



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DANIEL PATRÍCIO ANDRADE FIGUEIREDO DINIZ

**CORRELAÇÃO ENTRE POSIÇÃO GEOGRÁFICA DOS PARQUES EÓLICOS E
MAPAS DE VENTO NO RIO GRANDE DO NORTE UTILIZANDO O QGIS**

ANGICOS

2023

DANIEL PATRÍCIO ANDRADE FIGUEIREDO DINIZ

**CORRELAÇÃO ENTRE POSIÇÃO GEOGRÁFICA DOS PARQUES EÓLICOS E
MAPAS DE VENTO NO RIO GRANDE DO NORTE UTILIZANDO O QGIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciências e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinicius Cândido Henriques

ANGICOS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

D184c Diniz, Daniel Patrício Andrade Figueiredo.
 CORRELAÇÃO ENTRE POSIÇÃO GEOGRÁFICA DOS
 PARQUES EÓLICOS E MAPAS DE VENTO NO RIO GRANDE DO
 NORTE UTILIZANDO O QGIS / Daniel Patrício Andrade
 Figueiredo Diniz. - 2023.
 56 f. : il.

 Orientador: Marcos Vinicius Cândido Henriques.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
 Tecnologia, 2023.

 1. Energia Eólica. 2. Velocidade do Vento. 3.
 Georreferenciamento. I. Henriques, Marcos
 Vinicius Cândido, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

 Biblioteca Campus Angicos
 Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
 CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

DANIEL PATRÍCIO ANDRADE FIGUEIREDO DINIZ

CORRELAÇÃO ENTRE POSIÇÃO GEOGRÁFICA DOS PARQUES EÓLICOS E MAPAS DE VENTO NO RIO GRANDE DO NORTE UTILIZANDO O QGIS

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciências e Tecnologia.

Defendida em: 05/10/2023.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
MARCOS VINICIUS CANDIDO HENRIQUES
Data: 20/10/2023 17:26:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcos Vinicius Cândido Henriques
Orientador – UFRSA



Documento assinado digitalmente
FRANCISCO EDCARLOS ALVES LEITE
Data: 11/10/2023 18:23:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Francisco Edcarlos Alves Leite
Membro Examinador – UFRSA



Documento assinado digitalmente
WIVALDO DANTAS DE ASEVEDO JUNIOR
Data: 22/10/2023 16:09:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wivaldo Dantas de Asevedo Junior
Membro Examinador – UFRSA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a Santo Antônio por todas oportunidades em minha vida e por me auxiliarem no decorrer do caminho dessa trajetória.

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos ao Professor Dr. Marcos Vinicius Candido Henriques, que desempenhou um papel fundamental na concepção, desenvolvimento e conclusão, compartilhando seu vasto conhecimento e contribuindo de maneira expressiva para a construção e realização deste trabalho.

Aos meus adorados companheiros, amigos de longa data, aliados incansáveis em nossas lutas compartilhadas e aos futuros colegas de profissão que fizeram parte desta jornada inesquecível. Onde, ajudaram a moldar os desafios e trabalhos árduos em histórias de triunfos e dedicação, tornando cada momento épico em nossa trajetória. Aos meus amigos que, de variadas maneiras, estiveram presentes e me apoiaram de forma fundamental, impulsionando-me a avançar com determinação.

Agradeço a todos professores e funcionários que estiveram presentes nesses períodos, e aos meus pais e familiares por me proporcionar essa realização.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

O presente trabalho busca analisar a relação entre as velocidades do vento e a potência eólica, tomando como referência medições feitas a alturas de 100 e 150 metros. Por meio da análise dos histogramas das velocidades do vento, foi possível identificar uma concentração significativa de potência eólica na altura de 150 metros, apontando para condições atmosféricas otimizadas para a geração de energia. Ao correlacionar as localizações de aerogeradores com um mapa de densidade de potência gerado a partir dessas informações, observou-se uma clara correspondência entre as características eólicas e as posições geográficas dos equipamentos. Tais observações respaldam a estratégia emergente de elevar a altura das turbinas eólicas, buscando velocidades de vento superiores, especialmente em regiões de maior altitude. Adicionalmente, este estudo evidenciou a eficácia da ferramenta QGIS na criação de mapas de densidade de potência a partir de dados eólicos, destacando sua relevância para o planejamento e implementação de futuros parques eólicos, tanto em áreas terrestres (*onshore*) quanto marítimas (*offshore*).

Palavras-chave: Energia Eólica, Velocidade do Vento, Georreferenciamento.

ABSTRACT

This present work aims to analyze the relationship between wind speeds and wind power, using measurements taken at heights of 100 and 150 meters as reference. By analyzing wind speed histograms, it was possible to identify a significant concentration of wind power at a height of 150 meters, indicating optimized atmospheric conditions for energy generation. When correlating the locations of wind turbines with a power density map generated from this information, a clear correspondence was observed between wind characteristics and the geographical positions of the equipment. Such observations support the emerging strategy of increasing the height of wind turbines to access higher wind speeds, especially in higher altitude regions. Additionally, this study highlighted the effectiveness of the QGIS tool in creating power density maps from wind data, underscoring its relevance for the planning and implementation of future wind farms, both onshore and offshore.

Keywords: Wind Energy, Wind Speed, Georeferencing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Tipos de Turbinas Eólicas.....	20
Figura 2	Tipos de Torres Eólicas.....	22
Figura 3	Altimetria do Rio Grande do Norte.....	27
Figura 4	Mapa de Rugosidade do Rio Grande do Norte.....	28
Figura 5	Interface <i>web</i> do Atlas Eólico do Rio Grande do Norte.....	33
Figura 6	Interface <i>web</i> do <i>Global Wind</i> Atlas.....	34
Figura 7	Camada Vetorial Sobreposta a uma Camada <i>Raster</i>	35
Figura 8	Recortar <i>Raster</i> Pela Camada de Máscara.....	36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Distribuição de Weibull.....	25
Gráfico 2	–	Distribuição da velocidade do vento e energia.....	25
Gráfico 3	–	Histograma da velocidade do vento a 100 m	40
Gráfico 4	–	Histograma da velocidade do vento a 150 m	42
Gráfico 5	–	Histograma da densidade de potência a 100 m.....	44
Gráfico 6	–	Histograma da densidade de potência a 150 m.....	46

LISTA DE MAPAS

Mapa 1	Mapa dos aerogeradores em atividade e em construção.....	38
Mapa 2	Mapa de velocidade do vento a 100 m de altitude.....	39
Mapa 3	Mapa de velocidade do vento a 150 m de altitude.....	41
Mapa 4	Mapa da densidade de potência a 100 m.....	43
Mapa 5	Mapa da densidade de potência a 150 m.....	45
Mapa 6	Mapa de Aerogeradores e densidade de potência a 100 m.....	47
Mapa 7	Mapa de Aerogeradores e densidade de potência a 150 m.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Densidade de Potência do Vento em Função da sua Velocidade.....	29
----------	---	---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	A Importância da Energia Eólica.....	15
1.2	Potencial Eólico do Rio Grande do Norte.....	16
2.	ENERGIA EÓLICA.....	17
2.1	Histórico da Energia Eólica	17
2.2	Tipos de Turbina.....	18
2.2.1	Turbinas de Eixo Vertical.....	18
2.2.2	Turbinas de Eixo Horizontal.....	19
2.3	Tipos de Torres	20
2.3.1	Torres Tubulares.....	20
2.3.2	Torres Reticuladas.....	21
2.3.3	Torres Espiadas.....	21
2.3.4	Torres de Geradores Offshore.....	21
3.	FATORES INFLUENTES NA ENERGIA EÓLICA.....	23
3.1	Temperatura.....	23
3.2	Pressão do Ar	23
3.3	Aceleração Centrípeta.....	24
3.4	Distribuição de Weibull.....	24
3.5	Direção do Vento.....	26
3.5.1	Lei de Betz.....	26
3.6	Rugosidade do Solo.....	26
3.7	Densidade de Potência.....	28
3.8	Perfil Vertical do Vento.....	29
4.	GEORREFERENCIAMENTO.....	31
4.1	Software QGIS.....	31
4.2	Formatos de Arquivos Usados Pelo QGIS.....	31
5.	METODOLOGIA.....	33
5.1	Atlas Eólico do RN.....	33
5.2	Global Wind Atlas.....	34
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51

