ANÁLISE COMPARATIVA DA INFLUÊNCIA DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO (SRTM-90 m, Topodata-30 m e Alos Palsar-12,5 m) NAS ESTIMATIVAS DE VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO UTILIZANDO CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

Comparative analysis of the influence of digital elevation models (SRTM-90m, Topodata-30m, and Alos Palsar-12.5m) on wind speed estimates using Computational Fluid Dynamics (CFD)

Nátali Filomeno Belo Asada
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

Este estudo objetiva comparar o impacto dos modelos digitais de elevação (MDE) na variação da velocidade média do vento, através de simulação em modelo CFD-WindSim. Foram realizadas análises das variações, na representação do terreno, com os MDE SRTM-90 m, Topodata-30 m e Alos Palsar-12,5 m, em relação a altitude e declividade. O objetivo principal, consistiu em avaliar o impacto das variáveis analisadas na velocidade do vento. Foram utilizados dados de velocidade e direção do vento de duas TMA (Torre de Medição Anemométrica), localizadas em pontos representativos da área em estudo. Os procedimentos metodológicos envolveram o levantamento bibliográfico, obtenção e adequação dos dados de entrada nas simulações CFD e análise da velocidade do vento estimada pelas simulações, em pontos de referência e nos pontos das duas TMA e com isso foi possível comparar a velocidade estimada e a medida. Os MDE utilizados foram SRTM, Topodata e Alos Palsar, com 90, 30 e 12,5 metros de resolução horizontal, respectivamente, num recorte espacial com 62,2 km², entre os municípios Macaparana, São Vincente Ferrer (PE) e Natuba (PB). Para avaliar as variações de elevação, declividade e velocidade média do vento, além das análises nos pontos de cada TMA, foram analisados pontos de referência. As análises comparativas de velocidade média do vento nos pontos das TMAs foram satisfatórias em relação aos MDE utilizados, com pouca variação entre o medido e o previsto. Já nas análises comparativas baseadas nos pontos de referência, observou-se melhor desempenho do Alos Palsar quanto a variações de altitude e declividade e referente a velocidade do vento, apesar dos valores próximos, Topodata forneceu médias de velocidade sutilmente mais conservadoras quando comparadas aos cenários com Alos Palsar e SRTM.

Palavras-chave: Topografia, MDE, modelagem eólica, CFD

ABSTRACT

This study aims to compare the impact of digital elevation models (DEM) on the average wind speed variation, through simulation in a CFD-WindSim model. Analyzes of the variations, in the representation of the terrain, were carried out with the DEM SRTM-90 m, Topodata-30 m and Alos Palsar-12.5 m, in relation to altitude and slope. The main objective was to evaluate the impact of the analyzed variables on wind speed. Wind speed and direction data from two met masts were used, located at representative points of the study area. The methodological procedures involved a bibliographic survey, obtaining and adapting the input data in the CFD simulations and analysis of the wind speed estimated by the simulations, at reference points and at the points of the met masts, with this it was possible to compare the estimated and measured speeds. The SRTM, Topodata and Alos Palsar DEM were used, with 90, 30 and 12.5 meters of horizontal resolution, respectively, in a spatial cut with 62.2 km², between the municipalities Macaparana, São Vincente Ferrer (PE) and Natuba (PB). To assess variations in elevation, slope and average wind speed, in addition to the analysis at the points of each met mast, reference points were analyzed. The comparative analyzes of the average wind speed at the met masts points were satisfactory in relation to the DEM used, with little variation between the measured and the predicted. In the comparative analyzes based on the reference points, a better performance of Alos Palsar was observed in terms of altitude and slope variations and referring to wind speed, despite the close values, Topodata provided subtly more conservative speed averages when compared to the scenarios with Also Palsar and SRTM.

Keywords: Topography, DEM, wind modelling, CFD

1. INTRODUÇÃO

É inquestionável a importância das fontes alternativas e renováveis na expansão da oferta mundial de energia elétrica em bases sustentáveis, de forma a atender ao crescimento da demanda, concomitantemente à mitigação das alterações climáticas (Castro et. al.,2010).

Recentemente, as preocupações ambientais impulsionaram a busca de alternativas mais sustentáveis de produção de energia. Entre essas alternativas, a energia eólica adquiriu relevância durante as últimas décadas. A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) resultou em esforços para encontrar alternativas que, além de atender às demandas econômicas, também minimizem os impactos ambientais negativos. Essa busca por soluções foi impulsionada pela ratificação do Protocolo de Quioto em 1997, como pontua Marín (2012, p.115-136).

Entre as medidas, uma das mais populares foi o investimento em fontes renováveis de energia, como a energia eólica. Segundo o Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC), essa fonte de energia oferece um grande potencial para a redução das emissões de GEE. Globalmente, apesar de distribuído de maneira não uniforme entre os países, o potencial técnico da energia eólica é maior que a produção mundial de eletricidade. Considerando barreiras políticas, econômicas e tecnológicas, estima-se que ela poderia suprir até 20% da demanda mundial de energia elétrica até 2050 (Simas et al, 2013).

Frente a constante necessidade de analisar de forma mais precisa os territórios e suas características físicas, para melhor planejamento e gestão de recursos para execução de projetos diversos, como a análise de viabilidade de implantação de parques eólicos, a qualidade de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) é de extrema relevância.

Os MDEs são representações matemáticas da topografia, servindo de suporte para o desenvolvimento de pesquisas e políticas, sobretudo os modelos que são gratuitos, como o SRTM, ASTER GDEM, TOPODATA (Farr et al., 2007; Tachikawa et al., 2011; Valeriano & Rosseti, 2012) Assim como também, o Alos Palsar, e a possibilidade de utilizar Modelos Digitais de Elevação, leva a redução de custos, ao substituir satisfatoriamente em certos casos, levantamentos topográficos em campo.

A análise do potencial eólico em uma determinada região é um processo que requer a obtenção sistemática de dados precisos sobre a velocidade e regime dos ventos. Devido a crescente competitividade da energia eólica no mercado de energia, se faz cada vez mais importante o desenvolvimento de métodos precisos e evolutivos para avaliação do potencial eólico em um local específico, bem como para a simulação da geração de energia elétrica a partir de aerogeradores que serão instalados nessa região (Caldas, 2010). É necessário, portanto, um trabalho contínuo e aprofundado de obtenção de dados e avaliação da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do potencial eólico em uma determinada região, visando não apenas a redução dos impactos ambientais, mas também a geração de energia elétrica de forma sustentável e economicamente viável.

A complexidade topográfica e obstáculos no entorno de qualquer estação meteorológica, mostram seus efeitos profundos nas medições de direção e velocidade do vento (Zekai Sen, 1999). Portanto, a inserção de dados de elevação com boa resolução espacial é um passo importante para melhorar as simulações de modelagem eólica, por exemplo, tornando-as mais próximas a realidade e dessa forma, obter maior precisão nas estimativas de produção de energia.

O presente artigo tem como objetivo analisar as variações na representação do terreno por meio dos Modelos Digitais de Elevação (MDE) SRTM-90 m, Topodata-30 m e Alos Palsar-12,5 m, considerando a altitude e a declividade do terreno. O propósito principal da presente análise é avaliar o impacto dessas variáveis na velocidade do vento. Para tanto, serão realizadas comparações entre os diferentes MDEs, a fim de verificar as diferenças nas representações do terreno e como essas discrepâncias podem influenciar a velocidade do vento. A presente análise tem como objetivo contribuir para o avanço do conhecimento sobre o potencial eólico de determinada região, bem como para o desenvolvimento de estudos que permitam uma melhor compreensão do clima e das condições ambientais em geral.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Efeitos do Terreno

O terreno desempenha grande influência no vento. A orografia e rugosidade do terreno, bem como a existência de obstáculos, impactam o comportamento do perfil do vento, causando acelerações e turbulências (Andrade, 2021).

De acordo com Zhang (2015), as influências do terreno no escoamento do vento tendem a diminuir com a altura acima do solo até sumirem completamente na altura em que o vento sopra horizontalmente sem mudar de velocidade. Portanto, o fluxo de vento que atravessa uma colina tem que se espremer através de uma passagem mais estreita e a velocidade do vento tem que aumentar para que a mesma quantidade de massa de ar atravesse (massa-conservadora), ou seja, o terreno tem um efeito de aceleração do vento. A Figura 1 retrata o efeito de aceleração pela densidade das linhas de corrente. Tem-se que quanto mais densas as linhas de corrente maior a velocidade do vento, assumindo fluxo próximo à superfície, o que é válido para inclinações suaves e terrenos mais simples. Associado aos gradientes de pressão e temperatura, que são representados pelas linhas que podem ser identificadas como isóbaras, é possível observar que a variação na topografia, com o aumento do gradiente do relevo, afeta a velocidade do vento. Quando as linhas isóbaras estão mais distantes uma da outra, indica-se menor velocidade do vento, enquanto quando as linhas estão mais próximas, indica-se maior velocidade.

