses condicionantes são respectivamente responsáveis pelos processos de erosão e modelagem da linha de costa, visto que o regime de marés apresenta relevância no transporte sedimentar em zonas costeiras. Relativamente aos dados topográficos oficiais do município de Belém,

observa-se que os mesmos possuem peculiaridades quanto à escala, frequência de atualização e área de cobertura. O Quadro 1 detalha as características dos dados cartográficos oficiais do município de Belém.

Quadro 1. Características da cartografia oficial de Belém.

Titular	Produto	Cobertura	Escala	Ano
DSG	Carta Topográfica	Folha: SA.22-X-III-3	1:50.000	1977
		Folha: SA.22-X-D	1:250.000	1999
IBGE	Carta Topográfica	Folha: SA.22-X-D	1:250.000	1987
	Mapas Temáticos	Folha: SA.22-X-D	1:250.000	2003
CODEM	Cartografia Digital da Área Urbana e Expansão Urbana	250Km ²	1:2.000	1998
			1:5.000	1998
		506Km ²	1:10.000	1998
	Planta Cartográfica	-	1:10.000	1998
	Cartografia Digital Planialtimétrica	250Km ²	1:1.000	2014
		258Km ²	1:5.000	2014

Fonte: CODEM (2014); DSG (2020); IBGE (2020b); PMB (2020b)

Conjunto de Dados

Os produtos de elevação usados neste estudo correspondem aos MDEs de SRTM Version 3.0 Global 1 Arc-Second (GL1), SRTM/X-SAR DEM, SRTM GL1 ASF Up Sampled, TOPODATA, AW3D30 e ASTER GDEM 2, que possuem em comum o livre acesso aos usuários. Os mesmos são apresentados no Quadro 2.

A missão SRTM foi desenvolvida pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), *German Aerospace Center* (DLR) e *Italian Space Agency* (ASI), que foi executada pelo ônibus espacial Endeavour no ano de 2000, que transportou SARs bi estáticos com capacidade de aquisição de dados na faixa das micro-ondas nas bandas C e X, para assim, a partir da técnica de interferometria SAR, gerar MDEs entre as latitudes 60° Norte e 56° Sul (Farr et al., 2007).

O radiometrically terrain-corrected (RTC) consistiu em um processo de correção geométrica e radiométrica das cenas obtidas pelo sensor *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR) em escala global, realizado pela ASF, a partir da utilização de distintos MDEs. O MDE utilizado para a correção de cenas que compreendem a maior parte do globo, incluindo a América do Sul, foi o SRTM GL1. O processo de correção do terreno, com base nos dados SRTM

juntamente com as imagens do sensor PALSAR, possibilitou obter como resultado um novo MDE derivado do SRTM, com resolução espacial de 12,5 m (ASF, 2015).

O TOPODATA consiste em um banco de dados topográfico concebido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com objetivo de prover variáveis geomorfométricas de todo o território brasileiro a partir do refinamento de dados SRTM-3 – resolução espacial de 3” – (Valeriano, 2008; Valeriano e Rossetti, 2012). O refinamento na resolução espacial é observado por Valeriano e Rossetti (2010) como sendo a modificação mais comum realizada pelos usuários. No tratamento dos dados de elevação, aplicou-se o método de krigagem a partir do modelo gaussiano de semivariograma, derivando um MDE na categoria de subproduto SRTM.

O AW3D30 configura-se como um *downgrade* do MDE ALOS World 3D (AW3D). O AW3D foi gerado utilizando técnicas de correlação de modelos estereoscópicos, através do uso de 3 milhões de cenas obtidas com o sensor PRISM, podendo representar a superfície terrestre tridimensionalmente com resolução espacial e acurácia vertical de aproximadamente 5 m, estabelecendo-se como o mais preciso MDE global da atualidade, contudo, não é uma versão de uso livre (Takaku et al., 2016; JAXA, 2020a).

O MDE ASTER GDEM *Version 2* é um produto gerado a partir de estéreo-pares de imagens coletadas pelo sensor ASTER, a bordo do satélite Terra. O produto o ASTER GDEM 2, é um MDE de escala global com cobertura de até $\pm 83^\circ$ de

latitude, incluindo o uso de cenas adicionais de cobertura, melhoramento na resolução espacial e na máscara de superfícies aquáticas (JPL, 2011).

Quadro 2. Características dos MDEs utilizados.

Características dos MDEs	SRTM GL1	SRTM/X-SAR	SRTM GL1 ASF	TOPODATA	AW3D30	ASTER GDEM 2
Projeção	Nenhuma	Nenhuma	UTM 22	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma
Resolução Espacial	1"	1"	12,5 m	1"	1"	1"
Resolução Vertical	1 m	1 m	1 m	1 m	1 m	1 m
Referência Horizontal	WGS-84	WGS-84	WGS-84	SIRGAS 2000	WGS-84	WGS-84
Referência Vertical	EGM96	WGS-84 Elipsoide	Altura Elipsoidal	EGM96	EGM96	EGM96
Formato de Dado	GeoTiff 16 bits	GeoTiff 16 bits	GeoTiff 16 bits	GeoTiff 16 bits	GeoTiff 16 bits	GeoTiff 16 bits
Técnica	InSAR	InSAR	InSAR	InSAR	Correlação de imagens	Correlação de imagens
Comprimento de Onda	5,6 cm	3,1 cm	5,6 cm	5,6 cm	0,52 – 0,77 μm	-
Ângulo de Visada	30°-58°	54.5°	30°-58°	30°-58°	Nadir; forward; backward	Nadir; e backward
Faixa de Imageamento	225 km	50 km	225 km	225 km	35 km – 70 km	60 km
Data de Aquisição	2000	2000	2000	2000	2006 – 2011	2000 – 2010
Erro Horizontal Absoluto	9,0 m	20 m	-	-	-	-
Erro Vertical Absoluto	6,2 m	16 m	-	-	5 m	15,1 m
Distribuído por	USGS	DLR	ASF VERTEX	INPE	JAXA	USGS

Fonte: DLR (2003); Farr et al. (2007); JPL (2011); ASF (2015); INPE (2018) e JAXA (2020b).