REFERÊNCIAS.....	52
APÊNDICE A.....	55
APÊNDICE B.....	56

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica constitui em um tipo de energia alternativa gerada pela força do vento, ela é considerada limpa e renovável pois seu recurso é inesgotável. De início a energia eólica tinha grande utilidade nas embarcações movidas a vela, na moagem de grãos e outras atividades (RODRIGUES et al. 2017).

No Brasil, existe um grande potencial de produção dessa energia, com destaque nas regiões norte e nordeste, isto se deve ao fato de o Brasil, quando comparado aos outros países, possui o dobro do volume de vento, e essas condições favoráveis asseguram eficiência na geração de eletricidade por meio da fonte eólica (SAMPAIO et al. 2021).

O Rio Grande do Norte é uma das regiões com maior potencial eólico do Nordeste e do Brasil. A sua localização geográfica favorece a ação de massas de ar tanto em sua faixa litorânea como também em seu interior, proporcionando condições favoráveis para produção dessa energia (RODRIGUES et al. 2017).

Ao mapear o potencial elétrico do Rio Grande do Norte, foram identificadas áreas favoráveis para o desenvolvimento de empreendimentos eólicos. Para avaliar a viabilidade técnica e econômica de implantar usinas eólicas nessas áreas, é necessário realizar medições anemométricas e desenvolver modelos de terreno em alta resolução.

1.1 Importância da Energia Eólica

A energia eólica proporciona uma ampla gama de benefícios em sua geração, destacando-se a não emissão de gases poluentes na atmosfera, incluindo o dióxido de carbono. Esse gás desempenha um papel fundamental no agravamento do efeito estufa, que, por sua vez, é o principal responsável pelas mudanças climáticas globais, onde pode acarretar consequências potencialmente desastrosas. Portanto, investir na energia eólica é uma escolha sustentável e inteligente, pois contribui para a preservação do meio ambiente, reduzindo significativamente os impactos negativos causados pelas emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a energia eólica é uma fonte renovável, inesgotável e altamente eficiente, o que torna sua utilização ainda mais vantajosa do ponto de vista energético e ambiental (TERCIOTE, 2002).

A diversificação do suprimento de energia por meio da energia eólica desempenha um papel fundamental no aumento da segurança e estabilidade energética. Sua capacidade de integração com a rede elétrica existente a torna uma opção flexível e confiável. Além disso, a geração eólica possui uma emissão mínima de poluentes, o que resulta em benefícios

ambientais significativos, como a redução das emissões de gases de efeito estufa e a mitigação dos impactos correspondentes às mudanças climáticas globais. Ademais, a utilização da energia eólica contribui para a diminuição da dependência de combustíveis fósseis, o que traz vantagens ambientais e econômicas a longo prazo (TERCIOTE, 2002).

1.2 Potencial Eólico do Rio Grande do Norte

No Nordeste brasileiro, especialmente nessa região, a produção de energia elétrica tinha sua origem fundamentalmente na hidroeletricidade, com principal destaque atribuído ao Rio São Francisco como seu provedor central. Entretanto, essa superioridade tem passado por transformações substanciais recentemente. A energia eólica emergiu como uma grande força promissora, representando atualmente 35,63% da capacidade instalada no Nordeste. De fato, nos últimos anos, a energia eólica tem desempenhado o papel essencial na geração de eletricidade, contribuindo de maneira relevante na região. Um exemplo desse potencial é visível em 2018, quando essa fonte foi responsável por mais da metade do suprimento total no Subsistema Nordeste (BEZERRA et al. 2019).

O estado do Rio Grande do Norte é amplamente reconhecido pelo seu clima predominantemente quente e semiárido, que abrange a maior parte de seu território. De acordo com as pesquisas de Rodrigues e Aquino (2013), cerca de 93% de sua extensão está inserida nessa zona semiárida, a qual se altera para um clima quente semiúmido ao longo da faixa litorânea oriental. O estado possui uma localização geográfica privilegiada que potencializa a influência das correntes de vento, tanto ao longo de seu litoral quanto em grande parte de seu interior. Como resultado dessa condição favorável, evidencia um significativo poder de produção de energia eólica, que se caracteriza apropriado para investimentos na exploração da geração de energia elétrica a partir dos ventos em diversas áreas no estado (DANTAS et al. 2021).

Há possibilidade de o estado se dispor das condições ventosas mais propícias em todo o território nacional para a implantação de empreendimentos eólicos destinados à produção de energia elétrica. É de relevância enfatizar que o padrão de ventos dentro de sua demarcação exibe uma sazonalidade marcante, onde seus maiores índices prevalecem no período de agosto a novembro, enquanto as correntes com menores intensidades predominam nos meses compreendidos entre fevereiro e maio (DANTAS et al, 2021).

2. ENERGIA EÓLICA

Uma fonte promissora de energia renovável para a produção de eletricidade é a energia eólica, com crescimento global devido à eficiência e disponibilidade. A tendência é que aconteça uma expansão significativa, reduzindo emissões e impulsionando o desenvolvimento econômico. É uma das fontes renováveis mais favoráveis, e seu uso crescente está ligado à conscientização ambiental e ao desenvolvimento sustentável (TERCIOTE, 2002).

O mapa de vento é uma representação gráfica da direção e intensidade do vento em uma região. Esses mapas geralmente são criados baseados nos dados de medição de vento em estações meteorológicas terrestres ou a partir de modelos numéricos de previsão do tempo. Eles possuem a finalidade de mostrar onde o vento é mais forte ou mais constante em uma determinada área, o que ajuda a identificar locais com potenciais para a construção de parques eólicos (MARTINS et al. 2008).

2.1 Histórico da Energia Eólica

A conversão da energia eólica, oriunda das correntes de ar, é uma prática milenar da humanidade. Inicialmente, os moinhos de vento foram empregados para moer grãos e bombear água em atividades agrícolas, marcando as pioneiras funcionalidades dessa fonte de energia. Com o passar do tempo, a força dos ventos impulsionou o desenvolvimento da navegação e desempenhou um papel crucial durante o período das grandes descobertas de novos continentes (MARTINS et al. 2008).

Uma aplicação que ganha cada vez mais importância a cada dia é a exploração da energia eólica como fonte alternativa para a produção de eletricidade. Há muitos anos, estudos visando à conversão da energia cinética dos ventos em eletricidade vêm sendo desenvolvidos. Atualmente, a energia eólica é amplamente reconhecida como a fonte renovável mais promissora para a produção de eletricidade no curto prazo, levando em consideração aspectos essenciais como segurança energética, impacto socioambiental e viabilidade econômica. A crescente demanda por soluções sustentáveis e a conscientização sobre a importância de fontes de energia limpa impulsionam ainda mais o potencial da energia eólica como uma fonte vital para o futuro da geração de eletricidade (MARTINS et al. 2008).