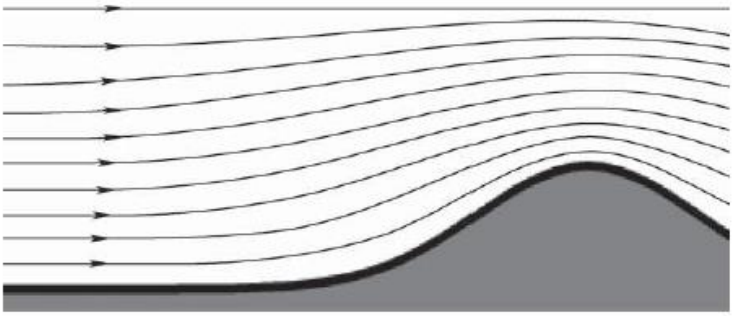

Figura 1: Linhas de vento fluem sobre uma colina idealizada. Fonte: (Zhang, 2015)

Troen e Petersen (1989) classificaram os terrenos de acordo com sua complexidade (categoria 1 a 4), analisando as características rugosas, presença de obstáculos e a presença de elevações, de forma que um terreno plano é aquele com rugosidade baixa e pequenos obstáculos, sem nuances significativas no relevo; a medida que o terreno se torna mais acidentado em seu relevo, com níveis de rugosidade elevados e grandes obstáculos, sua complexidade aumenta, pois a esse tipo de terreno estarão associados descolamentos da camada limite e presença de vórtices, fenômenos estes que dificultam as análises do comportamento do vento.

A influência da orografia no comportamento do vento foi posteriormente estudada no projeto de Arskervein Hill, na região costeira da ilha de South Uist, Escócia, através de uma extensiva coleta de dados de campo para analisar o escoamento sobre a colina. O trabalho publicado por Taylor e Teunissen (1987), possibilitou a validação de inúmeros casos de CFD, no que diz respeito a escoamentos atmosféricos, devido a extensiva coleta de dados obtida com mais de 50 mastros meteorológicos durante a Campanha de Medições. Os mastros meteorológicos foram distribuídos em linha reta, no sentido do vento ao longo da colina, cobrindo as regiões a montante e a jusante do seu cume. A Figura 2 a seguir, mostra a distribuição dos mastros ao longo da colina.

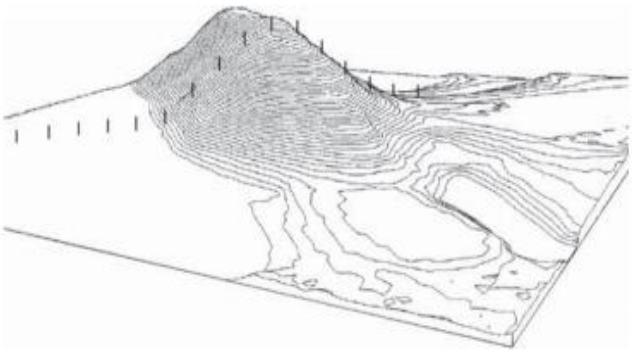

Figura 2 – Distribuição dos mastros meteorológicos na colina Askervein. Fonte: (ZHANG, 2015)

2.2 Rugosidade

Enquanto a orografia estuda as nuances do relevo, a rugosidade representa a característica ou uso da cobertura do solo (Pinto, 2014). Em energia eólica utiliza-se uma medida parametrizada, o comprimento de rugosidade, z0, para calcular a influência da rugosidade no vento; quanto mais rugosa uma superfície, mais ela contribui para a desaceleração do vento.

Quando os elementos rugosos estão próximos o suficiente um do outro, o ar não escoa entre, mas sim acima deles, à uma altura chamada de altura deslocada (Figura 3), que nesses cenários deve ser considerada para o cálculo da altura do rotor. Como a vegetação varia ao longo das estações, é realístico, dentro da avaliação de recurso eólico, considerar um valor de média anual (z0) nos cálculos da rugosidade (Zhang, 2015).

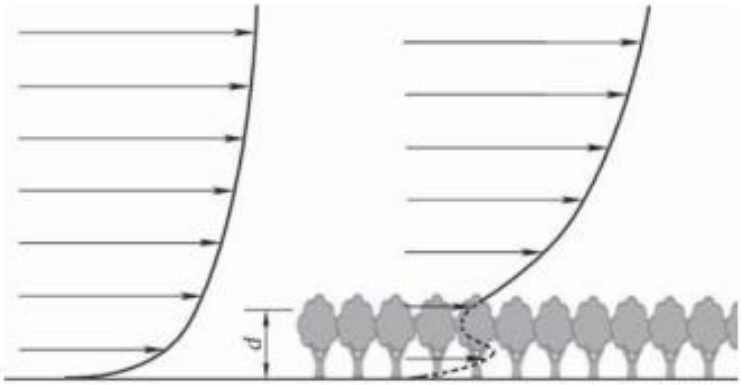

Figura 3 – Altura deslocada quando o ar escoa sobre elementos rugosos densos. Fonte: (Zhang, 2015).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A área de estudo localiza-se na divisa entre os estados de Pernambuco e Paraíba, abrangendo os municípios pernambucanos de São Vincente Ferrer e Macaparana e o município de Natuba, na Paraíba, compreendendo uma área de 62,2 km² (7,94 x 7,84), localizados na divisa entre as mesorregiões da Zona da Mata e Agreste, no bioma Mata Atlântica distando aproximadamente 76 km do oceano Atlântico (Figura 4).

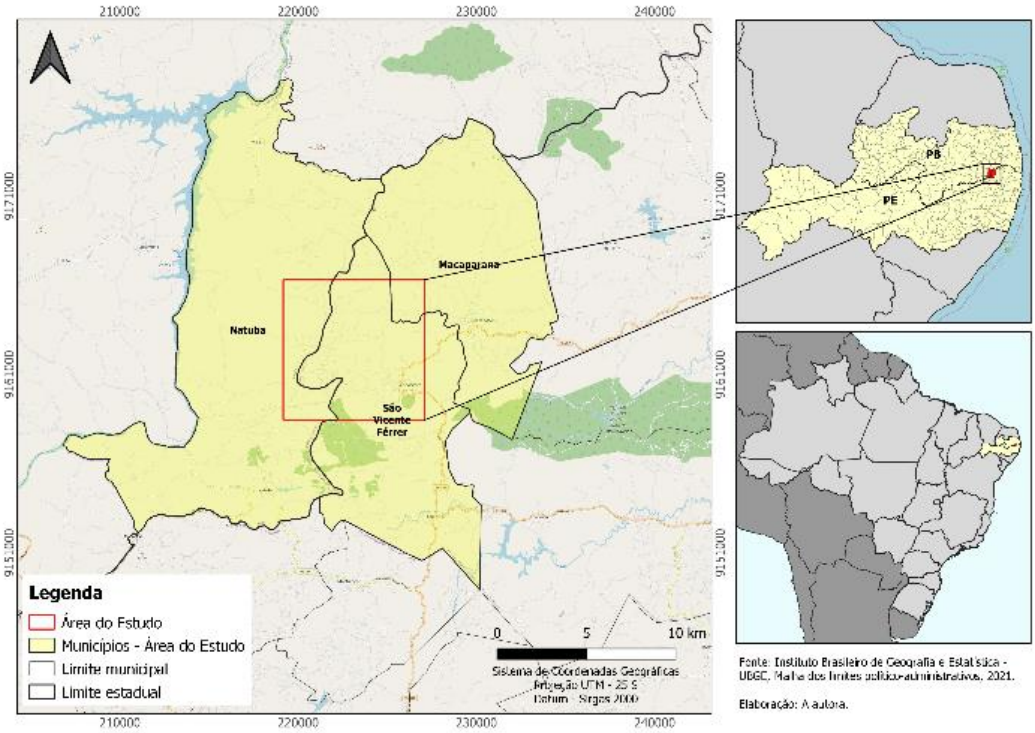

Figura 4: Localização da área em estudo. Fonte: A autora.

A cobertura do solo deste recorte compreende, majoritariamente, pastagem e vegetação típica do bioma Mata Atlântica. Tem orografia complexa, com variação de aproximadamente 393 a 628 m de elevação e declividade > 17°, o que já caracteriza o terreno como complexo, de acordo com Zhang (2015).

A definição do recorte espacial foi guiada pelas localizações das Torres de Medições Anemométricas (TMA) utilizadas no estudo. A Empresa de Pesquisa Energética – EPE estabelece que a área de um empreendimento de eólica deve ser definido a partir de um raio de 10 km em torno da estação anemométrica, para que as medições sejam representativas do local (EPE, 2018). Essa premissa foi seguida na delimitação do recorte espacial desta pesquisa.

3.2 Procedimentos Metodológicos

A pesquisa se deu em quatro etapas principais. A primeira consistiu na coleta de dados bibliográficos acerca do desenvolvimento da energia eólica no mundo e a importância de dados de entrada de qualidade para estimativas de produção mais precisas. O meio utilizado, principalmente, foi o Google Acadêmico (GA).

