

Análise de acurácia altimétrica para dados ALOS PALSAR e ASTER GDEM para o município do Recife-PE

RESUMO

Modelagens geomorfológicas da superfície terrestre tem se beneficiado do aprimoramento das geotecnologias, a exemplo do Modelo Digital de Elevação (MDE) derivado dos dados remotos por proporcionarem uma disponibilidade de informações altimétricas com cobertura em nível global. Entretanto, tais vantagens são expressas pelo grau de qualidade dos dados. O objetivo deste estudo foi analisar a acurácia altimétrica dos MDEs derivados dos dados ALOS PALSAR (RTC) e o ASTER (GDEM) Versão 3 para o mapeamento de uso do solo do município de Recife-PE, por meio da normativa de Precisão Cartográfica para produtos digitais (PEC-PCD), nas escalas de 1:250.000; 1:50.000 e 1:100.000. A metodologia consistiu em analisar as discrepâncias entre os MDEs e as altitudes ortométricas fornecidas por pontos de referência do Sistema Geodésico Brasileiro. Os dados foram testados por meio do RMSE e regressões lineares baseadas no R^2 e RMS. Como resultado, o ALOS PALSAR apresentou menores valores de RMSE e desvio padrão, indicando que apresenta maior acurácia em relação ao ASTER. As áreas urbanas apresentaram variações de discrepância média entre 0,1 e 3m para os dados ALOS PALSAR enquanto o ASTER foram entre 6 e 8 m, porém em áreas de vegetação densa, ambos os dados apresentaram discrepâncias acima de 10 m.

PALAVRAS-CHAVE: SAR. Superfície. Modelo Digital de Elevação.

Juarez Antônio da Silva Júnior

juarez.silvajunior@ufpe.br

orcid.org/0000-0002-2898-0309

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil.

Ubiratan Joaquim da Silva Júnior

ubiratan.joaquim@ufpe.br

orcid.org/0000-0001-7995-6416

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil.

Admilson da Penha Pacheco

admilson.pacheco@ufpe.br

orcid.org/0000-0002-3635-827X

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil.

Alan Gabriel Araújo dos Santos

alan.gabriel@ufpe.br

orcid.org/0000-0002-1330-0374

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil.

INTRODUÇÃO

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é atualmente um conjunto de dados comum em pesquisas que buscam informações altimétricas para as mais diversas aplicações. Frequentemente são gerados a partir de: dados aerotransportados, drones, scanners a laser e sensoriamento remoto por satélite (TAPETE, 2021).

Com o rápido desenvolvimento das técnicas de sensoriamento remoto por satélite, os MDEs tornaram-se amplamente disponíveis (DENG *et al.* 2019), proporcionando maiores oportunidades de mapeamentos altimétricos para grandes áreas de cobertura da superfície terrestre, além de agregar possibilidades em regiões em que vértices de Redes de Referências de Nível não estão presentes. A exemplo dos modelos derivados dos dados ALOS PALSAR e ASTER GDEM v2, devido à cobertura espacial global, acesso gratuito e disponibilidade de compartilhamento em nuvem. Entretanto, os MDEs derivados de dados remotos contêm propagações de erros devido aos métodos de coleta e processamento das imagens origem. Esses erros quando não são investigados e minimizados podem comprometer a integridade de dados aos experimentos (GROHMANN, 2018).

A qualidade do dado altimétrico derivado de um MDE está relacionada a três fatores principais: o tipo de equipamento e sua configuração para aquisição de imagem, as características topográficas da área e o processamento de dados brutos (FISHER; TATE, 2006; NUTH; KÄÄB, 2011).

A relação entre a resolução do MDE e a precisão adequada para a escala de mapeamento, tem sido um tópico de pesquisa na última década (BRAUN *et al.*, 2021; SZYPUŁA *et al.*, 2019). Na literatura diversos estudos avaliaram a precisão vertical dos produtos ASTER GDEM e ALOS PALSAR, sendo um lugar comum na comunidade geocientífica para auxiliar na análise topográfica em uma ampla variedade de disciplinas (GONZÁLEZ-MORADAS; VIVEEN, 2020). A exemplo de Bettiol *et al.* (2021), Grohmann (2018), Florinsky, Skrypitsyna e Luschikova (2018) que avaliaram a precisão vertical do ALOS PALSAR e Abrams *et al.* (2020) que avaliaram sob critérios similares o ASTER.

No Brasil, a precisão dos MDEs derivados de Sensoriamento Remoto é validada por meio da normativa de Padrão de Precisão Cartográfica para produtos cartográficos digitais (PEC-PCD), em que a avaliação se dá por meio o RMSE do MDE em relação ao dado de referência, em oito escalas de avaliação: 1: 1000, 1: 2000, 1: 5000, 1: 10.000, 1: 25.000, 1: 50.000, 1: 100.000 e 1: 250.000 e quatro classes qualitativas: A, B, C e D. Entretanto, a maioria dos estudos que utilizam o critério brasileiro PEC-PCD são conduzidos levando-se em consideração áreas relativamente pequenas, com condições específicas do local em termos de topografia e uso do solo. Neste contexto, são necessárias avaliações regionais (por exemplo, na escala dos biomas) dos MDEs existentes para incluir uma gama mais ampla de condições da paisagem (BETTIOL *et al.* 2021).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a conformidade altimétrica e a precisão dos MDEs ALOS PALSAR e ASTER com os dados de altitude de diferentes bases de referência, localizadas no município do Recife. Esses MDE'S foram selecionados por estarem disponíveis gratuitamente em escala global, amplamente utilizados pela comunidade científica.

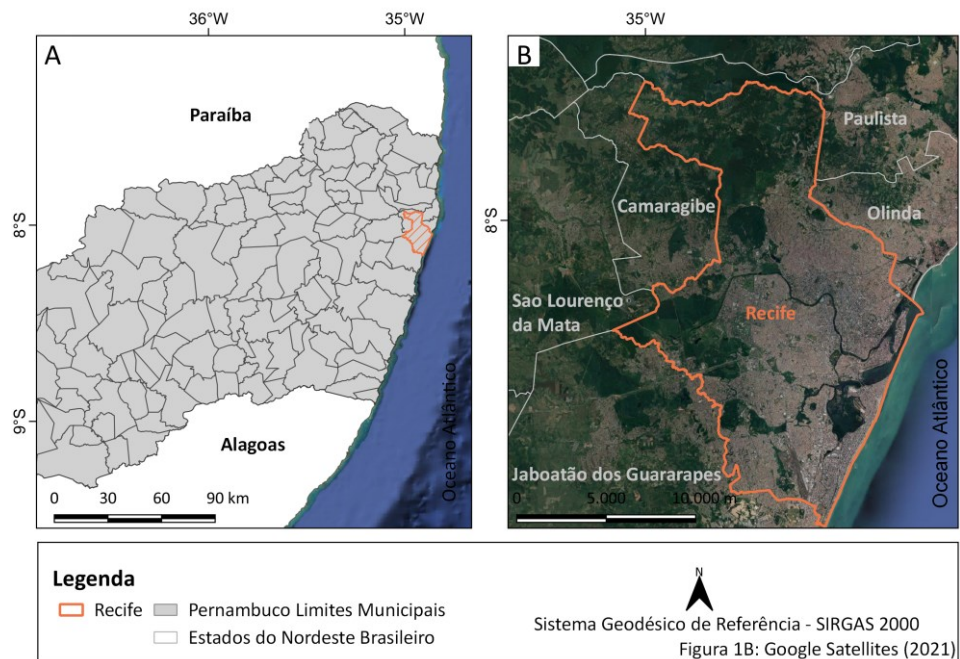
MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo escolhida para o desenvolvimento metodológico da pesquisa foi a cidade do Recife, município do estado de Pernambuco, inserido no Nordeste brasileiro. Inserida no litoral brasileiro, Recife está situada na latitude $8^{\circ} 03' 14''$ S e na longitude $34^{\circ} 52' 51''$ O.