Na Dinamarca, em 1980, teve início um notável avanço na utilização da energia eólica como fonte alternativa para a geração de eletricidade, com as primeiras turbinas sendo fabricadas por algumas companhias de equipamentos agrícolas. Embora essas turbinas tivessem uma capacidade de geração consideravelmente reduzida naquela época (30-55 kW)

em comparação com os valores atuais, o setor experimentou um crescimento significativo impulsionado por políticas internas. Hoje, a Dinamarca destaca-se como um dos principais usuários de energia eólica em sua base energética e, é reconhecida como o maior fabricante mundial de turbinas eólicas. Esses avanços representam uma história de sucesso inspiradora para o setor de energia limpa, enfatizando como a visão estratégica e o comprometimento com tecnologias sustentáveis, que reduzem a emissão de gases poluentes, podem impulsionar a transição para um futuro mais verde e resiliente (MARTINS et al. 2008).

2.2 Tipos de Turbina

As instalações eólicas representam grande sofisticação e evolução, demandando um enfoque acerca de seu aprimoramento tanto no âmbito financeiro de seu desenvolvimento, como em sua eficiência operacional. Os aerogeradores, que fazem a formação desses sistemas, consistem em três membros indispensáveis: a torre, o rotor e a nacelle. Esta estrutura é localizada na parte superior da torre. Na *nacelle*, estão contidos diversos membros necessários para realização da conversão da energia cinética do vento em energia elétrica utilizável. Os elementos primordiais que caracterizam a turbina abrangem o rotor, o sistema de transmissão, o gerador, componentes eletrônicos, sistemas de controle, transformador e a interligação com a rede elétrica (OLIVEIRA et al. 2019).

2.2.1 Turbinas de eixo vertical (VAWT)

Durante o século XX, foram projetados e submetidos a avaliação modelos de turbinas equipadas com rotores de eixo vertical. Apresentando uma referência característica em C no formato das pás, essas turbinas foram particularmente concebidas para operar de maneira alinhada com a direção predominante do vento correspondente, contrastando com o disposto perpendicular das turbinas de eixo horizontal. A principal vantagem dessa categoria de turbinas reside na facilidade da acessibilidade ao gerador e à engrenagem, uma vez que esses componentes estão localizados em alturas inferiores. Ademais, por esse tipo de configuração não há necessidade de um mecanismo de orientação do rotor em relação ao vento (OLIVEIRA et al. 2012).

Todavia, as turbinas de eixo vertical têm desvantagens significativas, como a necessidade de um desmonte total para manutenção ou troca do rolamento principal do rotor, onde eleva o tempo de mão de obra e, conseqüentemente aumenta o tempo em que a mesma permanece inoperante. Além disso, devido à menor altura do rotor em relação ao solo, onde a velocidade do vento possui menos intensidade, a eficiência desse tipo de turbina é prejudicada

se comparado a alturas mais elevadas. Isso resulta em uma eficácia inferior comparada às turbinas de eixo horizontal, o que as coloca em posição desfavorável e as torna menos práticas (OLIVEIRA et al. 2012).

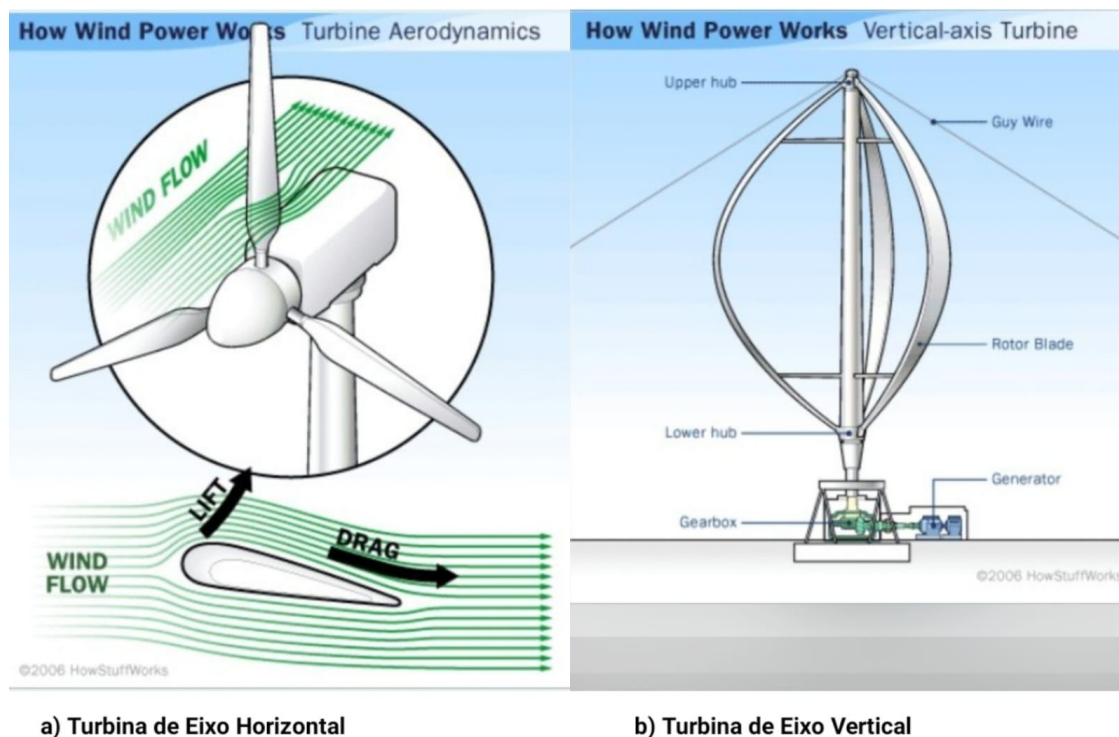
2.2.2 Turbinas de eixo horizontal (HAWT)

As turbinas eólicas de eixo horizontal são o tipo de turbina com maior predominância em operação, exemplificado pelo modelo dinamarquês. Esse modelo se caracteriza pelo alinhamento do eixo da turbina em paralelo com a direção do vento, enquanto as pás funcionam de forma perpendicular a essa direção. Nesse modelo de turbina, a inclusão de um mecanismo que permita e auxilie o alinhamento preciso com a direção do vento torna-se relevante (OLIVEIRA et al. 2012).

Dentro do contexto das turbinas de eixo horizontal, encontramos duas categorias de rotores empregadas: os alinhados a favor do vento e os contrários ao vento. Na primeira abordagem, o rotor é posicionado no lado oposto à direção predominante do vento, também conhecido como o lado de sotavento da torre. No entanto, essa configuração revela-se inadequada, pois o rotor acaba situado na "sombra do vento", uma região em que a velocidade do vento sofre uma considerável redução devido à interferência da torre, diminuindo assim sua eficiência de produção. Esse fenômeno além de decrescer a capacidade da conversão de energia, também traz consigo maiores desgastes de natureza estrutural. O segmento da torre impactada pelo vento fica sujeita a forças de compressão de maior intensidade, agravadas pelo momento gerado pela força do vento e pelo peso do rotor (OLIVEIRA et al. 2012).