A análise exploratória dos erros dos MDEs listados, possui como dados de referência, uma malha de pontos cotados disponibilizados pela CODEM à esta pesquisa. Tais pontos são produtos que foram gerados a partir do perfilamento à laser aerotransportado, realizado por um sensor *Light Detection and Ranging* (LIDAR), ocorrido em 2014.

Dentre as etapas de processamento da nuvem de pontos obtidas pelo LIDAR, houve classificação automática e refinamento manual dos pontos, para que os mesmos correspondessem às cotas do terreno, bem como foi definido o Datum vertical e realizada a correção da ondulação geoidal local.

Quadro 3. Informes sobre os pontos de referência.

Técnica de Posicionamento	Pontos Cotados		
	LIDAR	Banda Espectral	Infravermelho Próximo
		Comprimento de Onda	1070 nm
		Taxa de Amostragem	400 KHz
Datum Horizontal	SIRGAS 2000	Sistema de Projeção	UTM 22
Datum Vertical	Imbituba		
Modelo de Ondulação Geoidal	MAPGEO2010		
RMSE	0,43 m		

Fonte: Aerocarta Engenharia de Aerolevantamentos (2019)

.Sistematização dos Dados

As etapas elementares desta pesquisa estão contidas na Figura 2, em sequência de dependência entre as elas. Os MDEs SRTM/X-SAR e SRTM GL1 ASE, por terem os valores de pixels referentes a altitudes elipsoidais, foram corrigidos ao modelo geoidal EGM96, para que os valores não mais correspondessem a altitudes elipsoidais, mas sim, as ortométricas, conforme os demais modelos testados. Todos os modelos foram reprojetados conjuntamente para o sistema SIRGAS 2000 UTM 22, estabelecendo assim, a padronização entre os referenciais horizontais e verticais dos MDEs.

Seleção Amostral

A seleção amostral foi fundamentada em Congalton e Green (2009) e nos estudos de Galo e Camargo (1994), nos quais, observa-se a exigência mínima de 20 pontos, bem distribuídos por todos

O Quadro 3 contém algumas das propriedades técnicas dos dados de referência, bem como informações pertinentes ao mapeamento realizado, tais como, o RMSE obtido na avaliação de acurácia posicional para validação do produto, banda espectral de operação do sensor, comprimento de onda da banda e taxa de amostragem.

Os dados correspondem à uma malha total de 36034 feições (pontos), divididas em três áreas de mapeamento, compreendendo partes das porções continental e insular do município de Belém.

os quadrantes da imagem para a aplicação dos testes estatísticos, pois, uma amostragem com número de pontos inferior a 20, não oferece respaldo estatístico válido. Portanto, foram amostrados em *software*, aleatoriamente, 40 pontos cotados a serem usados como pontos de referência, distantes no mínimo 2000 m entre si, de forma a se ter a melhor distribuição espacial possível entre eles, conforme a Figura 3. A partir dos pontos amostrados, extraiu-se em *software*, os valores dos pixels dos MDEs espacialmente homólogos aos pontos, obtendo 40 observações para cada um dos MDEs. Ratifica-se que os valores dos pixels nos MDEs correspondem aos valores de altimetria.

Avaliação Exploratória dos Erros

Utilizou-se o estimador RMSE para o cálculo da magnitude do erro/discrepância entre as coordenadas, visto que o RMSE é aceito mundialmente como o principal parâmetro de

avaliação da acurácia posicional de mapas. Considerando a alta acurácia dos dados de referência, – ordem centimétrica – utilizar-se-á do termo acurácia absoluta, para caracterizar os resultados alcançados através do estimador supracitado.

A acurácia vertical dos MDEs desta pesquisa também foi medida em termos de parâmetros independentes, sendo eles: tendência e precisão, indo ao encontro metodológico de Galo e Camargo (1994), para atestar a aderência dos erros dos dados ao PEC-PCD, pois de acordo com Monico et al. (2009), assim há viabilidade de discriminação entre os efeitos sistemáticos e aleatórios. Assim, pode-se classificar a aderência dos erros ao PEC-PCD. Portanto, foram calculadas inicialmente, as discrepâncias altimétricas (ΔZ) entre os pontos de referência e seus homólogos nos MDEs, conforme a Equação 1, para então, calcular os respectivos RMSE, conforme a Equação 2.

$$\Delta Z = Z_{MDE} - Z_{Ref} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta Z_i)^2}{n}} \quad (2)$$

Com base nas discrepâncias, realizou-se o teste de normalidade de Shapiro-Wilk à um nível de significância de 5%, observando quais conjuntos amostrais advêm de uma população com distribuição normal. Para a avaliação da acurácia em termos dos parâmetros independentes, seguiu-se a metodologia proposta por Galo e Camargo (1994), onde foram realizados os testes de hipóteses t-Student e Qui-quadrado, à um nível de significância de 10%.

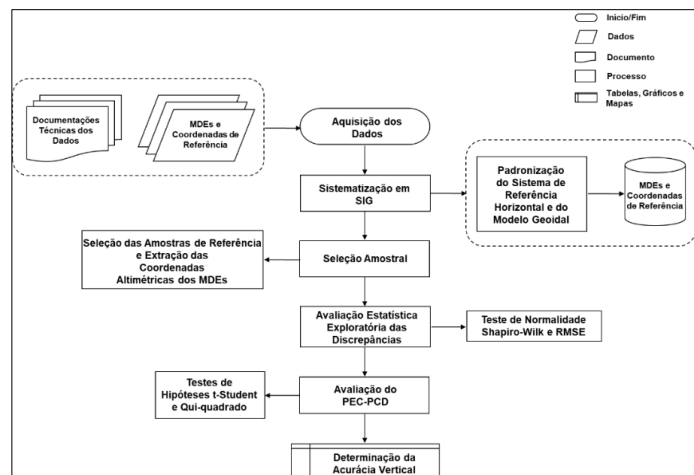


Figura 2. Fluxograma das etapas elementares da pesquisa.