Na segunda etapa, deu-se a obtenção dos modelos digitais de elevação do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM (90 metros de resolução) desenvolvido pelo *USGS – United States Geological Survey*. Topodata (30 m), fornecido pelo Inpe - Instituo Nacional de Pesquisas Espaciais e Alos Palsar (12,5), lançado em 2006 pela JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency, tendo sua conclusão em 2011. Para as informações de cobertura do solo,

foram adotados os dados provenientes do MapBiomas (2021) para compor a rugosidade superficial do terreno. Em relação aos dados anemométricos da área, estes vieram de duas torres de medição anemométrica e suas posições exatas não poderão ser expostas, por se tratarem de dados privados, mas que foram gentilmente cedidos para esta pesquisa. É importante salientar, no entanto, que estas encontram-se em posições representativas da área estudada

A terceira fase compreende a elaboração das simulações de fluxo de vento no modelo CFD-Windsim 11.0, apenas variando o dado de elevação e mantendo todos os demais parâmetros, a fim de analisar, apenas, o impacto dos diferentes MDEs na modelagem do fluxo do vento.

Para obter melhor dimensão em relação a variações físicas no terreno, como altimetria e declividade da área estudada, foram gerados pontos de referência, com a ferramenta *Random Points Along Line* (QGIS), totalizando 37 pontos, aleatoriamente distribuídos ao longo de uma linha de 10,7 km, posicionada alinhada à direção predominante do vento no local.

E a quarta etapa, por fim, tratou-se basicamente da análise dos resultados das simulações.

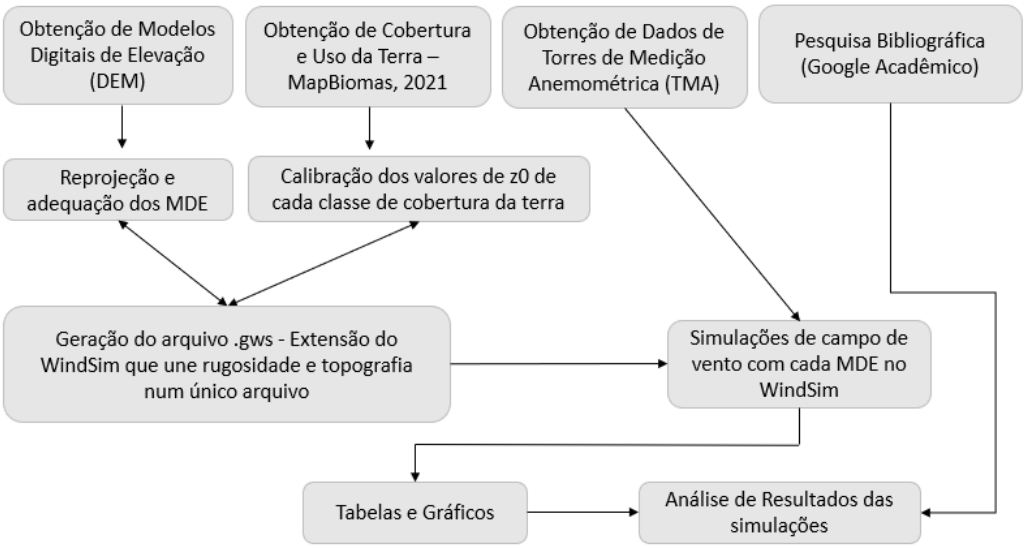

Figura 5: Fluxograma dos procedimentos pelos quais se deu a pesquisa. Fonte: A autora.

Foram utilizados, principalmente, quatro softwares para o estudo: O Global Mapper 22.1, WindSim 11.0, Excel e o SIG QGIS 3.28.

Os sistemas de informação geográfica (SIG) são de grande relevância nos estudos de viabilidade e desenvolvimento de projetos de plantas eólicas. Desde etapas iniciais como prospecção de locais com melhor recurso eólico, a fase de análise de estimativas de produção energética, até a implantação. Nesta pesquisa o SIG utilizado foi o QGIS versão 3.18.2, nas etapas de projeção e recorte dos MDEs, da adequação da camada de uso e cobertura do solo, do MapBiomas (2021) e da confecção dos mapas.

Para a inserção no CFD-Windsim, dos dados de elevação e uso e cobertura da terra ou rugosidade, é necessário unir ambas as camadas, em um arquivo de extensão GWS – Windsim roughness elevation model, que foi exportado através do Global Mapper 22.1.

O software WindSim, versão 11.0, adotado nesta pesquisa para a simulação do campo de vento, é utilizado como interface de outro programa CFD chamado Phoenics, desenvolvido pela empresa CHAM (CHAM - Concentration Heat and Momentum Limited), localizada no Reino Unido. O programa se baseia em um sistema de modelagem do vento e do terreno em forma de malha, sendo fundamentado nas Equações Médias de *Reynolds* para solucionar as condições de vento em cada célula da malha (WALLBANK, 2008). O WindSim calcula o campo de vento através do modelo *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), um método de cálculo de conservação de momento.

No que concerne a parametrização da rugosidade superficial do terreno da área estudada, esta foi realizada com base no Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil pelo MapBiomas (2021). O MapBiomas é um projeto com a iniciativa de apresentar resultados sobre a cobertura e uso do solo no País. Seus dados são produzidos a partir de classificação pixel a pixel de imagens de satélite da coleção Landsat, com resolução horizontal de 30 metros (MapBiomas).

Portanto, a identificação das classes de cobertura do solo (Tabela 1) para a área do projeto (Figura 6) foi realizada de acordo com a classificação adotada pelo mapeamento do Mapbiomas e a calibração dos valores de cada classe baseou-se nos valores de rugosidade superficial (z0 anual) do Atlas Eólico e Solar de Pernambuco.

Tabela 1: Porcentagem de cobertura de cada classe de rugosidade

Classe de Rugosidade	**z0**	**Área (%)**
Corpos D'água	0,0001	0,22
Pastagem	0,03	65,43
Vegetação arbórea esparsa	0,1	13,50
Áreas de Cultivo	0,15	0,46
Vegetação Nativa	0,3	19,55
Áreas Urbanizadas	0,7	0,83

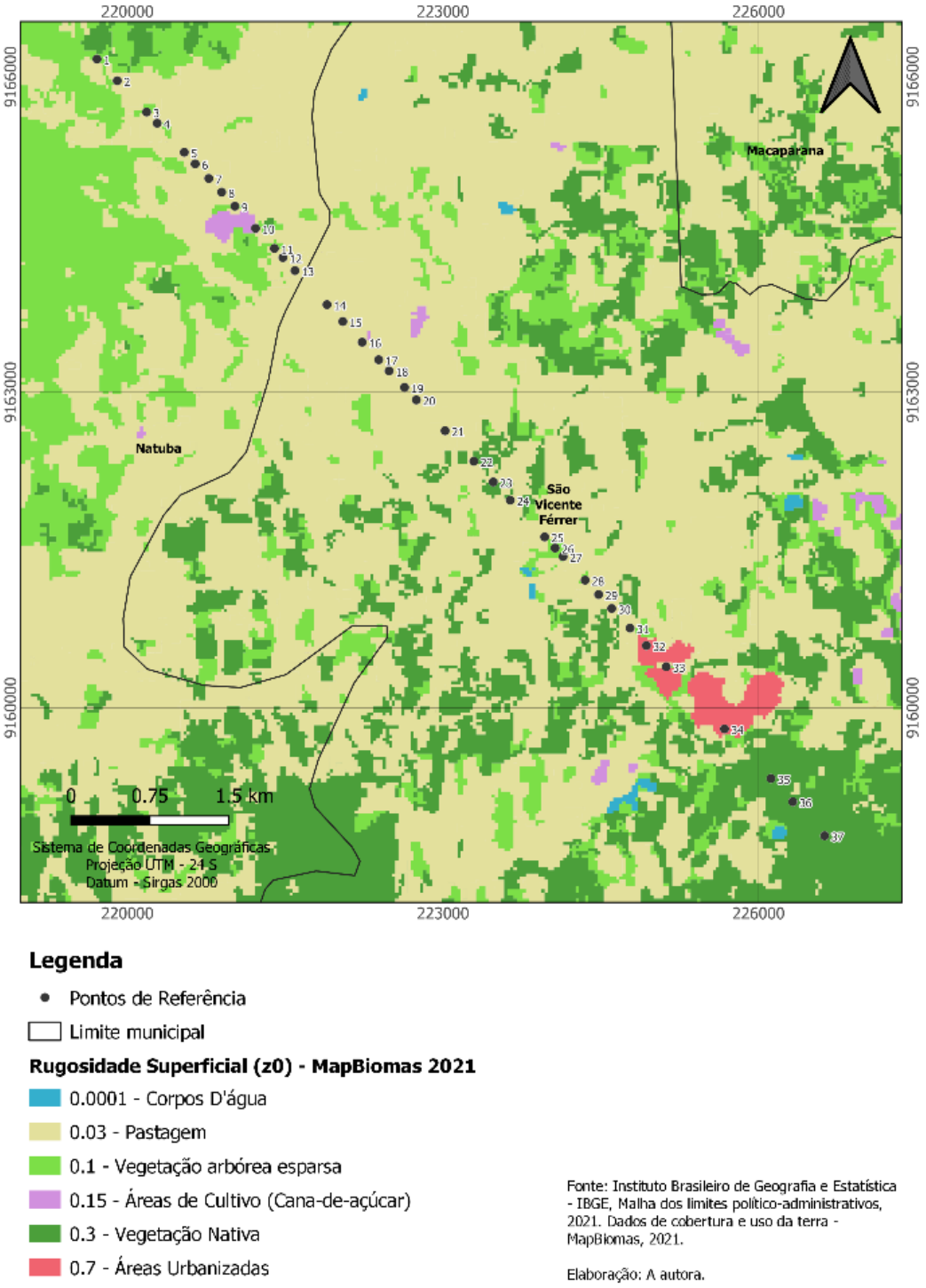

Figura 6: Mapa com a distribuição das classes de rugosidade da área estudada. Fonte: A autora.