O Recife é uma MetrÓpole de nível regional, os bairros centrais possuem um pesado tráfego de veículos, altos índices de pavimentação do solo e de construções verticais e pouca arborização (NÓBREGA; VITAL, 2010). A figura 1 apresenta a área de estudo. (A) – Área de estudo inserida na Região Nordeste Brasileira. (B) Destaque para a cidade e municípios circunvizinhos representados por meio de uma imagem orbital georreferenciada.

Figura 1 – Área de Estudo. (A) Recife inserido no Nordeste brasileiro. (B) Representação da área de estudo e municípios vizinhos por meio de imagem de satélite



Fonte: Autoria própria, Google Earth (2021).

O relevo se assenta numa planície aluvional flúvio-marinha – composta de ilhas, penínsulas, alagados e mangues, envolvidos por braços de rios, com a altitude média é de apenas 4 metros acima do nível do mar, compreendendo uma área de 218 km² (SANTOS, 2018). Sua área territorial é composta de 67,43% de morros, 23,26% de planícies, 9,31% de áreas alagadas e 5,58% de Zonas Especiais de Preservação Ambiental (ZEPA) (PREFEITURA DO RECIFE, 2021).

DADOS ALTIMÉTRICOS ORBITAIS

ALOS PALSAR

O produto altimétrico ALOS PALSAR com Correção Radiométrica do Terreno (RTC) é um projeto da *Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)*, cujos dados são pré-processados pela *Alaska Satellite Facility (ASF)* disponibilizando imagens resolução espacial de 12,5 m, no formato Geotiff. O projeto corrige a geometria e a radiometria dos dados altimétricos obtidos por meio do sistema Radar de Abertura Sintética (SAR) oriundos do *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* e *National Elevation Dataset (NED)*, esses dados encontram-se vinculados ao geoportal da *Alaska Satellite Facility (UAF/NASA)* com altitudes ortométricas referenciadas ao modelo geoidal EGM96. O MDE derivado dos dados ALOS PALSAR foi baseado na técnica interferométrica de radar de abertura sintética inserida no processamento de dados geodésicos e MDE's já existentes (JAXA, 2020).

ASTER

O ASTER é um dos cinco instrumentos a bordo da espaçonave Terra da NASA (lançada em 1999) e foi construído no Japão para o Ministério da Economia, Comércio e Indústria (METI). Dada sua alta resolução e sua capacidade de alterar os ângulos de visão, o ASTER produz imagens estereoscópicas e modelos detalhados de altura do terreno ASTER GDEM. O primeiro ASTER GDEM foi lançado em 2009, com a Versão 2 sendo lançada em 2011. O ASTER GDEM Versão 3 mantém o formato GeoTIFF e a mesma estrutura de grade e mosaico das versões anteriores, com resolução espacial de 30 metros e mosaicos de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. O ASTER GDEM cobre superfícies terrestres entre $83^{\circ}N$ e $83^{\circ}S$ e foi produzido através do processamento automatizado de 2,3 milhões de cenas do arquivo ASTER, a nível global com uma resolução espacial de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 metros) (GONZÁLEZ-MORADAS; VIVEEN, 2020).

Dados Altimétricos de Referência

A Rede de Referência de Nível (RRNN), foi composta por vértices de referência geodésica obtidos por meio de três fontes de dados materializados e georreferenciados segundo a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE): Rede Altimétrica Brasileira de domínio do IBGE, Rede de Referência Cadastral do Recife, e pontos altimétricos derivados do mapeamento realizado pelo Projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D) do Governo do Estado de Pernambuco.

Rede Altimétrica Brasileira (IBGE)

A Rede Altimétrica brasileira é formada por um conjunto de estações geodésicas, denominadas referências de nível (RRNN), que materializam a componente altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), a partir de medições de nivelamento geométrico de alta precisão (IBGE, 2021). Destas estações oitenta e seis vértices de Referências de Nível (RRNN), integraram o conjunto de dados desta pesquisa.

As RNs da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) obtidas pelo Banco de Dados Geodésicos (BDG) utilizadas neste estudo, foram filtradas baseada na somente na seleção das RNs produzidas pelo IBGE por levantamentos GNSS garantindo maior conformidade planialtimétrica para uma adequada utilização e

integridade das informações para a realização das análises. As RNs foram obtidas com a informação de altitudes normais e foram convertidas em altitudes ortométricas utilizando o modelo hgeoHNOR2020 disponível para cálculo online em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/>. O hgeoHNOR2020 fornece fatores para conversão entre altitudes geométricas referidas ao SIRGAS2000 e altitudes normais compatíveis com o Reajustamento Altimétrico REALT2018 (IBGE, 2018).

Vértices da Rede de Referência Cadastral da cidade do Recife

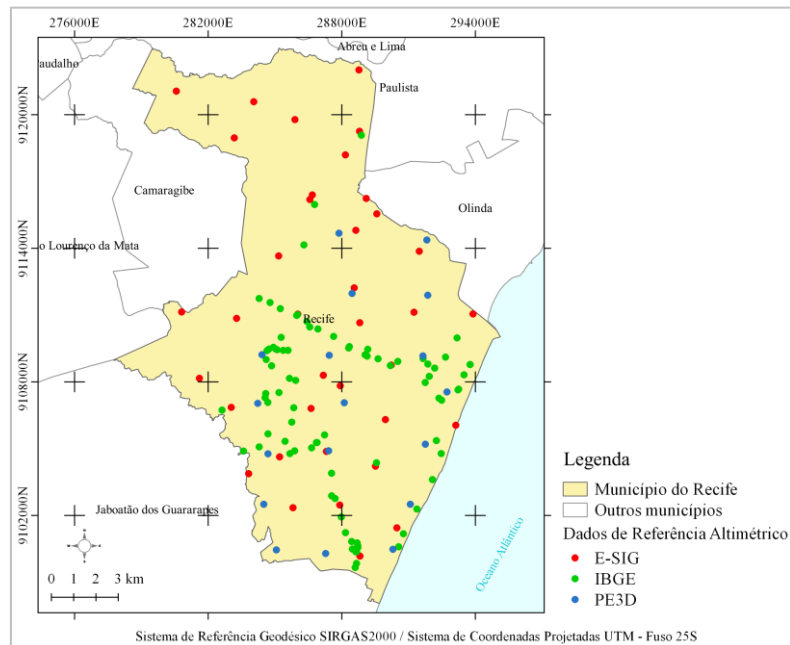
O município de Recife possui uma rede de marcos geodésicos, georreferenciados ao SGB, cuja materialização seguiu as recomendações previstas em nas normativas federais fornecidas pelo IBGE. Deste foram utilizados trinta e oito marcos da Rede de Referência Cadastral do Recife, obtido pela plataforma ESIG (Informações Geográficas do Recife).