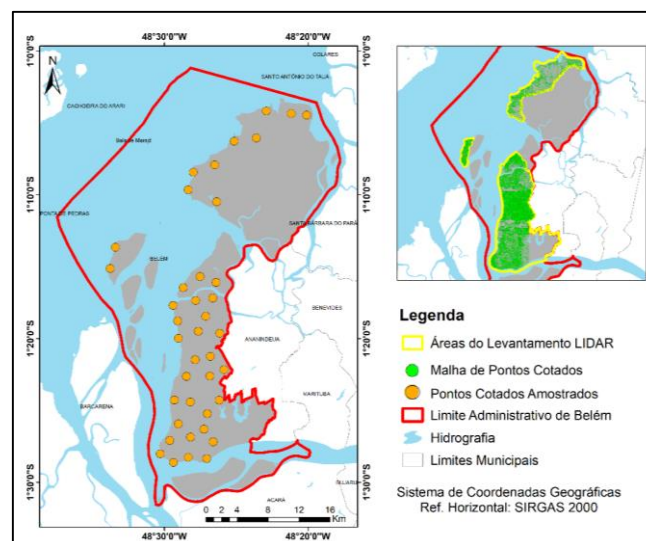


Figura 3. Distribuição espacial dos pontos cotados amostrados

Resultados e discussão

Normalidade e Acurácia Vertical Absoluta

No teste de normalidade, constatou-se que apenas dois, dos seis conjuntos amostrais, seguem distribuições normais, sendo eles os MDEs SRTM GL1 e SRTM GL1 ASF, que tiveram a hipótese nula do teste de Shapiro-Wilk aceita de acordo com o p-valor $> 0,05$, conforme a Tabela 1.

O resultado mostrou-se coerente, visto que o MDE SRTM GL1 ASF, como uma derivação, apresentou compatibilidade em relação ao seu proveniente, assim, obtendo aprovação no teste. Para os conjuntos amostrais cuja hipótese nula do teste de Shapiro-Wilk foi rejeitada, não há interferência significativa na validação cartográfica para o PEC-PCD pelo teste Qui-quadrado, visto que pelo número de amostras grande ($n > 30$), espera-se uma aproximação à distribuição normal, além disto, este padrão não exige que as discrepâncias sigam uma distribuição normal.

Szabó et al. (2015) obtiveram distribuições normais no teste de normalidade de Shapiro-Wilk, em um estudo similar na Hungria, ao analisar as discrepâncias em relação aos MDEs ASTER GDEM 2 e SRTM V3 (GL1). Oliveira (2011) obteve discrepâncias normais para MDEs provenientes do sensor TerraSAR-X (TSX), esta condição normal pode estar relacionada a amostragem *Global Navigation Satellite System* (GNSS) realizada apenas em áreas abertas.

A Tabela 2 apresenta as estatísticas das discrepâncias. Percebe-se um erro vertical em discrepância mais expressivo para o MDE ASTER GDEM 2, cujos valores de $\bar{\Delta Z}$ (média das discrepâncias) e $S_{\Delta Z}$ (desvio padrão das discrepâncias) correspondem a $10,27 \pm 10,68$ m, além do maior valor de RMSE, de 14,72 m. Em contra partida, o MDE AW3D30, também derivado de um sensor eletro-óptico, mostrou discrepâncias mais concentradas e mais próximas de 0, obtendo $\bar{\Delta Z}$ e $S_{\Delta Z}$ de $0,40 \pm 4,04$ m e o menor RMSE, de 4,01 m.

Tabela 1. Resultados obtidos nos testes de Shapiro-Wilk.

MDE	Estatística <i>W</i>	P-valor	Resultado
SRTM GL1	0,97	0,32	Passou
SRTM/X-SAR DEM	0,90	0,00	Falhou
SRTM GL1 ASF	0,97	0,44	Passou
TOPODATA	0,90	0,00	Falhou
AW3D30	0,86	0,00	Falhou
ASTER GDEM 2	0,87	0,00	Falhou

Tabela 2. Estatísticas das discrepâncias.

MDE	ΔZ_{min} (m)	ΔZ_{max} (m)	$\bar{\Delta Z}$ (m)	$S_{\Delta Z}$ (m)	RMSE (m)
SRTM GL1	-4,62	16,37	3,22	4,24	5,29
SRTM/X-SAR DEM	-3,05	15,12	2,51	3,82	4,53
SRTM GL1 ASF	-4,80	16,12	3,26	4,25	5,32
TOPODATA	-0,48	17,02	4,02	3,42	5,25
AW3D30	-8,49	17,37	0,40	4,04	4,01
ASTER GDEM 2	-8,61	50,91	10,27	10,68	14,72

A magnitude dos erros verticais obtidos na presente pesquisa para os modelos interferométricos SRTM providos do SAR de banda C, foi da ordem de 5 m. O MDE TOPODATA apresentou RMSE igual a 5,25 m, revelando seu melhor desempenho entre os dados derivados de SAR de banda C. O RMSE calculado

para o MDE SRTM GL1, foi igual a 5,29 m e seu derivado, o MDE SRTM GL1 ASF apresentou RMSE igual a 5,32 m. O MDE SRTM/X-SAR atingiu RMSE igual a 4,53 m, sendo este, o menor erro vertical absoluto dentre os MDEs interferométricos analisados. Tal resultado é pontual e deve-se, possivelmente, à localidade e

características da área de estudo, pois é sabido que à nível global, o MDE SRTM de banda C apresenta acurácia vertical absoluta inferior à 9 m, enquanto o de banda X, na ordem de 16 m (DLR, 2003; Farr et al., 2007).