Em contrapartida, os rotores posicionados contra o vento, ou seja, a barlavento da torre, se dispõe de uma vantagem. Aproveitando o peso do próprio rotor, eles possuem a capacidade de equilibrar de maneira mais eficaz as forças de compressão e tração que agem nas paredes da torre. Idealmente, os rotores orientados a favor do vento não requerem um mecanismo de orientação ativo, uma vez que podem ser direcionados passivamente pela corrente de ar. No entanto, quando a nacelle (parte superior da turbina) permanece fixa em uma única direção durante sua operação por um período prolongado, os cabos elétricos no interior da torre podem vir a sofrer torções, se tornano necessário, portanto, a implementação de um sistema de orientação análogo ao utilizado nos rotores a contravento para preservação dos componentes internos e uma maior durabilidade durante seu funcionamento (OLIVEIRA et al. 2012).

Figura 1: Tipos de Turbinas Eólicas.



Fonte: Adaptado de Julia Layton (2006).

2.3 Tipos de Torres Eólicas

2.3.1 Torres tubulares

As torres tubulares são o tipo de corpo mais comum e amplamente empregado no erguimento de aerogeradores. Elas consistem em divisões projetadas com design semelhante a forma cônica, que atingem até 30 metros de comprimento, as quais são montadas através de conexões parafusadas no local de instalação. A extensão máxima destas estruturas é determinada pelas limitações estabelecidas ao transporte. À medida em que se observa do ponto superior da torre em direção à base, o diâmetro da mesma cresce gradativamente. Essa configuração é otimizada para suportar as tensões de compressão e o momento resultante das forças do vento, que são mais intensas na parte inferior. Embora ocorra uma ampliação na espessura da estrutura ao longo do percurso de cima para baixo, o incremento no diâmetro na parte mais próxima ao solo desempenha um papel crucial na atenuação dessas variações na espessura. Essa característica não apenas contribui para equilibrar as tensões, mas também permite uma redução na utilização de aço, resultando em custos menores. O ponto mais notável das torres tubulares, quando comparadas a outras com características distintas, é a

garantia de acesso seguro e confortável tanto à torre quanto à nacelle, proporcionando um diferencial significativo em termos de segurança e praticidade (OLIVEIRA et al. 2012).

2.3.2 Torres reticuladas

As torres reticuladas são estruturas elaboradas a partir da união de componentes de aço, sendo comum a utilização dos segmentos com a modelagem em formato de L. A principal vantagem inerente a essas torres reside na significativa diminuição do capital empregado, já que requerem aproximadamente metade da quantidade de aço utilizada na composição das torres tubulares. Adicionalmente, apresentam uma menor área de contato com o vento, diminuindo assim o atrito com o mesmo, uma vez que não estão sujeitas a cargas horizontais de magnitude comparável às observadas nas torres tubulares. É importante destacar, entretanto, que o aspecto estético destas torres tem sido tradicionalmente considerado uma desvantagem, o que por fim levou à sua diminuição em uso ao longo do tempo (OLIVEIRA et al. 2012).

2.3.3 Torres espiadas

Para conversão da força do vento em energia elétrica a baixos níveis de altura, efetuou-se uma certa adoção destas torres específicas, as quais são compostas por um mastro com encurtado diâmetro, mantido em um nível constante por cabos de aço ancorados ao solo. A principal vantagem dessas torres estreitas é o custo significativamente mais baixo devido à sua estrutura de peso reduzido. Contudo, uma desvantagem associada é a complexidade no acesso às demais partes dessas torres (OLIVEIRA et al. 2012).

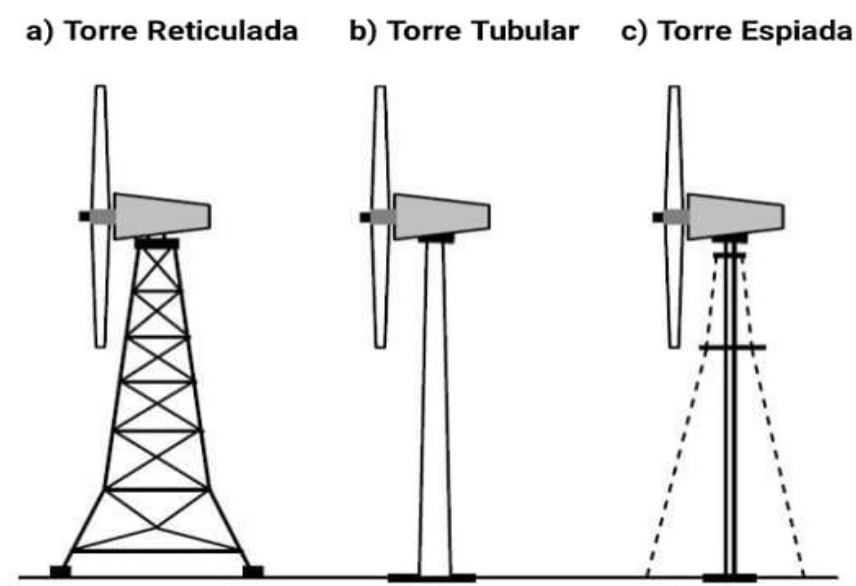
2.3.4 Torres de geradores *offshore*

Nas torres *offshore* o modelo predominante para aerogeradores neste ambiente é o chamado "monopile" (mono-estaca), desenvolvida com uma modelagem de um tubo, semelhante às torres onshore, tendo o aço como seu material de composição, com diâmetros atribuídos entre 2.5 e 4.5 metros, sendo o seu assentamento instalado a uma profundidade entre 10 a 20 metros no substrato oceânico. A efetivação desse tipo de empreendimento requer a utilização de maquinário de perfuração, especialmente quando confrontado com terrenos compostos por densas formações rochosas. Além disso, é necessário empregar máquinas de cravação de estacas de dimensões substanciais para assegurar a fixação adequada das estruturas. Por esses motivos, as torres com essas características não se mostram viáveis

para terrenos excessivamente rochosos, configurados por rochas de grandes proporções (OLIVEIRA et al. 2012).

Uma outra abordagem amplamente empregada em torres *offshore* é a Estrutura de Gravidade, comumente desenvolvida em betão armado, embora também com a possibilidade de ser confeccionada em estrutura de aço. Essas estruturas beneficiam-se do próprio peso para fornecer estabilidade ao corpo, vindo a incluir o lastro, que combinados com uma base de extensa superfície, além de fornecer estabilidade, essa base confere à estrutura a capacidade de resistir ao momento de inclinação gerado pelas intensas rajadas de vento, facilitando a distribuição das forças transmitidas até as instalações mais profundas. A dimensão dessa base, cujo diâmetro possui uma variação entre 12 a 18 metros, é complementada por um peso que normalmente encontra-se entre 500 e 1000 toneladas (OLIVEIRA et al. 2012).

Figura 2: Tipos de Torres.



Fonte: Adaptado de (MATHEW, 2006).

3. FATORES INFLUENTES NA ENERGIA EÓLICA

A energia eólica é a forma de energia que emerge da captação e conversão da energia cinética contida nas massas de ar em movimento, ou seja, a partir do vento. Nesse contexto, os fatores meteorológicos adquirem um papel de destaque, uma vez que são os principais catalisadores e condutores que proporcionam a eficiência desse processo. Os ventos encontram sua origem na dinâmica resultante das flutuações na pressão atmosférica entre duas regiões geograficamente separadas. Tanto os fatores de grande escala, que englobam vastas extensões geográficas, quanto os fatores de pequena escala, que operam em âmbitos mais localizados, desempenham papéis cruciais no processo de geração dos ventos predominantes. Além disso, as estruturas topográficas da área em diferentes escalas também exercem interferência significativa na criação e intensidade dos ventos locais (BARROS, 2020).