Vértices de Referência do Projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D)

Foi realizado de forma aleatória a seleção dos pontos de referência por meio das folhas do MDE do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) disponibilizado em <http://www.pe3d.pe.gov.br/>. Esse mapeamento realizado por meio da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE), realizou uma varredura a laser do terreno que permitiu obter com rapidez e qualidade as informações altimétricas para elaboração dos projetos das barragens de controle de cheias, além de desenvolver sistema de prevenção e alerta de inundações em todo o estado de Pernambuco.

Todos os produtos do PE3D passaram por três etapas de validação: Análise de Completude, Análise de Consistência e Análise Estatística da Precisão Planialtimétrica e atendem ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), referente à Classe A nas escalas 1:5.000 e 1:1.000. O produto MDE estão referenciados no Sistema de Coordenadas Projetadas UTM SIRGAS 2000, nos fusos 24S ou 25S e possui precisão altimétrica de 27cm. A Figura 2, mostra a distribuição espacial dos vértices altimétricos de referência na área de estudo.

Figura 2 - Distribuição dos vértices de Referência na área de Estudo



Padrão brasileiro de Precisão Posicional

O Decreto-Lei nº 8.9817 de 1984 (BRASIL, 1984) detalha o padrão brasileiro de precisão posicional para dados cartográficos analógicos (PEC) e, com adaptações para o PEC-PCD (para produtos cartográficos digitais), constituiu o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e tolerâncias de erro padrão (EP) adaptadas de acordo com as três escalas de avaliação (1: 25.000, 1: 50.000, 1: 100.000) e as classes correspondentes A (melhor precisão), B, C e D (pior precisão).

Em 2010, o Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG) publicou o documento intitulado Especificações das Técnicas de Aquisição de Dados Geospaciais Vetoriais (ET-ADGV) (DSG, 2016). Em 2016, foi publicada a Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geospaciais (ET-CQDG) (DSG, 2016) para fornecer uma forma padronizada de avaliação da qualidade dos conjuntos de dados geospaciais que fazem parte do Sistema Cartográfico Nacional Brasileiro. Tanto as especificações técnicas ET-ADGV como ET-CQDG são complementares ao Decreto-Lei n.º 89817, que tem poder regulamentar. Em outras palavras, um dado espacial, para ser classificado em uma determinada escala e classe, precisa considerar as seguintes condições (BRASIL, 1984, SANTOS *et al.* 2016).

Noventa por cento dos pontos de amostragem em um produto cartográfico devem apresentar valores de discrepâncias posicionais iguais ou menores que o valor de tolerância PEC ($1,6449 * EP$) da escala e classe testada, quando comparados com os dados verdadeiros correspondentes. O RMSE das discrepâncias posicionais deve ser igual ou inferior à tolerância EP definida para cada escala e classe.

A Tabela 1 mostra as tolerâncias de erro em medidores do PEC-PCD, discriminadas pelas classes A, B, C e D. Mostra também as tolerâncias de EP, que está relacionada ao RMSE, das discrepâncias posicionais dos pontos analisados em relação aos pontos de referência (DSG, 2016).

Tabela 1 - Padrão de precisão cartográfica altimétrica de modelos digitais de elevação (MDE's) para a elaboração de produtos cartográficos digitais definidos para oito escalas diferentes e para as classes A, B, C e D

PEC - PCD	1:25000		1:50000		1:100000	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	2,7	1,67	5,5	3,33	13,7	8,33
B	5	3,33	10	6,66	25	16,66
C	6	4	12	8	30	20
D	7,5	5	15	10	37,5	25

Fonte: DSG (2016).

Para avaliar as precisões posicionais altimétricas de acordo com o Decreto 8.9817 (1984), as discrepâncias posicionais foram calculadas com base nas diferenças entre as coordenadas dos pontos homólogos extraídos dos MDEs de teste (ALOS e ASTER) e dos dados de referência. Posteriormente, seguindo a norma técnica brasileira, as acurácias posicionais altimétricas foram avaliadas separadamente, seguido com as análises dos erros em relação às diferentes classes de uso do solo e as classes de declividade. As análises foram baseadas obtenção direta no valor do pixel em todos os dados avaliados.

RESULTADOS E DISCURSÕES

A avaliação do PEC-PCD foi realizada em duas etapas. Primeiramente, o RMSE foi calculado para cada MDE a fim de compará-los ao EP em função da escala. Os RMSEs gerais dos modelos foram 5,42 e 11,54 para ALOS PALSAR e ASTER, respectivamente como mostra a tabela 2.

Tabela 2 – Porcentagem de pontos e o RMS que apresentaram discrepâncias inferiores ao Padrão de Precisão Cartográfica (PEC) (m)

ET-CQDG	Classe	%d(H) < PEC		RMS < EP		Resultado	
		ALOS	ASTER	ALOS	ASTER	ALOS	ASTER
1:25000	A	67,586	8,966	Falhou	Falhou	Reprovado	Reprovado
	B	84,138	20	Falhou	Falhou	Reprovado	Reprovado
	C	88,276	28,276	Falhou	Falhou	Reprovado	Reprovado
	D	92,414	35,862	Falhou	Falhou	Reprovado	Reprovado
1:50000	A	86,207	22,069	Falhou	Falhou	Reprovado	Reprovado
	B	95,172	50,345	Passou	Falhou	Aprovado	Reprovado
	C	96,552	66,207	Passou	Falhou	Aprovado	Reprovado
	D	98,621	81,379	Passou	Falhou	Aprovado	Reprovado
1:100000	A	97,931	73,793	Passou	Falhou	Aprovado	Reprovado
	B	99,310	98,621	Passou	Passou	Aprovado	Aprovado
	C	99,310	100	Passou	Passou	Aprovado	Aprovado
	D	99,310	100	Passou	Passou	Aprovado	Aprovado

Fonte: Autoria própria (2021).

Para a escala 1:25.000, em ambos os MDE's, não atenderam à precisão, dessa forma, foram classificados como inadequados para o seu uso nessas escalas.

Na escala de 1:25000 e classe D apesar dos ALOS PALSAR apresentar 90% das discrepâncias inferiores ao valor do PEC-PCD, falha na análise do EP, já que o RMSE (5,42 m) é um pouco maior que o EP (5 m).

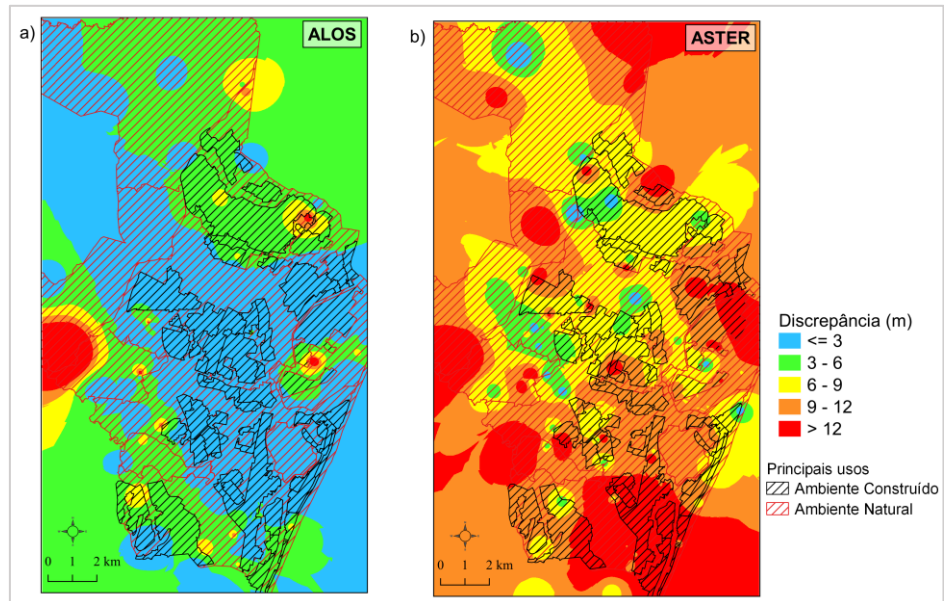
O EP para a escala 1: 50000 e classe A é 5,5 m e para a classe B é 6,66 m para o ALOS PALSAR. De acordo com este critério, não atende a escala 1: 50.000 e classe A, porém atende para as classes B, C e D, divergindo com o ASTER, que não atende em nenhuma das classes. O ALOS PALSAR atende a todas as classificações na escala 1:100.000. Já o ASTER é desqualificado na escala de 1:100.000, classe A porém atende as classes B, C e D. Ou seja, ambos os MDEs, segundo o PEC-PCD/classe B, C e D podem ser utilizados para a escala 1:100.000.