Pode ser considerada nesta avaliação, a veracidade de que SARs de banda X, são capazes de oferecer resolução espacial ligeiramente

melhores em relação à sistemas SARs de banda C, bem como melhor relação sinal-ruído, conforme relatado por Farr et al. (2007), desse modo, interferindo diretamente nas medidas de fase que dão origem aos modelos. São mostrados na Figura 4, os erros verticais especializados em isolinhas sobre os MDEs, com equidistância de três metros.

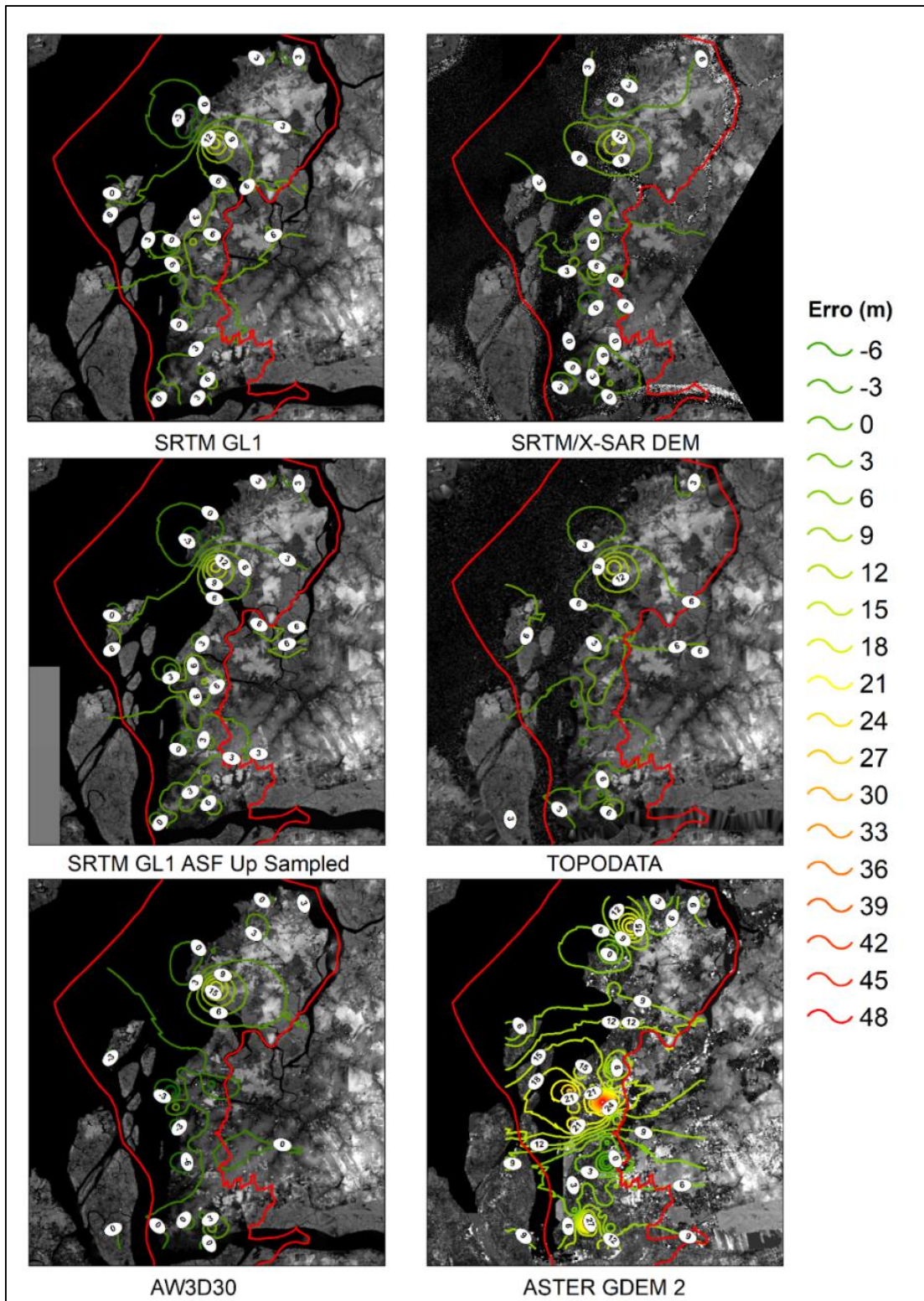


Figura 4. Espacialização dos erros verticais em isolinhas.

As discrepâncias em relação ao ASTER GDEM 2 geraram isolinhas de [-6;48] m, sendo este o maior intervalo obtido. Em relação aos MDEs derivados da missão SRTM, o intervalo obtido foi de [-3;15] m, com exceção do TOPODATA, que gerou isolinhas entre [0;15] m. Para o MDE AW3D30, o resultado foi semelhante, com isolinhas variando entre [-6;15] m. Os resultados mostram-se satisfatórios, pois estão de acordo com a literatura e comprovam a robustez da missão SRTM, que a partir de InSAR de passagem única, pôde gerar MDE confiável para aplicações regionais a continentais.

Tabela 4. Avaliação da acurácia vertical de MDEs de fonte aberta por diferentes autores.