3.1 Temperatura

Em virtude da ocorrência de maiores temperaturas, as correntes de ar com intensidades superiores manifestam-se durante o período diurno. Além do mais, ocorre uma assimetria de temperatura entre as massas de ar, a qual desempenha um papel fundamental na modulação da intensidade na velocidade do vento. A notável distinção térmica entre as massas de ar, afeta a dinâmica do vento de maneira significativa. Especificamente, uma massa de ar com temperatura mais elevada apresenta uma densidade inferior quando comparada a uma massa de ar mais fria. Consequentemente, a convergência entre massas de ar que apresentam disparidades de temperatura provoca o surgimento de correntes de ar. A interação entre uma massa de ar frio e uma massa de ar quente ou o inverso, induzirá igualmente a formação de ventos, impactando a eficiência da geração de energia eólica de forma notável (BARROS, 2020).

3.2 Pressão do ar

Ao passo que a altitude se eleva, a intensidade da massa de ar diminui, ocorrendo uma redução na pressão atmosférica. No plano terrestre, uma variedade de configurações topográficas se faz presente. De maneira característica, é comum observar que as massas de ar percorrem um padrão horizontal, direcionando-se dos locais de alta pressão atmosférica em direção aos locais de baixa pressão, essa propagação de ar ocorre devido à uma busca de equilíbrio no sistema atmosférico. A velocidade do vento é um fenômeno atmosférico que tem início devido à variação na pressão do ar entre diferentes áreas. Quanto mais considerável for

essa disparidade, maior será a intensidade do vento, o que consequentemente impulsiona a conversão em energia elétrica na área em questão. A relação entre a intensidade do vento e a produção de energia eólica é fundamental para a exploração desse recurso renovável (BARROS, 2020).

3.3 Aceleração centrípeta

A aceleração centrípeta é um conceito fundamental na dinâmica dos fluidos atmosféricos e desempenha um papel crucial no comportamento do vento. A aceleração centrípeta é a aceleração que atua em direção ao centro de uma trajetória curva ou circular, é necessária para manter um objeto em um movimento circular, ela tem uma relação direta com a velocidade e a direção do vento. À medida que o ar se desloca horizontalmente na atmosfera, ele está sujeito a essa aceleração, que resulta da curvatura da superfície terrestre fazendo com que o ar se mova em direção ao centro de rotação, que pode ser uma região onde ocorra diferentes tipos de pressão, a aceleração centrípeta faz com que o vento aumente sua velocidade (BARROS, 2020).

A força de Coriolis desempenha um papel crucial na dinâmica das correntes de convecção em fluidos, que se constituem em fenômenos meteorológicos, afetando a circulação atmosférica, padrões de brisas e correntes marítimas. Essa força, originada da rotação da Terra, influencia a direção dos ventos, sistemas climáticos e a circulação de correntes oceânicas, sendo essencial para a compreensão e regulação do clima e circulação de fluidos na Terra (BORGES et al. 2010).

3.4 Distribuição de Weibull

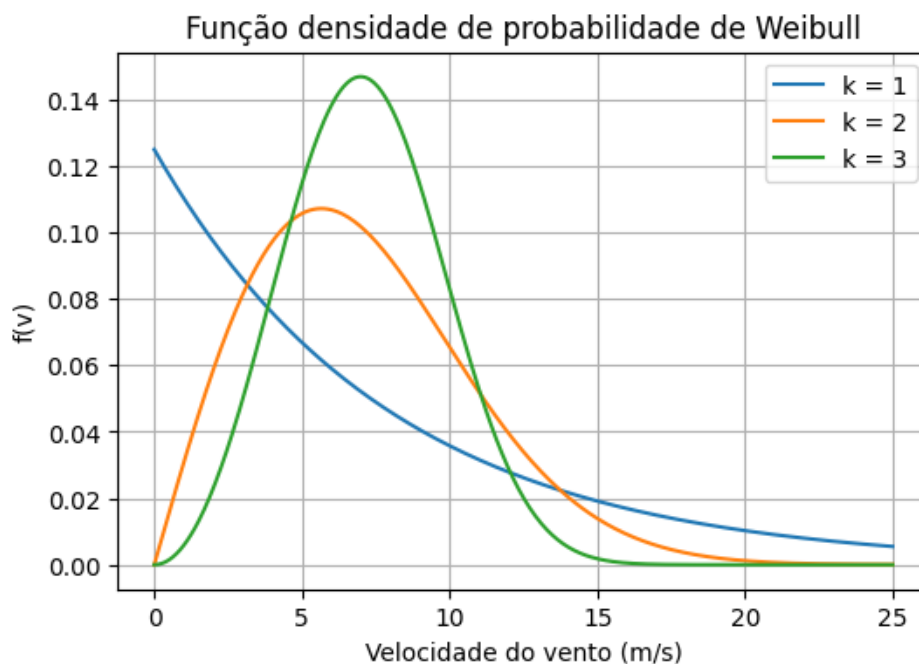
A distribuição de Weibull tem sido destacada por sua eficácia em representar a distribuição das velocidades do vento, especialmente em intervalos horários e decimais. A função densidade de probabilidade de Weibull pode ser representada por (PINTO, 2013):

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$

Onde v é a velocidade do vento em m/s, k é conhecido como o fator de forma e c é chamado de fator de escala.

O gráfico 1 apresenta a distribuição de Weibull, para três versões do fator de forma k , com o fator de escala c fixado em 8. As curvas representam as diferentes características das velocidades do vento em função do fator de forma.

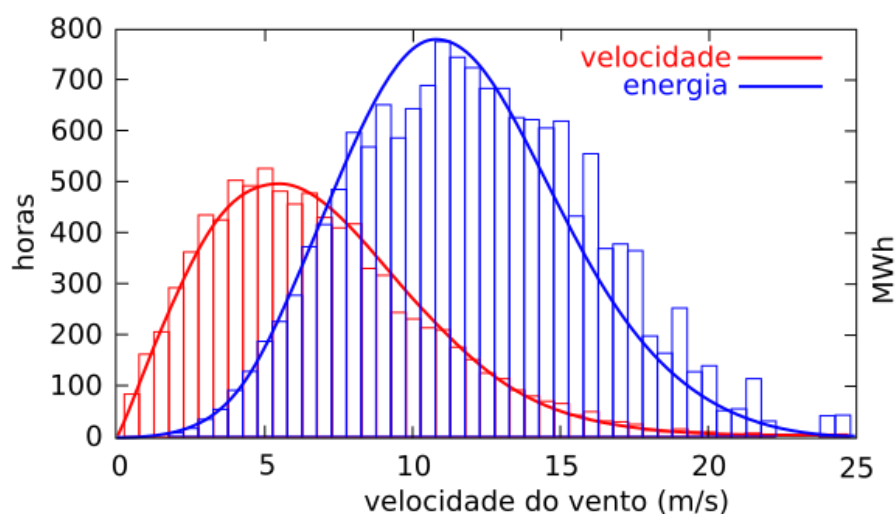
Gráfico 1- Distribuição de Weibull para $k = 1, 2, 3$ com $c = 8$. As curvas representam variações na caracterização das velocidades do vento.



Fonte: Própria.