Nota-se que a classe predominante ao longo dos pontos de referência, assim como em toda a área, é a cobertura por pastagem, também se observa presença de área urbanizada a sudeste e vegetação nativa na área sul, direções predominantes do vento neste local.

3.3 Dados Anemométricos

Em relação aos dados de medições de velocidade e direção do vento a serem utilizados nas simulações, estes são provenientes de duas torres de medição anemométrica (TMA), distando aproximadamente 4,5 km uma da outra, localizadas em pontos elevados e serão chamadas de Torres A e B nesta pesquisa. Estes dados foram gentilmente fornecidos pela empresa Aeroespacial e por tratar-se de dados particulares, suas localizações exatas não serão expostas.

De acordo com as rosas dos ventos das torres A e B (Figuras 07 e 08), as direções predominantes na área de análise são leste (E), leste-sudeste (ESE) e sudeste (SE). É importante notar que a Torre A apresenta um componente de nordeste (NE) adicional.

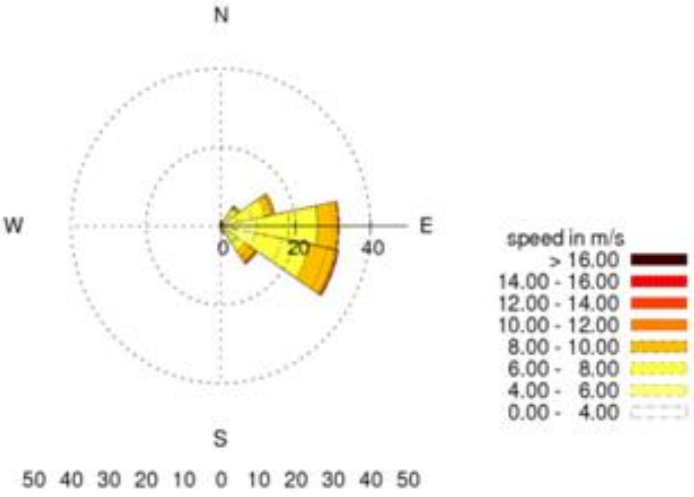

Figura 07: Rosa dos ventos da Torre A

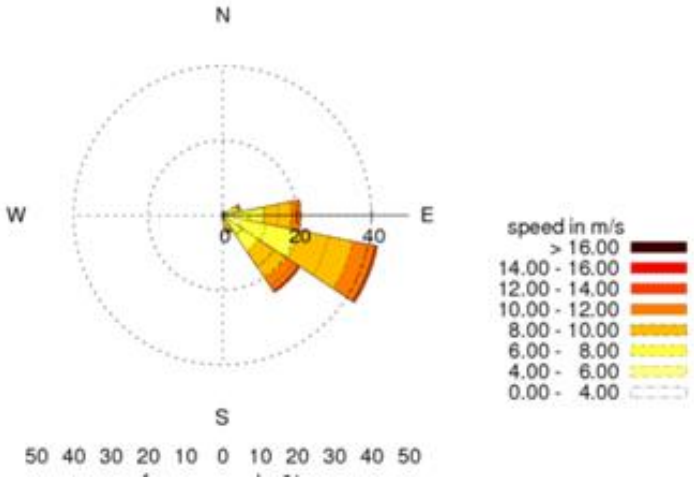

Figura 08: Rosa dos ventos da Torre B. Fonte: A autora.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise comparativa da velocidade média do vento simulada considerando cada um dos MDE, utilizou de referência as velocidades medidas nas três alturas de medição presentes nas duas TMA. E para obter melhor dimensão em relação a variações físicas no terreno, neste caso, de altimetria e de declividade da área estudada, foram gerados pontos de referência, com a ferramenta *Random Points Along Line* (QGIS), totalizando 37 pontos, distribuídos ao longo de uma linha de 10,7 km, posicionada alinhada à direção predominante do vento no local, em referência ao estudo na colina de Askervein.

Antes de seguir com as análises usando por base os pontos de referência, é apresentada uma comparação com as médias de velocidade vento estimadas em relação as médias de velocidade das torres A e B na simulação com cada MDE.

Como parâmetro de dados reais, comparou-se as velocidades medidas nas alturas dos sensores de medição das torres A e B, que são 60, 80 e 100 m, com as velocidades estimadas em cada simulação, a fim de analisar qual MDE obteve melhor performance, ao fornecer velocidades mais próximas as medidas em cada altura de medição.

Na tabela a seguir tem-se a elevação medida e estimada de cada TMA, levando em consideração cada MDE analisado.

Tabela 2: Altitudes das TMAs.

TMA	Z (Medido)	Z (SRTM)	Z (Topodata)	Z (Alos Palsar)
A	580	581	583,8	577,9
B	560	553,5	569,2	557,4

A seguir, são apresentadas as médias de velocidade medidas e as estimadas em cada simulação, para as torres A e B.

Tabela 3: Médias de velocidade medidas e estimadas em cada simulação para a Torre A.

Torre A	60 m	80 m	100 m	Média
Medido	6,28	6,73	6,79	6,60
SRTM-90	6,32	6,61	6,79	6,57
Topodata-30	6,33	6,61	6,78	6,57
Alos Palsar-12,5	6,28	6,6	6,79	6,56

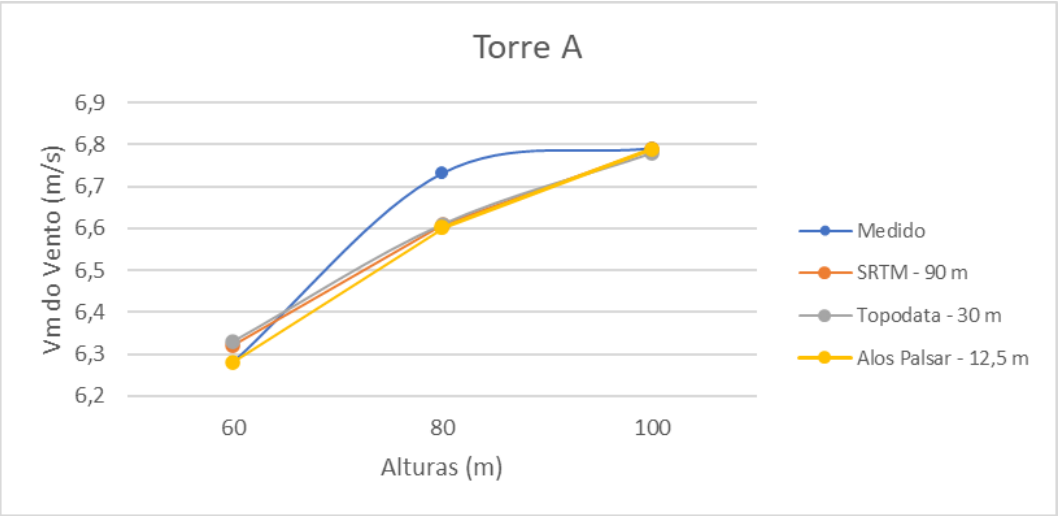

Figura 9: Gráfico representando a diferença das médias estimadas pelas simulações em relação às médias reais da Torre A. Fonte: A autora.

Observa-se que as médias de velocidade estimadas em cada altura são satisfatoriamente próximas as medidas nos três cenários (Figura 9), porém a simulação com Alos Palsar se saiu ligeiramente melhor, ao obter as mesmas médias nas alturas de 60 e 100 m, porém com média 0,4 m/s ou 0,6% menor que a média do dado medido, enquanto Topodata e SRTM mostraram médias com diferença de 0,3 m/s ou 0,5% abaixo. A seguir, o mesmo comparativo para a Torre B.

Tabela 4: Médias de velocidade medidas e estimadas em cada simulação para a Torre B.