Os resultados encontrados para o ASTER são compatíveis com o indicado por Lang e Welch (1999) e Morais (2017). Os autores relatam que os dados ASTER são adequados para mapeamentos nas escalas de 1: 100.000 e 1:250.000 e, em alguns casos, na escala de 1:50.000. Viel *et al.* (2020) avaliaram o PEC-PCD do ALOS PALSAR e ASTER numa área de estudo localizado no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, onde observou que todos os modelos com resolução espacial de 30m, se adequavam à escala 1: 50.000, classe D e não se adequavam nas classes A, B e C para escalas superiores, embora o ASTER mostrou-se mais preciso com 93,65% dos pontos aprovados segundo PEC-PCD no estado de São Paulo (FEREIRA, 2014). De acordo com Bendib (2021), o ALOS atingiu um PEC-PCD de 1: 25.000, classe C, em uma área de estudo localizada no município de Formoso-MG, enquanto para o Estado do Mato Grosso do Sul, os dados ALOS adequaram na PEC-PCD classe A para a escala de 1: 50.000 em estudos de Teixeira *et al.* (2015) relativas a planimetria. Em estudos de Simões (2019), que no estudo da acurácia vertical dos MDE's ALOS PALSAR e ASTER em atendimento ao PEC-PCD, alcançaram uma conformidade significativa equivalente às escalas 1:100.000 e 1:250.000 ambas para Classe A, respectivamente, no município de Belém, no estado do Pará.

O melhor desempenho de dados ALOS PALSAR foi documentado por estudos anteriores. Em contraste com os resultados encontrados, Julzarika *et al.* (2020) mostrou que ALOS PALSAR DEM pode se usados para mapear nas escalas de 1: 10.000 e 1: 25.000, na ilha de Roti, Indonésia. Acharya *et al.* (2018) avaliaram SRTM DEM e ALOS DSM usando Lidar DEM 30 m em Chuncheon, Coréia. O ALOS DSM superou o SRTM DEM quando comparado ao LiDAR DTM, com valores RMSE de 12,232 m e 16,843 m, respectivamente. Enquanto o PALSAR DEM 12,5 m relatou o menor RMSE geral de 4,57 m quando comparados a vários MDE's baseados em SAR (SHAWKY *et al.* 2019).

A figura 3 mostra a distribuição espacial dos erros entre os dados ALOS PALSAR e ASTER e os dados altimétricos de referência em conformidade com as Zonas de Ambiente Construído e Natural, definido pelo Plano Diretor do Município de Recife (RECIFE, 1996).

Figura 3 – Distribuição espacial da discrepância de altitudes (Hmodelo – Href) interpoladas em relação as zonas de Ambiente Construído e Natural do município do Recife



É possível observar claramente que as discrepâncias para os dados obtidos pelo ALOS PALSAR foram ligeiramente menores, onde grande parte da área é formada por classes de dispersões abaixo de 6 m, enquanto para o ASTER, 77% dos erros concentram-se por valores acima de 9 m. As discrepâncias obtidas para os dados ASTER, mostraram padrões pontuais na parte central e bastante dispersos entre si. Já para o ALOS PALSAR, as classes de discrepâncias apresentaram padrões de erros espacialmente mais compacto, com 85% das discrepâncias concentradas abaixo de 6 m, embora tenha havido um pico significativo no setor leste com dispersões acima de 12m.

Nas áreas de Ambiente Natural situados no setor norte, para ambos os dados separadamente, apresentaram classes baixas de discrepância, embora no setor oeste, como mencionado anteriormente, apresentaram uma discrepância significativa (>12m). Na área de Ambiente Construído na porção central, os dados ALOS PALSAR apresentaram discrepâncias de 0-3m e o ASTER de 0 – 9m. No setor sul e leste, onde há um mosaico de zonas de Ambiente Construído e Natural, ambos os dados apresentaram classes distintas entre si, com dispersões relativamente baixas para o ALOS PALSAR e altas para o ASTER.

No geral, os MDE's superestimaram as verdadeiras elevações, independentemente dos tipos de cobertura do solo. Essas superestimações eram esperadas, uma vez que o ALOS e o ASTER são sistemas bastante sensíveis a variações do tipo de cobertura do solo, por isso, alguns autores atribuem esses MDEs como MDSs. (TADONO *et al.* 2014; GESCH *et al.* 2012).

Resumidamente, a magnitude dos erros discrepantes para os diferentes tipos de cobertura do solo não diferiu visualmente, o que pode estar relacionado às afirmações de Uemaa, Ahi, Montibeller, Muru e Kmoch (2020), onde mostraram que as características da vegetação (densidade, altura) pode causar um viés positivo (ou seja, superestimação da elevação real), enquanto González-Moradas e Viveen (2020) descobriram que os edifícios podem afetar severamente o desempenho dos MDE's principalmente para os dados ASTER. Já Simões (2019), avaliou a acurácia do ALOS PALSAR e atestou que a densa cobertura vegetal causa

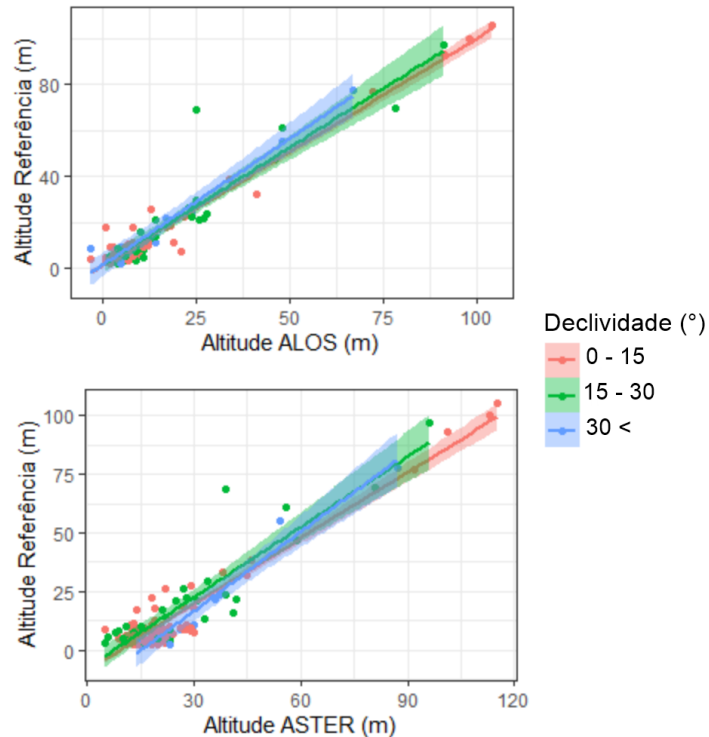
maior incremento de erro ao valor do RMSE, em comparação a áreas de cultivo e construções verticais. Estes autores atingiram RMSE igual 4,29 e 6,75 ao considerarem pontos de controle localizados em áreas de construções verticais e de densa cobertura florestal, respectivamente. Por fim, Moraes (2017) relata que os erros encontrados para os dados ASTER e ALOS PALSAR podem estar relacionados à heterogeneidade de elementos existente nesse tipo de cobertura; prédios menores que a resolução do pixel da imagem, influenciam de forma negativa o valor da média dos elementos contidos na área desse pixel (MORAES, 2017).