Em situações onde há escassez de detalhes sobre o perfil do vento, uma abordagem pragmática é adotar $k = 2$, em que a função se alinha com a distribuição de Rayleigh. O gráfico 2 apresenta um exemplo de ajuste da distribuição de Rayleigh a dados reais coletados no complexo Lee Ranch no Colorado.

Gráfico 2- Distribuição da velocidade do vento (vermelho) e energia (azul) em 2002 no Lee Ranch, Colorado. Histograma mostra dados medidos e a curva indica o modelo de Rayleigh para a mesma velocidade média.



Fonte: Adaptado de WIKIMEDIA (2023).

3.5 Direção do Vento

3.5.1 Lei de Betz (1926)

Uma corrente de ar ao passar sobre uma turbina eólica, o rotor desempenha um papel crucial na extração da energia do vento para a geração de eletricidade. A lei de Betz nos instrui que, à medida que o vento flui sobre as lâminas, ocorre uma conversão de energia cinética em energia mecânica, acontecendo assim uma absorção de parte da energia dessa corrente, ocasionando a diminuição da velocidade do ar, no qual devido a essa perda de energia ao entrar em contato com a turbina, a intensidade da corrente tem maior valor antes do contato com o rotor do que após, devido a extração de parte dessa energia. Essa energia mecânica é então utilizada para girar o rotor da turbina (CHRISTÓFARO, 2010).

Este princípio também demonstra que, dentro de uma corrente de vento, cerca de 59,3% da potência total disponível pode ser efetivamente utilizada, com a outra parte da energia sendo dissipada e perdida durante o processo de passagem pelo rotor da turbina, transformando-se em turbulência, em vez de ser convertida em energia mecânica aproveitável. Esse limite de eficiência é conhecido como "Rendimento Limite de Betz" e representa a quantidade de eficiência máxima que uma turbina pode alcançar. Esse rendimento máximo é alcançado quando a velocidade do vento que emerge da turbina é reduzida para aproximadamente um terço da velocidade inicial que penetra na turbina (CHRISTÓFARO, 2010).

3.6 Rugosidade do solo

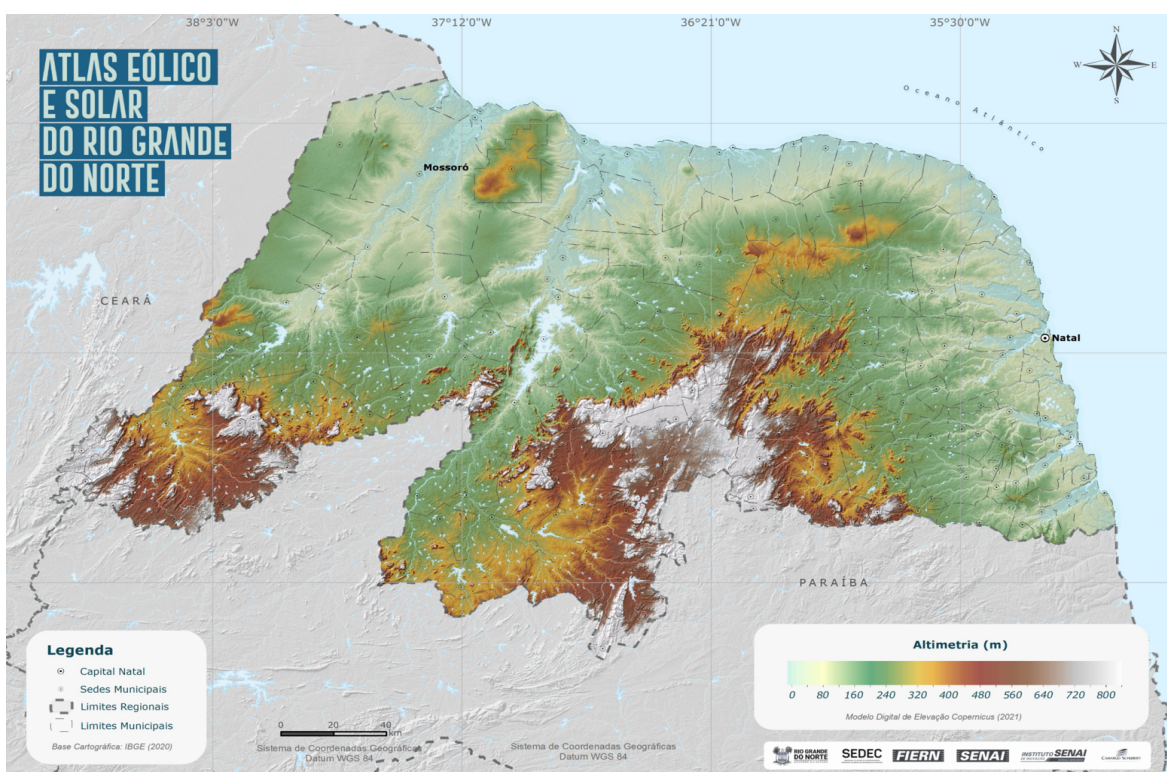
A escolha do local para instalar turbinas eólicas é fundamental para otimizar a geração de eletricidade a partir do vento, seja em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*). As características do terreno, a topografia e ventos desempenham um papel fundamental. Em ambientes *onshore*, terrenos planos e ventos constantes são ideais, enquanto em ambientes *offshore*, a profundidade do mar e as condições do leito são cruciais. Aspectos ambientais e regulatórios também influenciam a escolha do local, a localização adequada é crucial para maximizar a eficiência e sustentabilidade da geração de energia eólica (PINTO, 2017).

A rugosidade do terreno, está ligada à irregularidade da superfície, tornando-se primordial na avaliação da viabilidade da geração de energia eólica. Áreas irregulares com consideráveis oscilações topográficas, reduzem a eficiência das turbinas eólicas, enquanto áreas com terrenos constantes possibilitam uma produção de energia mais eficiente e estável.

Portanto, a escolha de locais com menor rugosidade, promove a otimização da geração de energia eólica (PINTO, 2017).

A Figura 3 oferece uma representação visual abrangente das características topográficas que abrange a totalidade do estado do Rio Grande do Norte. Neste cenário, ela cumpre a função de realçar as áreas que se destacam por suas elevações mais notáveis, contribuindo para uma compreensão mais profunda e detalhada da geografia do estado.