Torre B	60 m	80 m	100 m	Média
Medido	7,10	7,69	7,96	7,58
SRTM-90	6,91	7,48	7,89	7,43
Topodata-30	6,98	7,5	7,86	7,45
Alos Palsar-12,5	6,95	7,49	7,89	7,44

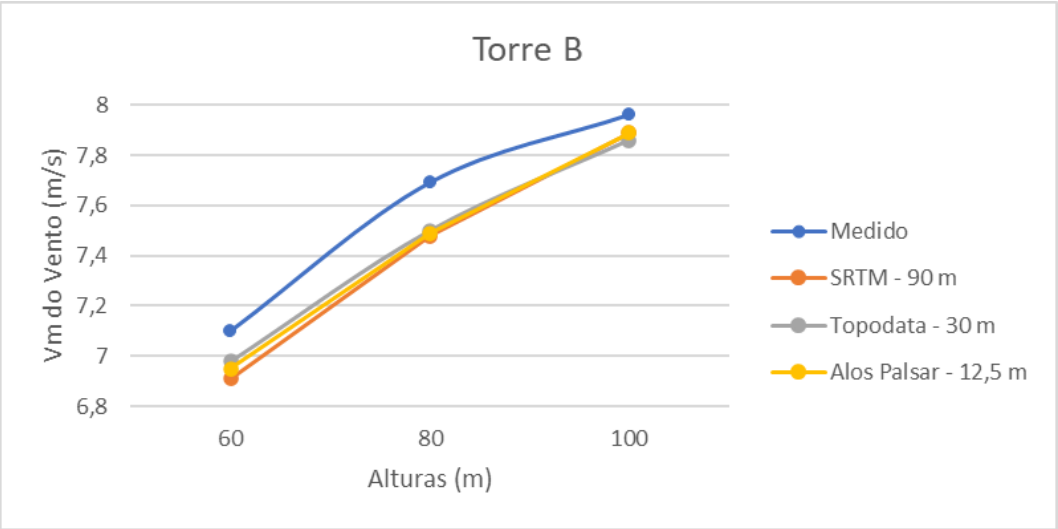

Figura 10: Gráfico representando a diferença das médias estimadas pelas simulações em relação às médias reais. Fonte: A autora.

Assim como na Torre A, as médias de velocidade estimadas nas três simulações são consideravelmente próximas as velocidades medidas (Figura 10), porém no ponto da Torre B, o Topodata obteve resultado ligeiramente superior. Ainda assim, a velocidade do vento estimada em todas as simulações ficou, em média, 2% abaixo da velocidade medida.

Para ter melhor dimensão das variações de terreno em cada simulação e a explorar a possibilidade de mostrar a localização dos pontos analisados em mapas, serão utilizados 37 pontos de referência numerados em ordem crescente de noroeste para sudeste, para obtenção das variações de elevação (Figura 11), declividade e velocidade média do vento. Na figura abaixo, são apresentados os MDEs, curvas de nível com 50 m de espaçamento e a localização dos pontos de referência.

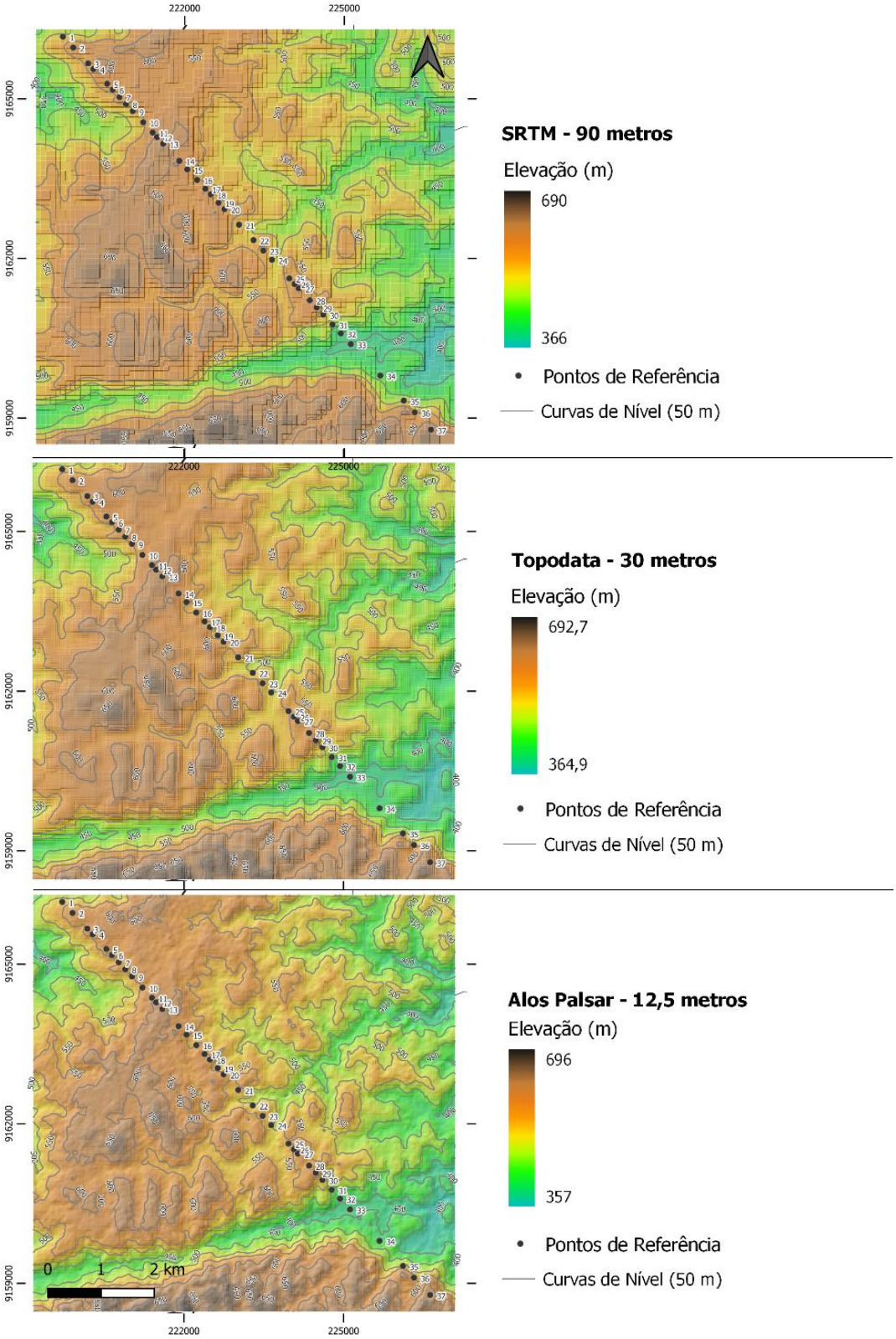

Figura 11: Mapas de cada MDE e a posição dos 37 pontos de referência. Fonte: A autora.

Tabela 5: Elevação dos pontos de referência em cada MDE analisado.

Pontos	X	Y	Z – SRTM (m)	Z – Topodata (m)	Z - Alos Palsar (m)
1	219711	9166168	517	525,7	527
2	219904	9165962	581	586,9	587
3	220183	9165665	566	576,4	568
4	220283	9165558	566	583,5	563
5	220541	9165282	571	576,4	567
6	220645	9165171	563	560,2	559
7	220775	9165033	548	556,9	551
8	220897	9164902	546	566,0	557
9	221022	9164769	539	548,5	545
10	221219	9164558	532	565,9	554
11	221398	9164367	590	590,4	585
12	221479	9164281	609	605,4	607
13	221594	9164157	625	614,5	616
14	221898	9163833	583	580,4	581
15	222049	9163673	586	554,5	552
16	222233	9163476	539	557,8	558
17	222390	9163309	569	558,3	555
18	222489	9163203	570	561,2	563
19	222636	9163046	551	535,3	539
20	222747	9162927	573	562,6	565
21	223021	9162634	530	545,2	532
22	223294	9162343	518	508,1	511
23	223478	9162146	543	541,0	538
24	223640	9161973	522	509,6	509
25	223967	9161624	556	549,5	546
26	224067	9161518	576	573,5	553
27	224143	9161436	584	581,7	578
28	224353	9161212	570	584,2	582
29	224481	9161076	569	577,8	576
30	224605	9160943	527	517,1	521
31	224780	9160757	452	442,5	444
32	224935	9160590	404	409,8	404
33	225124	9160389	398	396,8	393
34	225678	9159798	411	415,7	416
35	226119	9159326	518	509,7	523
36	226326	9159105	586	548,7	571
37	226630	9158782	628	612,7	614
Média	-	-	546,4	545,7	543,5

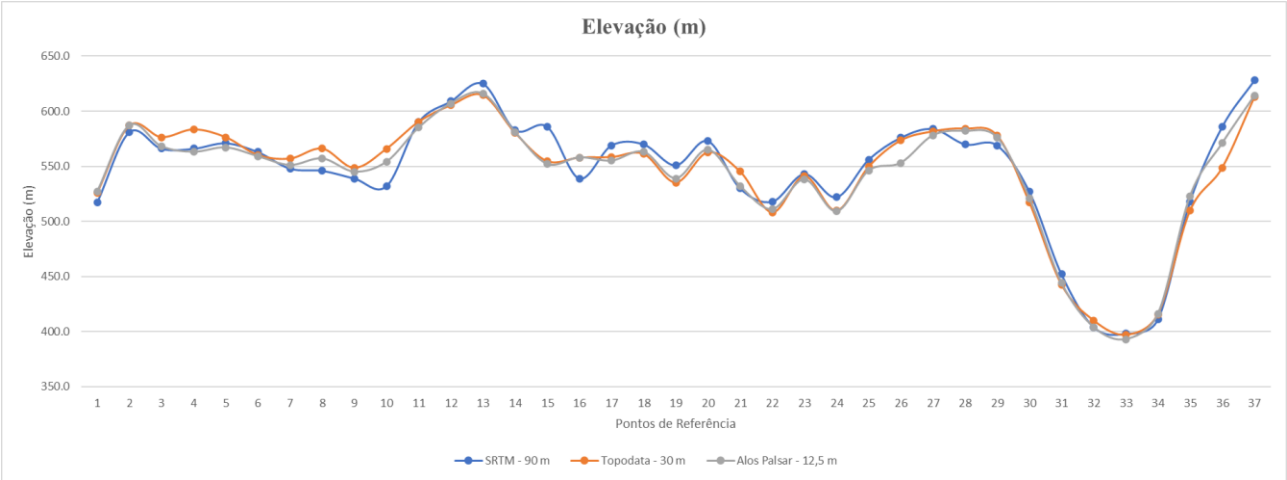

Figura 12: Variação de altitude de cada ponto de referência em cada MDE.