A distribuição espacial dos erros mostradas na figura 2 mostram as menores discrepâncias para o ALOS em quase toda área de estudo quando comparado os erros espacializados pelo ASTER. Estes resultados podem estar relacionados ao poder de penetração aumenta de acordo com o comprimento de onda dos dados SAR utilizados no processamento RTC do ALOS PALSAR. O sinal espectral SAR tem maior sensibilidade à penetração da vegetação e com isso aumenta a precisão vertical nessas áreas (ARABAMERI *et al.* 2019; RABBY *et al.* 2020; FERREIRA *et al.* 2021). No entanto, neste estudo, como a altura da vegetação não foi fixada, a precisão esperada nestas áreas não pôde ser detectada, devido à correlação temporal. Dessa forma, os erros encontrados para as classes de Ambiente Natural e Ambiente Construído, neste estudo, está relacionado a variabilidade da cobertura do solo. Ou seja, a elevação medida em áreas abertas será a altura do solo, enquanto as elevações medidas em áreas com vegetação serão o topo do dossel (CHU, 2017; KARABÖRK *et al.* 2021).

Portanto, a inclusão de mapas de cobertura do solo no uso de produtos de MDE é necessária para quantificar o erro e a incerteza na modelagem da superfície terrestre. Embora é importante ressaltar que as amostras de espaço localizadas em encostas, podem influenciar os resultados obtidos na avaliação quanto aos tipos de cobertura do solo como relatado em Ludwig e Schneider (2006).

Com a finalidade de avaliar a sensibilidade dos erros altimétricos para os dados ALOS PALSAR e ASTER conforme o intervalo de declividades, uma análise de Regressão Linear simples (Figura 4) foi implementada, com base no Coeficiente de Determinação (R^2) e o Erro Quadrático Médio (RMS) (Tabela 3).

Figura 4. Regressões lineares simples com os intervalos de confiança entre as altitudes obtidas pelos MDE'S ALOS PALSAR e ASTER e os dados altimétricos de referência em relação as classes de declividade. Todas as regressões lineares foram significativas para $p < 0,05$, teste t de Student)



Observa-se na tabela 3 no geral, os valores absolutos do RMSE variaram proporcionalmente dentro de cada faixa de declividade, obtendo coeficientes de determinação significativo (R^2) mais baixos com o aumento da declividade. Além disso, em ambos os dados, não houve visualmente variação significativa nos intervalos de confiança (Figura 3). Para a classe de declividade de 0 – 15°, ambos os produtos apresentaram alto Coeficiente de Determinação ($R^2 > 0,9$) e menores estimativas de RMS em relação as outras classes. Já para a declividade entre 0,15 – 0,3, houve um aumento de RMS, com destaque para o ASTER, chegando a uma estimativa de 3,12, ligeiramente alta em relação aos ALOS de 1,3. Além disso, houve diminuição dos valores de R^2 , para ambos os dados, porém o ALOS apresentou uma maior estimativa.

Tabela 3. Regressões linear simples com os intervalos de confiança entre as declividades obtidas pelos MDE'S ALOS PALSAR e ASTER foram significativas para $p < 0,05$, t de Student)

Declividades (°)	ALOS		ASTER	
	R^2	RMS	R^2	RMS
0 - 15	0,96	0,98	0,91	2,71
15 - 30	0,75	1,3	0,68	3,12
30 <	0,58	1,63	0,45	3,55

Fonte: Autoria própria (2021).

As regressões obtidas serviram de base para estimar os erros nas diferentes declividades. Os resultados foram consistentes com outras pesquisas, onde

mostraram que os maiores erros, ocorrem preferencialmente em regiões montanhosas, com declividades acima de 30° (ORLANDI *et al.* 2019; GOROKHOVICH e VOUSTIANIOUK, 2006; REXER e HIRT, 2014).

As melhores estimativas de RMS e R² para o ALOS PALSAR (Tabela 3) demonstram a vantagem do MDE de resolução espacial abaixo de 30m em representar os detalhes do terreno, especialmente para os casos em que a topografia não é plana. Dessa forma, o ALOS PALSAR forneceu o MDE mais robusto e preciso para todas as classes de declividade, o que se alinha com estudos anteriores que descobriram que o RMS vertical se concentra abaixo de 5 m em áreas planas e aumenta até 12 m em áreas com relevo mais complexo (UUEMAA *et al.* 2020). Resumidamente, a maior precisão do ALOS PALSAR pode ser interpretada pelo processamento de MDE's radiometricamente e geometricamente corrigidos, como detalhado em (LAURENCELLE *et al.* 2015; ALASKA, 2015).

O ASTER apresentou os piores resultados de aderência com os dados de referência, com destaque para as classes superiores a 15° (R² < 0,7). E conseqüentemente apresentou a maior incerteza (alto RMSE) em relação aos resultados encontrados para o ALOS. Os resultados para o ASTER somam-se às muitas literaturas relatando a baixa precisão deste MDE (por exemplo, (Nikolakopoulos *et al.* 2020, Suwandana e Makinano-Santillana, 2016; Athmania e Achour, 2014). Segundo estudos de Lakshmi e Yarrakula (2019) e Rosario González-Moradas (2020), o ASTER inclui artefatos que são provavelmente devido à cobertura de nuvens, incompatibilidades entre diferentes cenas e técnicas de processamento, que é sua principal deficiência. Outro fator, como mencionado anteriormente, pode estar relacionado devido a sua resolução espacial, que causa alta variação de erro devido à incapacidade do MDE de capturar a variação dentro de 1 pixel equivalente a 900m². Ou seja, a elevação pode mudar significativamente em encostas íngremes dentro de uma distância horizontal de 30 m. Fujisada *et al.* (2005) ressaltam que o ASTER GDEM v3 usa uma técnica de visualização estéreo de imagens ópticas de satélite, o que geralmente é inferior às técnicas interferométricas de radar tradicionais. Em contrapartida, uma vantagem do sistema estéreo ASTER é a capacidade de gerar produtos de dados MDE sem consultar os pontos de controle para cenas individuais, uma vez que este sistema possibilita o ajustamento com as efemérides da espaçonave e os parâmetros do instrumento (FUJISADA *et al.* 2005).

Em síntese, este estudo mostrou que os MDE's de acesso aberto obtidos por par estéreo, apresentam maior desempenho em relação a dados gerados por SAR. O ALOS PALSAR, operacionalmente derivados de MDE's na banda L, detectou resultados de alta eficiência com valores de precisão aceitáveis (aplicáveis) para as escalas de 1:50000 e 1:100000 no município do Recife com base no PEC-PCD. Em relação á declividade, o maior nível de precisão, conforme esperado, foi observado na área plana onde o grau de declividade foi moderado, e a menor precisão foi encontrada na área montanhosa onde o grau de declividade foi alto.