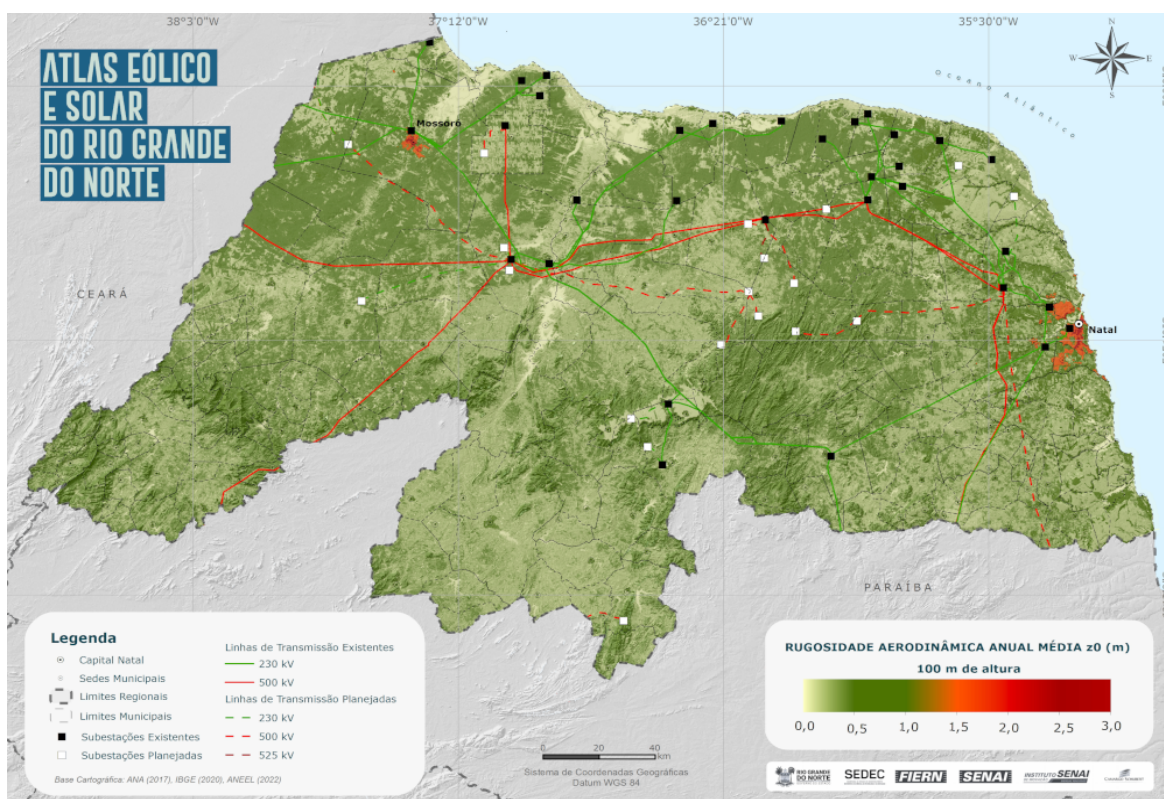
Figura 3 - Mapa de altimetria do Rio Grande do Norte.



Fonte: Retirado de (ATLAS EÓLICO, 2023).

Na Figura 4, é possível realizar uma análise detalhada da rugosidade aerodinâmica no estado. Esta representação visual revela de que maneira as características da superfície terrestre exercem influência direta sobre o padrão de movimento do ar na região. Através da legenda adotada, é possível discernir e identificar as particularidades de cada localidade, destacando como a irregularidade ou suavidade das superfícies impactam a dinâmica atmosférica específica de cada área. Esta visualização valiosa proporciona percepções cruciais para estudos meteorológicos, climáticos e para a compreensão das interações entre a topografia e o comportamento do vento em diferentes regiões do estado.

Figura 4- Mapa de rugosidade do Rio Grande do Norte



Fonte: Retirado de (ATLAS EÓLICO, 2023).

3.7 Densidade de Potência

Levando em consideração que regiões geográficas com velocidades médias de vento semelhantes são capazes de manifestar oscilações de potenciais de energia eólica em virtude das flutuações na densidade do ar, torna-se necessário adotar uma abordagem mais precisa na análise do potencial eólico em tais localidades. Isso pode ser alcançado por meio da análise da relação entre a potência gerada e a área disponível, em outras palavras, pela avaliação da densidade de potência (P/A) como expresso pela eq. (1):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (1)$$

Onde P é a potência incidente (W), ρ é a densidade do ar (kg/m^3), A é igual a área de abrangência do rotor (m^2) e v é a velocidade do vento (m/s). A relação P/A representa a potência disponível no vento incidente na frente da turbina, e esta potência diversifica de maneira linear com a densidade e com a velocidade do vento. A potência disponível no vento é uma função do cubo da velocidade do vento, isso significa que pequenas alterações na velocidade do vento resultam em variações substanciais na potência eólica. Observar-se que, nem toda a potência disponível no vento pode ser aproveitada, as turbinas eólicas possuem

aptidão para usufruir apenas uma parte dessa potência. A porção restante da potência, que não é capturada pelas pás do rotor, é conduzida pelo ar que passou pelas pás, resultando em uma diminuição na sua velocidade (FADIGAS, 2011).

A partir da eq. (1), considerando a densidade do ar ρ como sendo $1,21 \text{ kg/m}^3$, constrói-se a tabela 1.

Tabela 1 - Densidade de potência do vento em função da sua velocidade. Os valores foram calculados usando uma densidade do ar de $1,21 \text{ kg/m}^3$.

Velocidade do Vento (m/s)	Densidade de Potência (W/m²)
3,0	16,34
4,0	38,72
5,0	75,63
6,0	130,68
7,0	207,52
8,0	309,76
9,0	441,05
10,0	605,00
11,0	805,26
12,0	1045,44

Como pode-se observar na tabela 1, devido à natureza cúbica da relação entre a densidade de potência e a velocidade do vento, há um aumento exponencial à medida que a velocidade do vento aumenta. Em velocidades mais baixas, como 3 m/s , a densidade de potência é relativamente modesta, com um valor próximo de 16 W/m^2 . Ao dobrar a velocidade do vento de 3 m/s para 6 m/s , a densidade de potência multiplica-se por mais de oito vezes, alcançando cerca de 130 W/m^2 .

3.8 Perfil vertical de vento

A relação entre a velocidade do vento e a altura, conhecida como *perfil vertical de vento*, desempenha um papel fundamental na geração de energia eólica. Em altitudes mais elevadas, a velocidade do vento aumenta devido à diminuição do atrito com a superfície terrestre e obstáculos, como árvores e edifícios. Como a potência extraída do vento é proporcional ao cubo da sua velocidade, pequenos aumentos na velocidade podem resultar em produções significativamente mais elevadas de energia. Por este motivo, turbinas modernas são projetadas com torres mais altas para alcançar camadas atmosféricas onde o vento é mais

forte e consistente. Contudo, deve-se equilibrar os benefícios energéticos com os custos associados a tais *designs*.

4. GEORREFERENCIAMENTO

O Georreferenciamento é um processo altamente preciso que envolve a identificação exata da posição geográfica de pontos específicos na superfície da Terra, alcançada através da utilização das coordenadas geodésicas, formando um conjunto de valores numéricos que descrevem latitude, longitude e altitude. Esse método possibilita a criação de um sistema de referência geográfica confiável, detendo uma ampla variedade de aplicações, como cartografia, planejamento urbano, monitoramento ambiental, agricultura e muitos outros meios. Por meio do Georreferenciamento, torna-se possível conectar informações geográficas a áreas específicas com extrema precisão, facilitando o planejamento, a tomada de decisões informadas e o desenvolvimento de soluções eficazes em diversas áreas do conhecimento e da indústria (INCRA, 2013).

4.1 Software QGIS

O QGIS é uma ferramenta abrangente e flexível que desempenha um papel fundamental no campo dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), capacitando os usuários a explorar, analisar e representar dados espaciais de maneira eficaz e precisa, em uma variedade de contextos e aplicações. Com esse tipo de ferramenta, os usuários realizam análises detalhadas, explorar visualmente informações geográficas e efetuar edições precisas em conjuntos de dados relacionados ao espaço e à localização. O programa possibilita o desenvolvimento de mapas altamente personalizáveis, que podem consistir em várias camadas de informações geográficas. A interface gráfica do QGIS oferece uma série de funcionalidades que ampliam a capacidade de interação e análise dos dados geoespaciais. Ela permite a realização de consultas espaciais, a identificação e seleção de geometrias, a exploração interativa de dados, a pesquisa de informações, a visualização de atributos e a seleção de maneira intuitiva. Além disso, a interface também possibilita a execução de operações de geoprocessamento em camadas raster e vetor, bem como a manipulação eficiente de camadas *raster*, entre outras funcionalidades valiosas (ITO et al. 2017).