Com base nos mapas (Figura 11), observa-se que o Alos Palsar, com 12,5 metros de resolução horizontal, tende a representar de forma mais satisfatória picos e vales, possuindo a menor altitude mínima e a maior altitude máxima. Ainda nesse quesito, SRTM, com 90 metros de resolução horizontal, se mostra mais suavizado, com maior valor de altitude mínima e menor máxima. Apesar de os três MDE obterem valores de elevação próximas e estes valores se acompanharem, no gráfico (Figura 14) e na tabela 5, pode-se notar que em alguns pontos, há diferenças significativas, acima de 30 metros, como nos pontos 10 e 15, por exemplo.

O segundo aspecto do terreno a ser avaliado é a declividade, característica importante na modelagem do fluxo do vento e que pode oferecer vantagens para um maior aproveitamento deste recurso. Como foi mostrado no capítulo anterior, foi pontuado no estudo na colina Askervein, que a variação da velocidade no cume da colina chegou a cerca de 80% do valor da velocidade média não perturbada a montante, logo há maior aceleração no barlavento até chegar ao cume, quando o efeito de aceleração reduz.

A seguir, são apresentados os mapas de declividade resultantes de cada MDE. Para a classificação dos valores de declividade, foi adotada uma adaptação da classificação das formas de relevo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e EMBRAPA, 2010 (Plano 0 a 3%, Sauve-ondulado 3 a 8%, ondulado 8 a 20%, Forte ondulado 20 a 45%, montanhoso 45 a 75% e escarpado > 75%).

A classificação de declividade adotada seguiu o padrão supracitado e a última classe contempla todos os valores maiores ou iguais a 30,6%. Sobre a predominância destas áreas mais declivosas, é válido pontuar o limite estabelecido por Zhang, 2015, como restritivo de 17° (graus) ou 30,6% para simulações de campo de vento em modelos lineares como o WAsP, nesses casos, o aconselhável é utilizar modelos CFD.

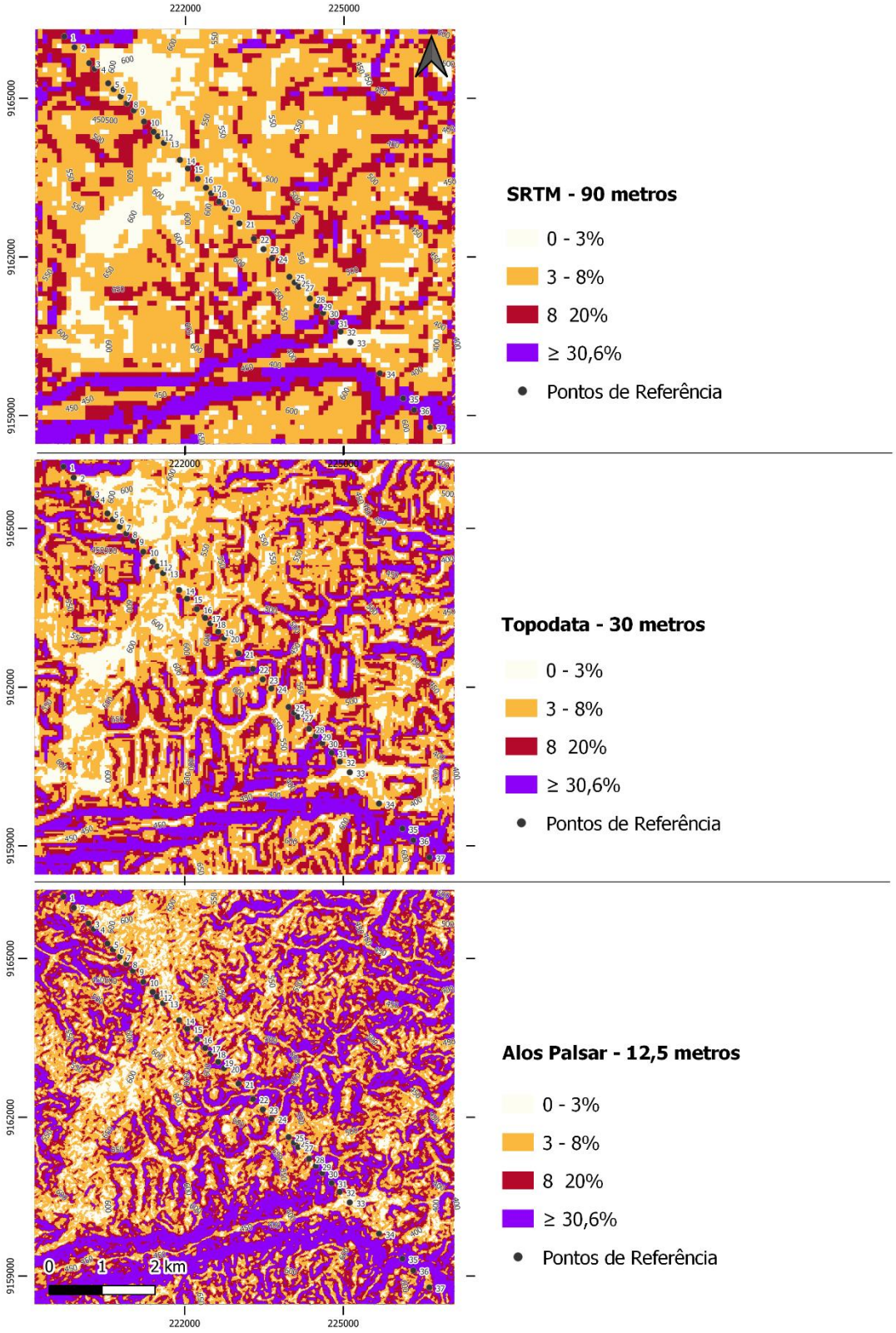

Figura 13: Mapas de declividade considerando cada MDE analisado e localização dos pontos de referência.
Fonte: A autora.

Nos mapas (Figura 13) pode-se notar evidente predominância de áreas de declividade mais acentuada, >17%, no mapa originado do Alos Palsar, cuja resolução horizontal é mais refinada, 12,5 m, logo, fornece maior detalhamento do terreno. No mapa de declividade derivado do SRTM, com 90 metros de resolução, tem-se maior generalização das áreas planas, mais elevadas. Este ponto demanda atenção, considerando que declividade é uma variável bastante relevante em estudos de energia eólica, tanto para uma melhor modelagem do vento, quanto para identificar áreas de exclusão, por exemplo.

Tabela 6: Declividade dos pontos de referência em cada MDE analisado.

Pontos	X	Y	Declividade [%] (SRTM)	Declividade [%] (Topodata)	Declividade [%] (Alos Palsar)
1	219711	9166168	28,5	38,4	36,4
2	219904	9165962	13,7	10,5	17,6
3	220183	9165665	17,4	26,8	26,8
4	220283	9165558	25,8	28,7	36,4
5	220541	9165282	16,3	17,6	8,7
6	220645	9165171	18,2	21,3	15,8
7	220775	9165033	6,5	7,0	7,0
8	220897	9164902	23,7	30,6	15,8
9	221022	9164769	22,7	19,4	36,4
10	221219	9164558	20,6	17,6	15,8
11	221398	9164367	8,4	12,3	15,8
12	221479	9164281	14,0	12,3	15,8
13	221594	9164157	9,7	12,3	8,7
14	221898	9163833	7,9	8,7	26,8
15	222049	9163673	10,0	24,9	21,3
16	222233	9163476	12,3	24,9	44,5
17	222390	9163309	16,3	21,3	24,9
18	222489	9163203	14,2	14,1	0,0
19	222636	9163046	24,4	10,5	24,9
20	222747	9162927	12,1	19,4	28,7
21	223021	9162634	6,4	24,9	19,4
22	223294	9162343	18,8	30,6	42,4
23	223478	9162146	6,3	8,7	7,0
24	223640	9161973	22,3	15,8	14,1
25	223967	9161624	13,2	14,1	21,3
26	224067	9161518	12,9	21,3	23,1
27	224143	9161436	8,1	5,2	15,8
28	224353	9161212	12,0	17,6	24,9
29	224481	9161076	28,8	28,7	26,8
30	224605	9160943	26,2	28,7	14,1
31	224780	9160757	38,0	32,5	38,4
32	224935	9160590	6,0	10,5	7,0
33	225124	9160389	2,3	1,7	1,7
34	225678	9159798	19,5	10,5	12,3