CONCLUSÕES

A precisão vertical do ASTER GDEM Versão 3 e modelo de elevação ALOS PALSAR foi testada no presente estudo para o município do Recife-PE. A validação foi realizada com base em três dados de referência altimétrico, tais foram, O Conjunto de (RRNN's) de altitudes normais componente altimétrica do Sistema

Geodésico Brasileiro, altitudes retiradas das folhas topográficas de alta resolução do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) e as altitudes dos marcos que compõem a Rede de Referência cadastral do Recife. Os MDE's foram avaliados com base no PEC-PCD, e parâmetros ambientais e geomorfológicos como o tipo de cobertura do solo e a declividade. Uma vez que esses parâmetros podem ser elementos-chave em qualquer processo de determinação da qualidade de um DEM. O problema com esses elementos é a ambiguidade em suas localizações.

Com base nos resultados obtidos pelo PEC-PCD, os dados do ALOS PALSAR apresentam melhor qualidade altimétrica, onde atende a escala 1:50000 e classe B (erro de tolerância de 6,66 m), e escala 1: 100.000 e classe A (erro de tolerância de 8,33 m). O ASTER atendeu a escala 1:50000 e classe D (erro de tolerância de 10 m), e escala 1: 100.000 e classe B (erro de tolerância de 16,66 m).

O modelo ASTER foi o menos preciso e teve a maior incerteza em todas as áreas de estudo, condições topográficas e tipos de cobertura do solo. Embora, a inclinação é o fator mais importante que afeta a precisão do DEM. O menor RMS nos valores de elevação foi detectado em áreas planas (declive $<15^\circ$), e o RMS aumentou com o aumento da inclinação, aumentando assim a variação dos erros.

Vale salientar que apesar do maior desempenho do ALOS PALSAR, este dado possui expressiva presença de pixels sem dados (*nodata*) em regiões litorâneas, o que pode inviabilizar sua aplicação, principalmente quando necessita-se de dados para mapeamentos na escala superiores a 1:50000, quando técnicas de interpolação espacial podem não ser suficientes para sanar esses erros.

É interessante a adaptação desta metodologia em outras regiões que tenham características ambientais e morfológicas diferentes uma vez que o município de Recife possui dinâmica territorial bastante peculiar. Portanto é de suma importância para análises mais profundas dos MDEs aqui avaliados.

Altimetric accuracy analysis for ALOS PALSAR and ASTER GDEM data for the municipality of Recife-PE

ABSTRACT

Geomorphological modeling of the Earth's surface has benefited from the improvement of geotechnologies, such as the Digital Elevation Model (DEM) derived from remote sensing because it provides the availability of altimetric information with global coverage. However, such advantages are expressed by the degree of data quality. The objective of this study was to analyze the altimetric accuracy of the SDMs derived from ALOS PALSAR (RTC) and ASTER (GDEM) Version 3 sensors for land use mapping of the Recife-PE municipality, through the Cartographic Accuracy Standard for Digital Products (PEC-PCD), at scales of 1:250,000; 1:50,000 and 1:100,000. The methodology consisted in analyzing the discrepancies between the MDEs and the orthometric altitudes provided by reference points of the Brazilian Geodetic System. The data were tested by means of RMSE and linear regressions based on R^2 and RMS. As a result, ALOS PALSAR presented lower RMSE and standard deviation values, indicating that it presents higher accuracy than ASTER. Urban areas showed average discrepancy ranges between 0.1 and 3 m for ALOS PALSAR data while ASTER was between 6 and 8 m, but in areas of dense vegetation, both sensors showed discrepancies above 10 m.

KEYWORDS: Digital Elevation Model. PEC-PCD. Remote Sensors. Recife.

REFERÊNCIAS

ABRAMS, M.; CRIPPEN, R.; FUJISADA, H. ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD). **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 1156, abr. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12071156>.

ACHARYA, T.D., YANG, I.T.; LEE, D.H. 2018. Comparative analysis of digital elevation models between AW3D30, SRTM30 and airborne LiDAR. **Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography**, v. 36, n.1, p.17-24. <https://doi.org/10.7848/KSGPC.2018.36.1.17>

ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF). **ASF Radiometric Terrain Corrected Products—Algorithm Theoretical Basis Document**; 2015. Disponível em:<https://asf.alaska.edu/wpcontent/uploads/2019/03/rtc_atbd_v1.2_final.pdf>. Acessos em 15 nov de 2021.

ARABAMERI, A.; PRADHAN, B.; REZAEI, K.; LEE, C. Assessment of Landslide Susceptibility Using Statistical- and Artificial Intelligence-based FR–RF Integrated Model and Multiresolution DEMs. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 11, n. 9, p. 999, abr. 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11090999>.

ATHMANIA, D.; ACHOUR, H. External validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI- SRTM v4.1 free access digital elevation models (DEMs) in Tunisia and Algeria. **Remote Sensing**, v.6, p. 4600-4620, 2014. <https://doi.org/10.3390/rs6054600>

ATHMANIA, D.; ACHOUR, H. External Validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI- SRTM v4.1 Free Access Digital Elevation Models (DEMs) in Tunisia and Algeria. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 6, n. 5, p. 4600-4620, mai 2014. <http://dx.doi.org/10.3390/rs6054600>.

BENDIB, A. High-resolution Alos Palsar for the Characterization of Water Storage at the Fountaine Des Gazelles Dam in Biskra, Eastern Algeria. **Journal Of The Indian Society Of Remote Sensing**, [S.L.], v. 49, n. 8, p. 1927-1938, abr. 2021. <http://dx.doi.org/10.1007/s12524-021-01365-y>.

BETTIOL, G. M.; FERREIRA, M. E.; MOTTA, L. P.; CREMON, É. H.; SANO, E. E. Conformity of the NASADEM_HGT and ALOS AW3D30 DEM with the Altitude from the Brazilian Geodetic Reference Stations: a case study from brazilian cerrado. **Sensors**, [S.L.], v. 21, n. 9, p. 2935, abr. <http://dx.doi.org/10.3390/s21092935>.

BRAUN, A. Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data – open applications, techniques, and limitations. **Open Geosciences**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 532-569, jan. 2021. <http://dx.doi.org/10.1515/geo-2020-0246>.

BRASIL. **Decreto N° 89.817 de 20 de Junho de 1984**. Normas Técnicas da Cartografia Nacional. 1984. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm>. Acessos em nov. 2021.

CARRARA, A.; BITELLI, G.; CARLA, R. Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. **International Journal Of Geographical Information Science**, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 451-473, jul. 1997. <http://dx.doi.org/10.1080/136588197242257>.

CARVALHO, J. A.; SILVA, D. Métodos para avaliação da acurácia posicional altimétrica no Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S.L.], v. 70, n. 2, p. 725-744, jun 2018. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv70n2-45404>.

CHEN, L.; YANG, X.; CHEN, L.; POTTER, R.; LI, Y. A state-impact-state methodology for assessing environmental impact in land use planning. **Environmental Impact Assessment Review**, [S.L.], v. 46, p. 1-12, abr. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2014.01.003>.

CONCAR; EXÉRCITO BRASILEIRO – **CONCAR-EB. Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais**. Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE). Brasil. 2011. 2.ed. Disponível em: < https://inde.gov.br/pdf/ET-EDGV_versao_3.0_2018_05_20.pdf > . Acessos em: 15 nov 2021.