O menor RMSE calculado foi para o MDE AW3D30, que atingiu um erro vertical absoluto de 4,01 m. Esse valor é condizente com o divulgado pela JAXA e os estudos de Tadono et al. (2016), que alcançaram RMSE na ordem de 4 m. O MDE com pior desempenho calculado, foi o ASTER GDEM 2, com valor equivalente ao reportado para regiões montanhosas e de densa cobertura vegetal, em ASTER GDEM 2 *Summary Of Validation Results*. A Tabela 4 apresenta resultados obtidos por autores nacionais e internacionais na avaliação de MDEs de fonte aberta

Autor	MDE	Dados de Referência	Ambiente Predominante	RMSE (m)	$\overline{\Delta Z}$ (m)
Rexer e Hirt (2014)	ASTER GDEM 2	Estações Gravimétricas	Floresta	8,85	
	SRTM CGIAR-CSI v4.1			6,12	
Moura et al. (2014)	TOPODATA	Dados Topográficos	Área Urbana		2,87
	ASTER GDEM 2				2,31
Szabó et al. (2015)	ASTER GDEM 2	Mapa topográfico	Floresta		-9,7
	SRTM V3				-6,7
Santillan et al. (2016)	AW3D30	Nivelamento Diferencial (z) e GPS (x,y)	Vegetação Densa	6,75	
Guimarães et al. (2018)	ASTER	GNSS	Costa Amazônica	10,3	
	AW3D30			4,8	
	SRTM			5,7	
Zhang et al. (2019)	ASTER GDEM 2	GPS; LIDAR	Ilha Montanhosa	8,44;4,24	
	AW3D30			2,08;4,91	
	SRTM			3,82;4,81	
Esta Pesquisa	SRTM GL1	LIDAR	Costa Amazônica	5,29	3,22
	SRTM X-SAR/DEM			4,53	2,51
	SRTM GL1 ASF			5,32	3,26
	TOPODATA			5,25	4,02
	AW3D30			4,01	0,40
	ASTER GDEM 2			14,72	10,27

Santillan et al. (2016), ao avaliarem a acurácia do AW3D30, atestaram que a densa cobertura vegetal é um causador de erro no cálculo RMSE, em comparação a áreas de cultivo e construções verticais. Estes autores calcularam RMSE igual 4,29 e 6,75 m ao considerarem pontos de controle localizados em áreas de construções verticais e de densa cobertura florestal, respectivamente. Ao determinarem o RMSE utilizando pontos de referência localizados nos ambientes já citados, conjuntamente com pontos em áreas arbustivas e de pasto, obtiveram RMSE igual a 5,68 m.

Em comparação a outros modelos testados, o melhor desempenho do AW3D30 se deve à alguns fatores inerentes ao sensor PRISM e a plataforma ALOS. Por exemplo, pode-se citar a boa resolução espacial do sensor PRISM, de 2.5 m, o extraordinário número de cenas utilizadas na geração do modelo, bem como a mais recente aquisição das mesmas. Estes dados possuem tratamento estatístico com filtragem de erros e várias passagens em um mesmo local. De acordo com Takaku et al. (2006), para a região da área de estudo, a taxa de recobrimento é da ordem 75%. Logo, possibilitando a seleção das melhores cenas para a confecção do produto, neste caso, o MDE, logo, elevando sua acurácia.

Para as regiões de clima tropical, incluindo a região de Belém, um dos fatores que pode interferir na acurácia final do MDEs como o AW3D30 (derivados de imagens ópticas), é a alta incidência de nuvens. As cenas obtidas entre 2006 e 2011 pelo sensor PRISM, incluem as cenas mais recentes entre os modelos aqui testados, assim podendo apresentar maior coerência com os dados de referência. Tal amostragem temporal, é fundamental na análise de ambientes que sofrem influência da dinâmica costeira.

Análise de Tendências

A análise de tendência remete a necessidade da observação dos dados testados em relação a ausência de erros sistemáticos. O emprego do teste de t-Student revelou que dos seis conjuntos amostrais analisados, cinco manifestaram a existência de viés significativo nas coordenadas testadas, ao nível de significância de 10%. Desse modo, conclui-se a existência de algum componente influenciando no erro. Os resultados das análises de tendência para cada conjunto amostral, encontram-se na Tabela 5.

A análise dos erros do MDE AW3D30 constatou mais uma vez os melhores resultados obtidos por este MDE. As discrepâncias mostraram-se livre de tendências significativas. Desse modo, em caso de validação cartográfica, o MDE AW3D30 poderia passar normalmente pelo teste de precisão sem que fosse cometido sobre ele, algum método de remoção dos componentes tendenciosos. Galo e Camargo (1994), sugerem que para fins de mitigação do efeito de tendência, pode-se remover o valor médio da discrepância (ΔZ), de cada coordenada observada.

Sendo este um trabalho de caráter investigativo, buscou-se não influenciar nos testes, portanto, não houve realização do procedimento de minimização de viés, abstendo-se de qualquer mascaramento sob os resultados. A tendência pode ser devida a diferença entre os referenciais altimétricos (EGM96 e Imbituba) e à comparação entre pontos que representam a modelagem do terreno e pontos que se referem à modelagem de superfície, pois, de acordo com Valeriano (2008), o segundo consiste em uma reprodução sujeita a uma série de diferenças em relação ao primeiro, tais como o efeito dossel, erros e a inerente representação simplificada (modelagem) da realidade física, em pixels.

Tabela 5. Resultados dos testes de t-Student.

MDE	IC	<i>t</i>	<i>t</i> _{amostral}	P-valor
SRTM GL1	2,09;4,35	1,68	4,80	0,00
SRTM/X-SAR DEM	1,49;3,53	1,68	4,16	0,00
SRTM GL1 ASF	2,13;4,40	1,68	4,85	0,00
TOPODATA	3,11;4,93	1,68	7,44	0,00
AW3D30	-0,68;1,47	1,68	0,62	0,54
ASTER GDEM 2	7,43;13,12	1,68	6,08	0,00

Análise da Precisão e PEC-PCD

Os conjuntos de discrepâncias apresentaram variâncias relativamente próximas,

desse modo, a realização do teste de Qui-quadrado para a qualificação da aderência apresentada por cada conjunto de discrepâncias em relação ao PEC-PCD, ficou submetida aos ICs também próximos.