Pontos	X	Y	Declividade [%] (SRTM)	Declividade [%] (Topodata)	Declividade [%] (Alos Palsar)
35	226119	9159326	56,8	70,0	67,5
36	226326	9159105	38,8	57,7	40,4
37	226630	9158782	11,8	32,5	17,6
Média	-	-	9,8	11,8	12,3

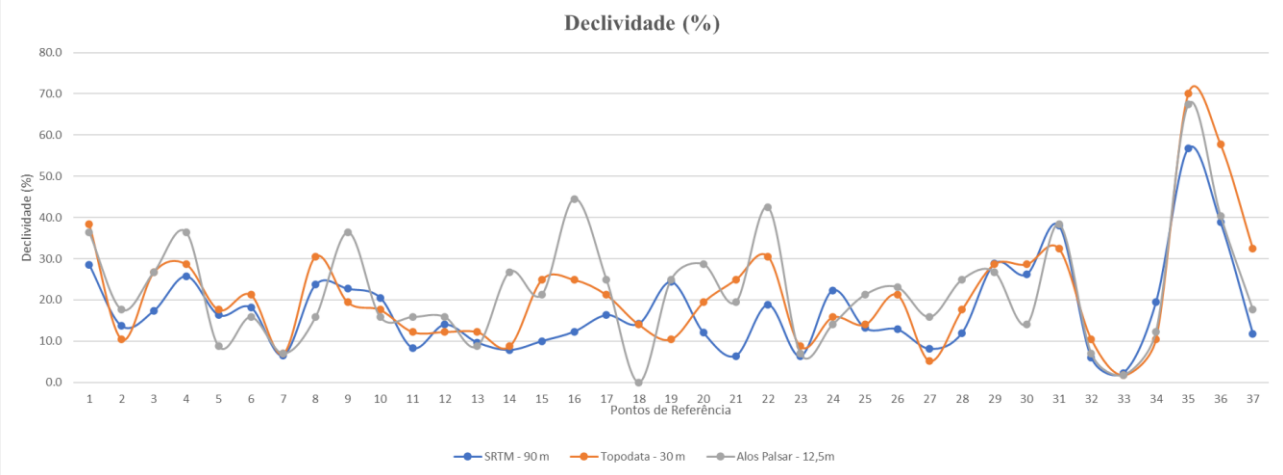

Figura 14: Variação de declividade em cada ponto de referência considerando cada MDE. Fonte: A autora.

Em relação a declividade, é possível constatar que as variações não se acompanham ao longo dos pontos (Figura 14), apesar de haver trechos com maior similaridade, como entre os pontos 31 e 33, que estão localizados em um vale, sendo possível observar nas análises de elevação apresentadas anteriormente. Há divergências significativas de declividade para um mesmo ponto, em relação aos três cenários, podendo chegar a uma diferença de 32,2%, como é o caso do ponto 16, que apresenta declividade de 12,3% no SRTM e 44,5% no Alos Palsar e isso se deve a baixa resolução do SRTM, cujo pixel mede 90 x 90 m, portanto, este tende a suavizar variações horizontais. Já nas áreas de vale, como nos pontos 31 a 33 citados anteriormente, ainda usando o Alos Palsar de referência, a diferença chega no máximo a 5,5%, no ponto 31, que tem declividade de 38% com o Alos Palsar e 32,5% com o Topodata. E o ponto com menor variação de declividade, é naturalmente o que se encontra no meio do vale, o ponto 33, com diferença de apenas 0,6% entre SRTM em relação ao Topodata e ao Alos Palsar.

Como principal resultado das simulações em modelo CFD, através do WindSim, foram gerados três mapas de recursos eólicos (Figura 15), resultantes das simulações com cada um dos MDE analisados, onde é possível visualizar as diferenças no fluxo do vento em toda área estudada.

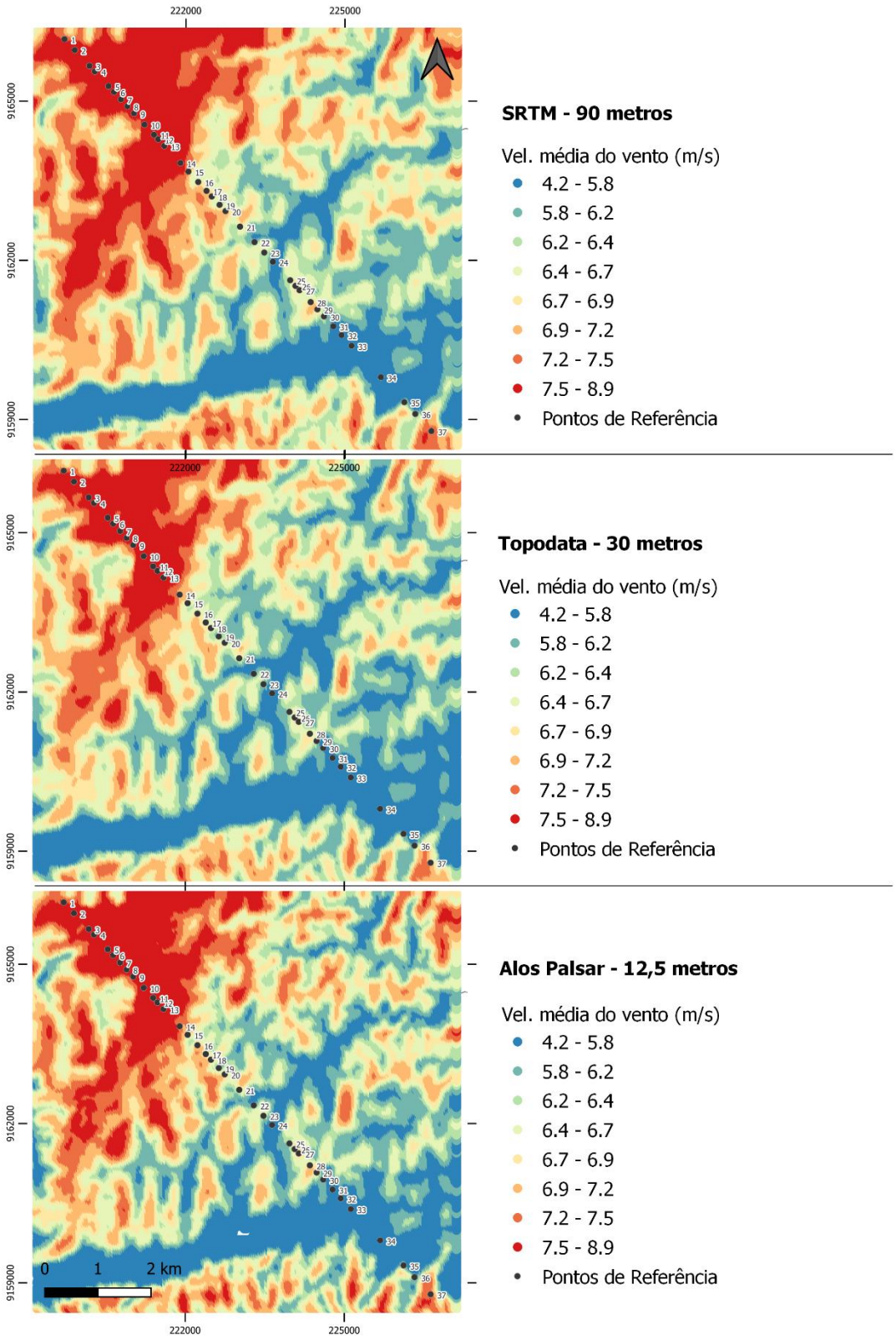

Figura 15: Mapas de recursos eólicos com variação de MDE e localização dos pontos de referência. Fonte: A autora.

Ao analisar os mapas (Figura 15) observa-se áreas com maior recurso eólico na região a noroeste, com o SRTM, em relação aos mapas com Topodata e Alos Palsar. Isto implica que o SRTM tende a superestimar a velocidade do vento nestas áreas, o que é um ponto a se ponderar, visto que a prioridade é uma melhor representação da realidade em estudos de estimativa de produção de energia. No mapa com o Alos Palsar, há maior presença de manchas de velocidade máxima nas áreas elevadas, enquanto o Topodata, que apresenta valores menores de altitude nesses picos, consequentemente, demonstra velocidades menores.

Tabela 7: Velocidade média do vento nos pontos de referência em cada MDE analisado.