CHU, T.; LINDENSCHMIDT, K. Comparison and Validation of Digital Elevation Models Derived from InSAR for a Flat Inland Delta in the High Latitudes of Northern Canada. **Canadian Journal Of Remote Sensing**, [S.L.], v. 43, n. 2, p. 109-123, jan. 2017. <http://dx.doi.org/10.1080/07038992.2017.1286936>.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, p. 755 - 763, 2014.

DENG, F.; RODGERS, M.; XIE, S.; DIXON, T. H.; CHARBONNIER, S.; GALLANT, E. A.; VÉLEZ, C. M. L.; ORDOÑEZ, M.; MALSERVISI, R.; VOSS, N. K.. High-resolution DEM generation from spaceborne and terrestrial remote sensing data for improved volcano hazard assessment — A case study at Nevado del Ruiz, Colombia. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 233, p. 111348-111452, nov. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2019.111348>.

DEWITT, J.D.; WARNER, T.A.; CONLEY, J.F.. Comparison of DEMs derived from USGS DLG, SRTM, a statewide photogrammetry program, ASTER GDEM and LiDAR:

implications for change detection. **Giscience & Remote Sensing**, [S.L.], v. 52, n. 2, p. 179-197, mar. 2015. <http://dx.doi.org/10.1080/15481603.2015.1019708>.

DSG. **Especificações Técnicas para a Aquisição de Dados Geospaciais Vetoriais (ET-ADGV)**, 2nd ed.; DSG: Brasília, Brasil, 2016. Disponível em: <https://inde.gov.br/pdf/ET-EDGV_versao_3.0_2018_05_20.pdf> . Acesso em: 15 nov de 2021.

DSG. **Especificação Técnica de Controle de Qualidade de Dados Geospaciais (ET-CQDG)**; DSG: Brasília, Brasil, 2016. Disponível em: <https://bdgex.eb.mil.br/portal/media/cqdg/ET_CQDG_1a_edicao_2016.pdf>. Acesso em: 15 nov de 2021.

ELKHRACHY, I. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: a case study of najran city, saudi arabia. **Ain Shams Engineering Journal**, [S.L.], v. 9, n. 4, p. 1807-1817, dez. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2017.01.007>.

FERREIRA, G. F. **Emprego de simulação no controle de qualidade em cartografia aplicado a modelos digitais de superfícies oriundos de dados orbitais segundo foco PEC-PCD**. Recife, 121 f. Dissertação (mestrado) - UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias Da Geoinformação, 2014.

FISHER, P. F.; TATE, N. J.. Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress In Physical Geography: Earth and Environment*, [S.L.], v. 30, n. 4, p. 467-489, ago. 2006. <http://dx.doi.org/10.1191/0309133306pp492ra>.

FLORINSKY, I.V.; SKRYPITSYNA, T.N.; LUSCHIKOVA, O.S. Comparative accuracy of the AW3D30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM: a case study on the zaoksky testing ground, central european russia. **Remote Sensing Letters**, [S.L.], v. 9, n. 7, p. 706-714, maio 2018. <http://dx.doi.org/10.1080/2150704x.2018.1468098>.

FUJISADA, H.; BAILEY, G.B.; KELLY, G.G.; HARA, S.; ABRAMS, M.J. ASTER DEM performance. **Ieee Transactions On Geoscience And Remote Sensing**, [S.L.], v. 43, n. 12, p. 2707-2714, dez. 2005. <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2005.847924>.

GOROKHOVICH, Y.; VOUSTIANIOUK, A. 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**, [S.L.], v. 104, n. 4, p. 409-415, out. 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.05.012>.

GONZÁLEZ-MORADAS, M. R.; VIVEEN, Wi. Evaluation of ASTER GDEM2, SRTMv3.0, ALOS AW3D30 and TanDEM-X DEMs for the Peruvian Andes against highly accurate GNSS ground control points and geomorphological-hydrological metrics. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 237, p. 111509, fev. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2019.111509>.

GROHMANN, C. H.. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: comparison with srtm, aster gdem and alos aw3d30. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 212, p. 121-133, jun. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.043>.

IBGE. **Relatório: Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais-REALT-2018**; IBGE: Rio de Janeiro, Brazil, 2018; 47p. Disponível em: <
<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/bibliotecacatalogo?view=detalhes&id=2101594>>. Acessos em: 15 nov 2021.

IBGE. **Rede Altimétrica Brasileira. 2021**. Disponível em: <
<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16283-rede-altimetrica.html?=&t=o-que-e>> . Acesso em: 15 nov 2021.

JAXA. **ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D-30 m (AW3D30)**. 2021. Disponível em: <<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>>. Acessos em: 15 de nov de 2021.

JALAL, S. J.; MUSA, T. A.; AMEEN, T. H.; DIN, A. H. M.; ARIS, W. A. W.; EBRAHIM, J. M. Optimizing the Global Digital Elevation Models (GDEMs) and accuracy of derived DEMs from GPS points for Iraq's mountainous areas. **Geodesy And Geodynamics**, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 338-349, set. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geog.2020.06.004>.

JULZARIKA, A; HARINTAKA, H. Utilization of DSM and DTM for Spatial Information in Lake Border. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S.L.], v. 535, p. 012034, ago. 2020. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/535/1/012034>.

KARABÖRK, H.; MAKINECI, H. B.; ORHAN, O.; KARAKUS, P. Accuracy Assessment of DEMs Derived from Multiple SAR Data Using the InSAR Technique. **Arabian Journal For Science And Engineering**, [S.L.], v. 46, n. 6, p. 5755-5765, jan. 2021. <http://dx.doi.org/10.1007/s13369-020-05128-8>.

KERVYN, M.; ERNST, G. G. J.; GOOSSENS, R.; JACOBS, P.. Mapping volcano topography with remote sensing: aster vs. srtm. **International Journal Of Remote**

Sensing, [S.L.], v. 29, n. 22, p. 6515-6538, 28 out. 2008. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160802167949>.

LAKSHMI, S. E.; YARRAKULA, K. Review and critical analysis on digital elevation models. **Geofizika**, [S.L.], v. 35, n. 2, p. 129-157, 14 jan. 2019. <http://dx.doi.org/10.15233/gfz.2018.35.7>.

LANG, H. R.; WELCH, R. **Aster Digital Elevation Models - Algorithm Theoretical Basis Document**. 1999. Disponível em: <<https://eosps.nasa.gov/sites/default/files/atbd/atbd-ast-14.pdf>> . Acessos em: 15 nov de 2021.

LAURENCELLE, J.; LOGAN, T.; GENS, R. A. S. F. **Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR products**. ASF-Alaska Satell. Facil, v.1, n.12, 2015.

LUDWIG, R.; SCHNEIDER, P. Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. **Isprs Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing**, [S.L.], v. 60, n. 5, p. 339-358, ago. 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.05.003>.

MORAIS, J. D. **Avaliação de modelos digitais de elevação provenientes de dados de sensoriamento remoto de distribuição gratuita**. 2017. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/IGCM-AQPMTM>>. Acessos em: 15 nov de 2021.

MALTHUS, Tim J.. Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Aquatic Macrophytes. **Bio-Optical Modeling And Remote Sensing Of Inland Waters**, [S.L.], p. 263-308, 2017. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-804644-9.00009-4>.

MUKHERJEE, S.; JOSHI, P.K.; MUKHERJEE, S.; GHOSH, A.; GARG, R.D.; MUKHOPADHYAY, A. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation**, [S.L.], v. 21, p. 205-217, abr. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.004>.