Assim, a maior escala obtida foi de 1:25.000, com exceção para o MDE ASTER

GDEM 2. Na Tabela 6, são mostrados os resultados da estatística Qui-quadrado para o teste na escala 1:25.000, bem como os resultados alcançados quando se testou, qual seria a escala máxima de cada modelo considerando que a classe desejada fosse classe A do PEC-PCD.

Tabela 6. Análise da precisão em relação ao PEC-PCD.

MDE	IC	$\chi^2_{amostral}$	P-valor	Escala	Classe	Escala para Classe A
SRTM GL1	12,87;27,33	43,89	0,27	1:25.000	C	1:100.000
SRTM/X-SAR DEM	10,44;22,18	51,40	0,09	1:25.000	B	1:50.000
SRTM GL1 ASF	12,93;27,46	44,10	0,27	1:25.000	C	1:100.000
TOPODATA	8,34;17,71	41,05	0,38	1:25.000	B	1:50.000
AW3D30	11,66;24,76	39,76	0,44	1:25.000	C	1:100.000
ASTER GDEM 2	81,50;173,10	44,48	0,25	1:50.000	D	1:250.000

Ao testar a escala 1:25.000, os MDEs SRTM/X-SAR DEM e TOPODATA enquadraram-se na possibilidade de mapeamento classe B. Os demais MDEs, com exceção do ASTER GDEM 2, enquadraram-se na classe C do PEC-PCD. O MDE ASTER GDEM 2 adequou-se à classe D na escala 1:50.000. Ao realizar o teste que objetivou obter a melhor escala, para a melhor classe do PEC-PCD (classe A), o desempenho do MDE AW3D30, mostrou-se inferior aos MDEs SRTM/X-SAR DEM e TOPODATA, que por sua vez atingiram a escala de 1:50.000 para mapeamento classe A. O MDE ASTER GDEM 2 obteve a escala 1:250.000, para geração de derivados classe A. Os modelos SRTM GL1, SRTM GL1 ASF e AW3D30, podem derivar produtos classe A na escala 1:100.000, para condições topográficas semelhantes à da área de estudo analisada.

Os resultados apresentam coerência com a literatura, a exemplo de Moura et al. (2014), que no estudo da acurácia vertical dos MDEs TOPODATA e ASTER GDEM 2 em atendimento ao PEC-PCD, alcançaram dispersão equivalente às escalas 1:25.000 classe D e 1:50.000 classe B para o TOPODATA e 1:50.000 classe D e 1:100.000 classe B para o ASTER GDEM 2. Valeriano (2008) ressalta que o planejamento da aquisição de dados da missão SRTM objetivou suprir mapeamentos entre as escalas 1:100.000 e 1:250.000, desse modo, os resultados obtidos na presente pesquisa satisfizeram essa colocação.

Na produção de MDEs radargramétricos e interferométricos para mapeamento da ZCA, a partir de imagens dos sensores COSMO-SkyMed

(CSK) e TSX, Guimarães (2017) obteve precisão cartográfica classe A na escala 1:50.000 para os modelos radargramétricos CSK e TSX, ao utilizar o modelo de Toutin. As maiores escalas calculadas para os modelos radargramétricos foram 1:10.000 classe D, para o MDE radargramétrico CSK e 1:25.000 classe B para o TSX.

Guimarães (2017), ao realizar os experimentos de elaboração dos MDEs interferométricos, obteve resultados com desempenhos menos precisos, tendo seus melhores resultados de acurácia na ordem de escala 1:25.000 classe B para o MDE interferométrico CSK e 1:100.000 classe B para o MDE TSX.

Salienta-se que a partir dos experimentos supracitados, foi possível categorizar os elementos que denotam a dificuldade de mapeamento acurado dos ambientes costeiros amazônicos em grandes escalas, mesmo que sejam utilizados dados SAR no estado da arte e pontos de controle obtidos por levantamento geodésico com receptores GNSS de alta acurácia.

Conclusões

Com base na avaliação de acurácia vertical proposta, mediante a análise exploratória dos erros, foi possível identificar os MDEs de fonte aberta que oferecem dados mais acurados para a região de Belém, bem como, determinar de acordo com o regimento do SCN, as maiores escalas de mapeamento possíveis para tais MDEs, sobretudo, escalas adequadas ao mapeamento classe A do PEC-PCD.

Os resultados da avaliação exploratória dos erros dos MDEs em relação aos pontos de

referência, mostraram que quando analisados de forma absoluta, o modelo AW3D30 mostra-se mais acurado e adequado para a realização de estudos nesta região, com RMSE de 4,01 m. Os MDEs derivados da missão SRTM alcançaram acurácia absoluta equivalente entre si, na ordem de 5 m para produtos derivados do SAR banda C e de 4,53 m para o modelo derivado do SAR de banda X, e classificam-se como segundas opções para aplicação. Percebeu-se o maior erro vertical no ASTER GDEM 2 [14,72 m].

Ao considerar a confecção de produtos seguindo o regimento do PEC-PCD, os MDEs SRTM/X-SAR e TOPODATA, atestaram a possibilidade de mapeamento classe A na escala 1:50.000, dando a observância de que se deve aplicar um modelo geoidal ao SRTM/X-SAR, para a devida conversão em altitudes ortométricas. Para os MDEs SRTM GL1, SRTM GL1 ASF *Up Sampled* e AW3D30, determinou-se a viabilidade de mapeamento classe A na escala 1:100.000. Dentre a gama de MDEs disponibilizados gratuitamente, com base na literatura e na presente pesquisa, pouco recomenda-se a utilização do ASTER GDEM 2, nesta área de estudo, haja vista que o mesmo possibilita mapeamento classe A somente na escala 1:250.000 ou menores e que outros MDEs globais, que também sendo de fonte aberta, oferecem desempenho concretamente superior.