Pontos	X	Y	Vel. Vento [m/s] (SRTM)	Vel. Vento [m/s] (Topodata)	Vel. Vento [m/s] (Alos Palsar)
1	219711	9166168	7,5	7,4	7,6
2	219904	9165962	8,3	8,1	8,4
3	220183	9165665	7,9	7,8	7,8
4	220283	9165558	8,2	8,0	7,9
5	220541	9165282	8,3	8,0	8,2
6	220645	9165171	8,1	7,7	8,0
7	220775	9165033	8,0	7,7	7,9
8	220897	9164902	7,9	7,9	7,9
9	221022	9164769	7,7	7,5	7,6
10	221219	9164558	7,5	7,7	7,7
11	221398	9164367	8,4	8,0	8,2
12	221479	9164281	8,5	8,3	8,5
13	221594	9164157	8,5	8,2	8,5
14	221898	9163833	7,6	7,3	7,5
15	222049	9163673	7,5	6,8	6,9
16	222233	9163476	6,6	6,8	6,9
17	222390	9163309	7,1	6,7	6,8
18	222489	9163203	7,1	6,8	7,0
19	222636	9163046	6,5	6,2	6,3
20	222747	9162927	7,0	6,7	6,9
21	223021	9162634	6,5	6,6	6,5
22	223294	9162343	6,1	5,8	6,0
23	223478	9162146	6,4	6,3	6,5
24	223640	9161973	5,9	5,4	5,5
25	223967	9161624	6,3	6,1	6,2
26	224067	9161518	6,6	6,6	6,4
27	224143	9161436	6,8	6,8	6,8
28	224353	9161212	6,8	6,8	6,9
29	224481	9161076	7,1	6,7	6,9
30	224605	9160943	6,3	5,8	6,1
31	224780	9160757	5,7	5,2	5,2
32	224935	9160590	4,9	5,1	5,0
33	225124	9160389	5,2	5,0	5,1
34	225678	9159798	5,3	5,1	5,1
35	226119	9159326	6,0	6,2	6,2

Pontos	X	Y	Vel. Vento [m/s] (SRTM)	Vel. Vento [m/s] (Topodata)	Vel. Vento [m/s] (Alos Palsar)
36	226326	9159105	6,5	5,8	6,4
37	226630	9158782	7,6	7,3	7,4
Média	-	-	7,0	6,8	6,9

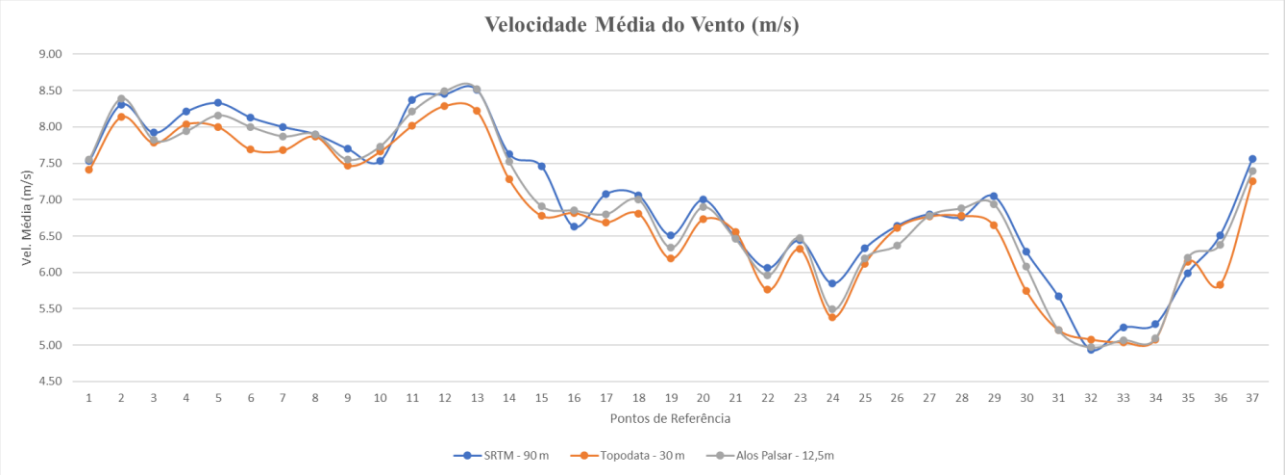

Figura 16: Variação da velocidade média do vento nos pontos de referências considerando cada MDE. Fonte: A autora.

Em relação a velocidade do vento estimada nos pontos de referência (Figura 16), tem-se variações sutis nas médias, com diferença máxima entre Topodata e SRTM, de apenas 0,2 m/s (Tabela 7). As velocidades se acompanham ao longo do gráfico, porém, assim como nas outras variáveis analisadas, há pontos que mostram maiores divergências, refletindo a diferença de resolução horizontal entre os MDEs utilizados. Deve-se ter cautela com modelos digitais de elevação que tendem a superestimar a velocidade do vento, como foi observado no mapa SRTM (Figura 15) e no gráfico acima, onde a linha correspondente ao SRTM se posiciona levemente acima das outras, enquanto o Topodata apresenta valores mais baixos.

Haja vista que as velocidades se acompanham e partindo da boa prática de optar por valores mais conservadores, em estudos eólicos, nesta variável, o Topodata – 30 m, com médias cerca de 2,5% mais baixas, obteve resultado mais interessante.

5. CONCLUSÃO

Diante das informações demonstradas, observa-se que os dados derivados dos Modelos Digitais de Elevação Alos Palsar-12,5, Topodata 30 e SRTM 90 m, foram satisfatórios em relação a representação do terreno, quando avaliados em relação a elevação, declividade e velocidade do vento, estimada nas simulações em que foram utilizados cada MDE. Em relação a altitude e a declividade, destaca-se melhor desempenho do Alos Palsar frente aos outros, ao representar o terreno de maneira mais detalhada, evidenciando com mais precisão

picos e vales, além de mostrar maior detalhamento na variação de declividade em todo o recorte espacial, quando comparado ao Topodata e ao SRTM, que tendem suavizar um pouco mais o terreno.

Nos comparativos das estimativas de velocidade média do vento, embora as médias tenham ficado bastante próximas, baseadas nos mapas eólicos gerados nas simulações com cada MDE, o Topodata demonstrou médias sutilmente mais baixas que os demais, característica positiva em um contexto de estudos em eólica.

É importante ressaltar que, para validação quanto ao melhor MDE a ser utilizado em um estudo, como em uma modelagem eólica, na ausência da possibilidade de realizar um levantamento topográfico em campo, a fim de obter dados de alta resolução, uma alternativa adequada seria através da obtenção, *in situ*, da altitude de pontos bem distribuídos em toda a área de interesse, para avaliar quais dos MDEs gratuitos disponíveis apresentam, nestes pontos, valores mais próximos aos medidos.

Reforça-se aqui a relevância do tema abordado, visto que melhorar os parâmetros de entrada de simulações de campo vento, como dados de topografia e rugosidade superficial, por exemplo, permite análises de recursos eólicos e predições de velocidade do vento mais próximas a realidade, que por sua vez, são essenciais para obter estimativas de produção de energia mais precisas, possibilitando modelagens econômicas mais confiáveis, ponto chave para investidores do setor.

REFERÊNCIAS

AEROESPACIAL. **Atlas Eólico e Solar de Pernambuco**. Recife, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA - ABEEÓLICA.

ANDRADE, **A. Avaliação do Potencial Eólico de uma região com topografia complexa através de CFD e metodologia de micro-siting**. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal de Pernambuco, 2021.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Participação de Empreendimentos nos Leilões de Energia no Brasil**. Brasília: EPE, 2018. p. 25.

CAMARGO, O. A. et al. **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul**. SEMC, agosto de 2002.

CANDEIAS, A. L. B.; SILVA, J. F. S.; MIRANDA, R. Q. **Análise dos Modelos Digitais de Elevação (PE3D, SRTM-30, SRTM-90, ASTER GDEM, TOPODATA, TANDEM-X, ALOS PALSAR e ALOS AW3D30) e a necessidade da produção de dados altimétricos em excelência no Brasil**. Revista Brasileira de Geomática, v. 10, n. 2, p. 46-62, 2022.

CASTRO, N. J.; DANTAS, G. A.; LEITE, A. L. S.; GOODWARD, J. **Perspectivas para a Energia Eólica no Brasil**. Rio de Janeiro: IBP, 2010.

COSTA, A. W. V. **Análise da influência da rugosidade superficial na simulação da camada limite atmosférica em uma topografia complexa empregando a dinâmica dos fluidos computacional**. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

CPRM. **Mapa de Declividade em Percentual do Relevo Brasileiro**. Rio de Janeiro: CPRM, 2010.

FARR, T.G. et al. **The shuttle radar topography mission**. Reviews of Geophysics, v. 45, 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA.
MAPBIOMAS. MapBiomas - **Coleção 5.0 dos dados de cobertura e uso do solo do Brasil**. São Paulo, 2021. Disponível em: https://mapbiomas.org/

SIMAS, M.; PACCA, S. **Energia Eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

STULL, R. **Meteorology for Scientists and Engineers**. Canada: University of British Columbia, 2011.

TROEN, L. B.; PETERSEN, E. L. **European Wind Atlas**. Dinamarca: Riso National Laboratory, 1989.

WALLBANK, T. WindSim Validation Study. WindSim AS, 2008.

ZHANG, M. H. **Wind Resource Assessment and Micro-Siting: Science and Engineering**. Singapura: John Wiley & Sons, 2015.

gov.br
Documento assinado digitalmente
CRISTIANA COUTINHO DUARTE
Data: 21/12/2023 15:26:47-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br