NIKOLAKOPOULOS, K. G. Accuracy assessment of ALOS AW3D30 DSM and comparison to ALOS PRISM DSM created with classical photogrammetric techniques. **European Journal of Remote Sensing**, [S.L.], v. 53, n. 2, p. 39-52, 2 jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.1080/22797254.2020.1774424>.

NÓBREGA, S. R.; BAKKER VITAL, B. A.L; Influência da Urbanização sobre o Microclima de Recife e Formação de Ilha de Calor. **Revista Brasileira de Geografia Física**, V.3, p.151-156, 2010.

NUTH, C. KÄÄB, A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. **Cryosphere**, v.5, pp. 271-290, 2011.

ORLANDI, A. G.; OSMAR, A. C. J.; GUIMARÃES, F. R.; BIAS, S. E.; CORRÊA, C. D.; GOMES, T. A. R.; Vertical Accuracy Assessment Of The Processed Srtm Data For The Brazilian Territory. **Boletim de Ciências Geodésicas** [online]. v. 25, n. 4, 2019. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000400021>

PREFEITURA DO RECIFE. **Caracterização do Território**. 2021. Disponível em: < <http://www2.recife.pe.gov.br/pagina/caracterizacao-do-territorio>>. Acessos em: 15 nov de 2021.

RABBY, Y. W.; ISHTIAQUE, A.; RAHMAN, M. S. Evaluating the Effects of Digital Elevation Models in Landslide Susceptibility Mapping in Rangamati District, Bangladesh. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 17, p. 2718, ago. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12172718>.

RECIFE. **Lei Municipal nº 16.176 de 09 de abril de 1996**. Estabelece a lei de uso e ocupação do solo da cidade do recife. Disponível em: < >. Acessos em: 15 nov 2021.

REXER, M.; HIRT, C.. 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**, [S.L.], v. 61, n. 2, p. 213-226, 17 fev. 2014. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/08120099.2014.884983>.

SANTILLAN, J. R.; MAKINANO-SANTILLAN, M.. VERTICAL ACCURACY ASSESSMENT OF 30-M RESOLUTION ALOS, ASTER, AND SRTM GLOBAL DEMS OVER NORTHEASTERN MINDANAO, PHILIPPINES. **Isprs - International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences**, [S.L.], v. -4, p. 149-156, jun. 2016. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-xli-b4-149-2016>.

SANTOS, C. F. P. **Microclimas urbanos na cidade do Recife-PE: proposta de zoneamento sob o enfoque do conforto térmico**. Recife, 150 f. Dissertação (mestrado) - UFPE, Centro de Filosofia e Ciências Humanas - Departamento de Ciências Geográficas, Programa de Pós-graduação em Geografia, 2018.

SANTOS, A. P.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, N. T.; GRIPP JUNIOR, J. AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL EM DADOS ESPACIAIS UTILIZANDO TÉCNICAS DE

ESTATÍSTICA ESPACIAL: proposta de método e exemplo utilizando a norma brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 630-650, dez. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702016000400036>.

SARTORI, L.; FREITAS, F. J.. Hydraulic resistance to overland flow governed by Froude number on semi-arid hillslopes under shrubs and crops. **Hydrological Sciences Journal**, [S.L.], v. 66, n. 10, p. 1531-1540, 27 jul. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2021.1947506>.

SHAWKY, M.; MOUSSA, A.; HASSAN, Q. K.; EL-SHEIMY, N. Pixel-Based Geometric Assessment of Channel Networks/Orders Derived from Global Spaceborne Digital Elevation Models. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 235, jan. 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11030235>.

SIART, C.; BUBENZER, O.; EITEL, B. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: a multi-component case study on mediterranean karst in central crete. **Geomorphology**, [S.L.], v. 112, n. 1-2, p. 106-121, nov. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.05.010>.

SILVA, G. M.; DEMETRIO, J. C. A. Uso de imagens do projeto PE3D para nivelamento de poços a serem usados em confecção de mapas potenciométricos. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 1, p. 103-111, 2020. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29551>.

SILVA JÚNIOR, J. F.; SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.. Classificação numérica e modelo digital de elevação na caracterização espacial de atributos dos solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 415-424, abr. 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662012000400012>.

SZYPUŁA, B. Quality assessment of DEM derived from topographic maps for geomorphometric purposes. **Open Geosciences**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 843-865, nov. 2019. <http://dx.doi.org/10.1515/geo-2019-0066>.

TAPETE, D.; TRAVIGLIA, A.; DELPOZZO, E.; CIGNA, F. Regional-Scale Systematic Mapping of Archaeological Mounds and Detection of Looting Using COSMO-SkyMed High Resolution DEM and Satellite Imagery. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 13, n. 16, p. 3106-4152, ago. 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13163106>.

TALLER DEL SIRGAS-GTI, 2., 2008, Montevideo. **SIRGAS: sistema de referência geocêntrico para las Américas: reporte 2007-2008**. [S. l: s. n.], 2008. 40 p. (Boletim informativo, n. 13). Grupo de Trabalho I: Sistema de Referência. Disponível em:

<http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Boletin_SIRGAS_NO._13_Reporte_2007-2008.pdf>. Acessos em: 15 de nov 2021.

TEIXEIRA, A. J. A.; RANGEL, R ; BARROS, R. S. ; CRUZ, C. B. M. . Avaliação planimétrica de imagens orbitais a partir do PEC e inferências estatísticas. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2015, João Pessoa-PB. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil**, 25 a 29 de abril de 2015, INPE, 2015. p. 2125-2132.

UUEMAA, E.; AHI, S.; MONTIBELLER, B.; MURU, M.; KMOCH, A. Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 21, p. 3482, 23 out. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12213482>.

VIEL, J. A.; ROSA, Kátia K.; MENDES JUNIOR, C. W. Avaliação da Acurácia Vertical dos Modelos Digitais de Elevação SRTM, ALOS World 3D e ASTER GDEM: um estudo de caso no vale dos vinhedos, RS - Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.L.], v. 13, n. 5, p. 2255, jul. 2020. **Revista Brasileira de Geografia Física**. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v13.5.p2255-2268>.

YANG, K.; SMITH, L. C.; CHU, V. W.; GLEASON, C. J.; LI, M. A Caution on the Use of Surface Digital Elevation Models to Simulate Supraglacial Hydrology of the Greenland Ice Sheet. **Ieee Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing**, [S.L.], v. 8, n. 11, p. 5212-5224, nov. 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/jstars.2015.2483483>.

YAN, Y.; TANG, J.; PILESJÖ, P. A combined algorithm for automated drainage network extraction from digital elevation models. **Hydrological Processes**, [S.L.], v. 32, n. 10, p. 1322-1333, abr. 2018. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.11479>.

WANG, X.; HOLLAND, D. M.; GUDMUNDSSON, G. H. Accurate coastal DEM generation by merging ASTER GDEM and ICESat/GLAS data over Mertz Glacier, Antarctica. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 206, p. 218-230, mar. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.041>.

Recebido: 23 nov. 2021

Aprovado: 23 jun. 2022

DOI: 10.3895/rbgeo.v10n2.14969

Como citar: SILVA JÚNIOR, J. A.; SILVA JÚNIOR, U. J.; PACHECO, A. P.; SANTOS, A.G.A.; Análise de acurácia altimétrica para dados ALOS PALSAR e ASTER GDEM para o Município do Recife-PE. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 10, n. 2, p. 117-139, abr./jun. 2022. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Juarez Antônio da Silva Júnior

Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