As instituições de produção cartográfica, tais como IBGE e DSG, não avaliam sistematicamente os dados de origem das suas produções, sequer realizam atualizações frequentes dos produtos, a exemplo da defasagem dos dados cartográficos de Belém. A comum indisponibilidade de malhas de dados altimétricos gratuitos de alta precisão, tais como os fornecidos por topografia clássica, posicionamento GNSS ou LIDAR, faz com que muitos usuários recorram aos dados gratuitos de sensoriamento remoto orbital, como única opção de fontes de dados altimétricos para suas aplicações.

Na ausência de fonte de dados que ofereçam acurácia superior às fornecidas por dados obtidos por sensoriamento remoto orbital, o conhecimento da época de imageamento, da acurácia posicional e dos fatores de erros desses dados, podem subsidiar aplicações mais coerentes e controle de erros. O desenvolvimento de pesquisas de caráter investigativo, voltadas ao entendimento e esclarecimento da acurácia de produtos cartográficos, conforme colocado por Galo e Camargo (1994), deve ser difundida, visto que, com base no desenvolvimento tecnológico, a participação de não especialistas em produção

cartográfica, resultam na geração de informações cartográficas sem a devida preocupação no que diz respeito à acurácia posicional das mesmas.

Nesta pesquisa, constatou-se que para a região de Belém, uma metrópole situada em ambiente costeiro continental estuarino que sofreu rápida expansão urbana, os MDEs derivados da missão SRTM, ou seja, os mais antigos (aquisição de dados em 2000), não alcançaram a melhor acurácia posicional, visto que, tal expansão encadeou o incremento de grandes construções e outros elementos não naturais à paisagem, desse modo, caracterizando uma fonte de erro.

É relevante a produção de MDEs mais acurados (escalas maiores do que 1:50.000) e frequente atualização (a cada 2 anos) no suporte dos estudos na região de Belém e ZCA como um todo, com compatibilidade dos usuários aos atributos dos dados a serem utilizados em suas máximas capacidades de mapeamento para com o nível de precisão da técnica empregada, objetivando a fiel representação e derivação de produtos da área a ser estudada.

Outro fator que deve ser entendido para a aplicação de MDEs derivados de sensores orbitais, consiste no modelo geopotencial (ou geoidal) à qual o modelo a ser utilizado está associado. Notou-se que a maior parte dos modelos desta pesquisa encontrava-se associados ao referencial vertical global e desatualizado, EGM96. Atualmente, os principais modelos geoidais são o EGM2008 à nível global e o MAPGEO2015, no Brasil. Para fins que almejam boa acurácia vertical, deve-se observar se a utilização de um modelo geoidal mais antigo ou menos recomendado para área de estudo à qual o MDE será aplicado, não causará interferências significativas na análise.

Ressalta-se o bom desempenho dos MDEs de fonte aberta testados, bem como o aumento da disponibilidade dos mesmos. Destaque ao AW3D30, que se mostra equivalente ao AW3D em termos de acurácia vertical, e à técnica de geração a partir de modelos estereoscópicos com múltiplas aquisições.

Deve-se destacar também os MDEs derivados da missão SRTM, que mostraram a solidez da missão e da técnica InSAR, através das suas altas capacidades de mapeamento. Por fim, este estudo comprova a necessidade de contínua produção e atualização cartográfica, com critérios de qualidade posicional para diversas áreas e aplicações.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CODEM, pela cessão dos dados referentes à hipsometria do município de Belém, bem como à Aerocarta Engenharia de Aerolevantamentos, pelos esclarecimentos concedidos a respeito das informações técnicas dos dados hipsométricos do município de Belém.

Referências

- AIRBUS, 2020. Site. Disponível: <https://www.intelligence-airbusds.com/elevation-models/>. Acesso: 23 set. 2020. (A)
- AIRBUS, 2020. WorldDEM™ - A New Era of Global Elevation - Information. Digital Surface Model, Digital Terrain Model. Airbus Defence and Space Intelligence. Disponível: https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r51492_9_2019-04_worlddem_technicalspecs_version2.5_i1.0.pdf. Acesso: 13 set. 2020. (B)
- ASF - Alaska Satellite Facility, 2015. Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR Products. Disponível em: https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rtc_product_guide_v1.2.pdf. Acesso em: 01 jul. de 2020.
- BRASIL. Diário Oficial da União, 1984. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Brasília - DF.
- Caglar, B., Becek, K., Mekik, C., Ozendi, M., 2018. On the vertical accuracy of the ALOS world 3D-30m digital elevation model. Remote Sensing Letters 9(6), 607-615.
- CENSIPAM - Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia, 2020. Site. Disponível: <http://www.sipam.gov.br/noticias/noticias-sobre-cartografia/a-cartografia-na-amazonia>. Acesso: 01 jul. 2020.
- Congalton, R.G., Green, K., 2009. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 183.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2020. Site. Disponível: <http://www.cprm.gov.br/publique/Geologia/Sensoriamento-Remoto-e-Geofisica/RADAM-D-628.html>. Acesso: 01 set. 2020.
- DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2003. Site. Disponível: https://www.dlr.de/eoc/en/Portaldata/60/Resources/dokumente/7_sat_miss/srtm_products_en.pdf. Acesso: 01 ago. 2020.
- DSG - Diretoria de Serviço Geográfico, 2016. Norma da especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre (ET ADGV Defesa F Ter). 2ª Edição. Brasília, 2016.
- DSG - Diretoria de Serviço Geográfico, 2020. Site. Disponível: <http://www.geoportal.eb.mil.br/index.php?view=article&id=169>. Acesso: 10 jun. 2020.
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D., 2007. The shuttle radar topography mission-rg 2004. Reviews of Geophysics 45(2).
- Galo, M., Camargo, P.D.O., 1994. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário 1, 41-48.
- Gottwald, M., Kenkmann, T., Reimold, W., Fritz, T., Breit, H., 2021. The TanDEM-X digital elevation model and terrestrial impact structures. IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing 14, 4128-4138.
- Guimarães, U.S. análise dos modelos digitais de superfície gerados por interferometria e radargrametria no estudo de ambientes costeiros amazônicos. Tese de doutoramento. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas, Presidente Prudente, SP, 2017. 189.
- Guimarães, U.S., Narvaes, I.D.S., Galo, M.D.L.B.T., da Silva, A.D.Q., Camargo, P.D.O., 2018. Radargrammetric approaches to the flat relief of the amazon coast using COSMO-SkyMed and TerraSAR-X datasets. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 145, 284-296.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. Cidades. Disponível: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso: 20 ago. 2020. (A)
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. Mapas. Disponível: <https://mapas.ibge.gov.br>. Acesso: 20 ago. 2020. (B)
- JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency, 2020. Site. Disponível: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/prism.htm>. Acesso: 01 ago. 2020 (B).

- JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency, 2020. Site. Disponível: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>. Acesso: 01 ago. 2020 (A).
- JPL - Jet Propulsion Laboratory, 2011. Site. Disponível: http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf. Acesso: 01 ago. 2020.
- Li, Z., Zhu, C., Gold, C., 2004. Digital terrain modeling: principles and methodology. CRC press, 340.
- Martorano, L.G., Nechet, D., Pereira, L.C., 1993. Tipologia climática do Estado do Pará: adaptação do método de Köppen. Boletim de Geografia Teórica 23, 45-46.
- Monico, J.F.G., Dal Poz, A.P., Galo, M., Dos Santos, M.C., De Oliveira, L.C., 2009. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. Boletim de Ciências Geodésicas 15(3), 469-483.
- Moura, L.Z., Bias, E.D.S., Brites, R. (2014). Avaliação da acurácia vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) nas bacias do Paranoá e São Bartolomeu. Revista Brasileira de Cartografia 66(1), 1-14.
- Nelson, A., Reuter, H.I., Gessler, P., 2009. DEM production methods and sources. Developments in soil science 33, 65-85.
- Oliveira, C.G. Avaliação da Informação Planialtimétrica Derivada de Dados RADARSAT-2 e TerraSAR-X Para Produção de Cartas Topográficas na Escala 1:50.000. Tese de doutoramento. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, São José dos Campos, 2011, 178.
- PMB - Prefeitura Municipal de Belém, 2020. Portal da transparência. Disponível: http://www.belem.pa.gov.br/transparencia/?page_id=1360. Acesso: 10 ago. 2020. (A)
- PMB - Prefeitura Municipal de Belém, 2020. Site. Disponível: <http://www.belem.pa.gov.br/app/c2ms/v/?id=18&conteudo=3205>. Acesso: 15 ago. 2020. (B)
- Polidori, L., El Hage, M., 2020. Digital elevation model quality assessment methods: a critical review. Remote Sensing 12, 3522, 1-36.
- Rexer, M., Hirt, C., 2014. Comparison of free high resolution digital elevation data sets (ASTER GDEM2, SRTM v2. 1/v4. 1) and validation against accurate heights from the Australian National Gravity Database. Australian Journal of Earth Sciences 61(2), 213-226.
- Santillan, J.R., Makinano-Santillan, M., Makinano, R.M., 2016. Vertical accuracy assessment of ALOS World 3D-30M Digital Elevation Model over northeastern Mindanao, Philippines. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 5374-5377.
- Schumann, G. J.-P., Bates, P.D., 2020. Editorial: The need for a high-accuracy, open-access global digital elevation model. Frontiers in Earth Science 8, 1-2.
- Szabó, G., Singh, S.K., Szabó, S., 2015. Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM databases. Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C, 83, 137-145.
- Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., Iwasaki, A., 2011. Characteristics of ASTER GDEM version 2. IEEE international geoscience and remote sensing symposium, 3657-3660.
- Tadono, T., Nagai, H., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., Iwamoto, H., 2016. Generation of the 30 M-mesh global digital surface model by ALOS PRISM. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences 41, 157-162.
- Takaku, J., Tadono, T., Tsutsui, K., Ichikawa, M., 2016. Validation of "AW3D" global DSM generated from Alos Prism. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 3, 25.
- Talchabhadel, R., Nakagawa, H., Kawaike, K., Yamanoi, K., Thapa, B.R., 2021. Assessment of vertical accuracy of open source 30m resolution space-borne digital elevation models. Geomatics, Natural Hazards and Risk 12, 1, 939-960.
- Tessler, M.G., Goya, S.C., 2005. Processos costeiros condicionantes do litoral brasileiro. Revista do Departamento de Geografia 17, 11-23.
- Valeriano, M.D.M., 2008. Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 72.
- Valeriano, M.M.; Rossetti, D.F, 2012. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. Applied Geography 32, 300-309.
- Valeriano, M.M.; Rossetti, D.F. TOPODATA, 2010. Seleção de Coeficientes Geoestatísticos Para o Refinamento Unificado de Dados SRTM. INPE, São José dos Campos, 74.
- Wessel, B., Gruber, A., Huber, M., Breunig, M., Wagenbrenner, S., Wendleder, A., Roth, A., 2014. Validation of the absolute height accuracy of TanDEM-X DEM for moderate terrain. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 3394-3397.

- Wilson, J.P., 2012. Digital terrain modeling. *Geomorphology* 137(1), 107-121.
- Zamboni, A., Nicolodi, J.L., 2008. Macrodiagnóstico da zona costeira e marinha do Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. Brasília. DF, Brasil.
- Zhang, K., Gann, D., Ross, M., Robertson, Q., Sarmiento, J., Santana, S., Rhome, J., Fritz, C., 2019. Accuracy assessment of ASTER, SRTM, ALOS, and TDX DEMs for Hispaniola and implications for mapping vulnerability to coastal flooding. *Remote Sens. Environment* 225, 290–306.