4.2 Formatos de Arquivos Usados Pelo QGIS

A representação vetorial permite uma exibição precisa e versátil de objetos geográficos por meio da definição de pontos e sua organização em linhas ou polígonos. As fronteiras das feições são configuradas através da disposição de uma série de pontos, esses pontos são codificados por meio de um par de valores numéricos que representam as

coordenadas x e y , a disposição desses pontos pode variar, e essa variação afeta diretamente a formação gráfica da área. Uma sequência de pares ordenados de vértices que não se conectam de maneira adjacente é capaz de criar uma linha, delineando um caminho ou uma área aberta. Todavia, uma sequência contígua de pares ordenados forma um polígono, que é uma área fechada, podendo representar regiões com limites definidos (COSTA et al. 2016).

O formato *shapefile* (.shp) é amplamente reconhecido como o formato vetorial mais utilizado em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e na análise geoespacial. Seu renome se deve, em grande parte, à sua versatilidade e compatibilidade com uma ampla gama de softwares de geoprocessamento. Um dos programas mais notáveis que oferecem suporte ao formato *shapefile* é o Quantum GIS (QGIS), esse formato é composto por uma coleção de arquivos interconectados, cada um desempenhando um papel específico na representação e armazenamento de dados geoespaciais (extensões .dbf, .prj, .sbn, .sbx, .shp, .shx). A combinação desses arquivos possibilita a representação completa e precisa de dados geográficos em uma variedade de aplicações (COSTA et al. 2016).

Dentro do contexto dos sistemas matriciais, que é uma ferramenta importante na análise e representação de dados espaciais, a área de estudo é minuciosamente organizada em uma grade de células uniformes, chamadas de elementos de imagem ou, em termos mais comuns, pixels. A representação de dados em formato de grade pode adotar diversas configurações, podendo ser uma representação cartográfica em formato de imagem ou um plano de informação geoespacial, esse sistema matricial permite uma representação mais direta e precisa de fenômenos que variam de maneira contínua no espaço (COSTA et al. 2016).

O formato .tif/.tiff é amplamente reconhecido por sua capacidade de proporcionar uma vasta gama de cores e uma qualidade de imagem excepcional. Essa qualidade superior resulta na formação de imagens que capturam nuances complexas, transições de cores suaves e detalhes específicos, proporcionando um nível de realismo e nitidez. Entretanto, devido à sua configuração de alta qualidade, essas imagens podem ocupar uma quantidade significativa de espaço no armazenamento, embora seja possível comprimir esses arquivos sem comprometer a qualidade da imagem (COSTA et al. 2016).

5. METODOLOGIA

5.1 Atlas Eólico do Rio Grande Do Norte

A obtenção dos arquivos que continham informações sobre o posicionamento preciso dos aerogeradores instalados no estado, bem como suas delimitações regionais, foram adquiridos através de uma consulta e análise aprofundada do Atlas Eólico do Rio Grande do Norte. Essa geoplataforma foi desenvolvida pelo Instituto SENAI de Inovação e Energias Renováveis (ISI-ER), com o respaldo da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico (SEDEC) e do Governo do Rio Grande do Norte. Resultante de vários anos de trabalho da equipe do ISI-ER, a ferramenta *online* proporciona acesso e *download* de informações geográficas vinculadas ao setor de energias renováveis e conservação ambiental. Este Atlas é uma fonte de referência essencial para o estudo e desenvolvimento da indústria de energia eólica, fornecendo um mapeamento abrangente das condições eólicas na região. Os dados empregados no desenvolvimento desta pesquisa, baixados a partir da plataforma, nos permitiram realizar uma análise da perspectiva atual do setor de energia eólica, especificamente no contexto dos aerogeradores, e têm como base informações coletadas até o ano de 2022 (ATLAS EÓLICO, 2023).

Figura 5 - Interface *web* do Atlas Eólico do Rio Grande do Norte, conforme acessado em setembro de 2023.



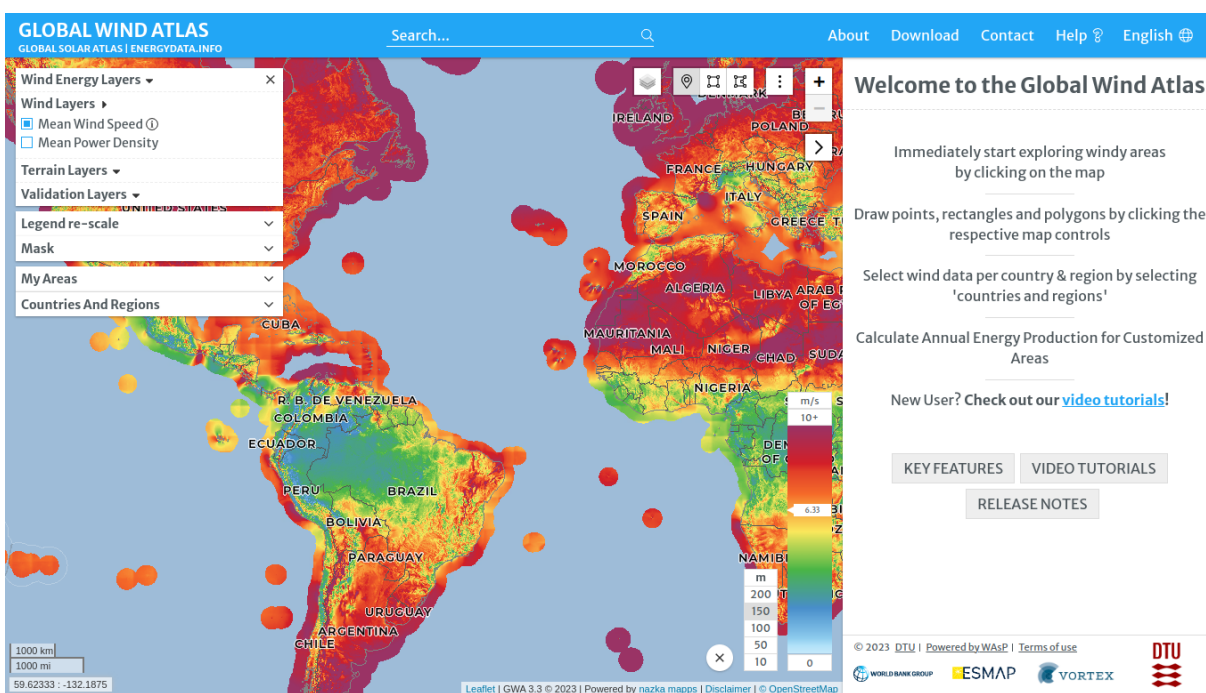
Fonte: Adaptado de Atlas Eólico e Solar do RN (ATLAS EÓLICO, 2023).

5.2 Global Wind Atlas

O *Global Wind Atlas* (GWA) é um recurso desenvolvido pelo *Technical University of Denmark* (DTU) em parceria com o *World Bank* para fornecer informações sobre o potencial eólico mundial (GWA, 2023). Ele combina dados de modelagem atmosférica com medições reais para oferecer estimativas de velocidade e direção do vento em diferentes altitudes e localidades.

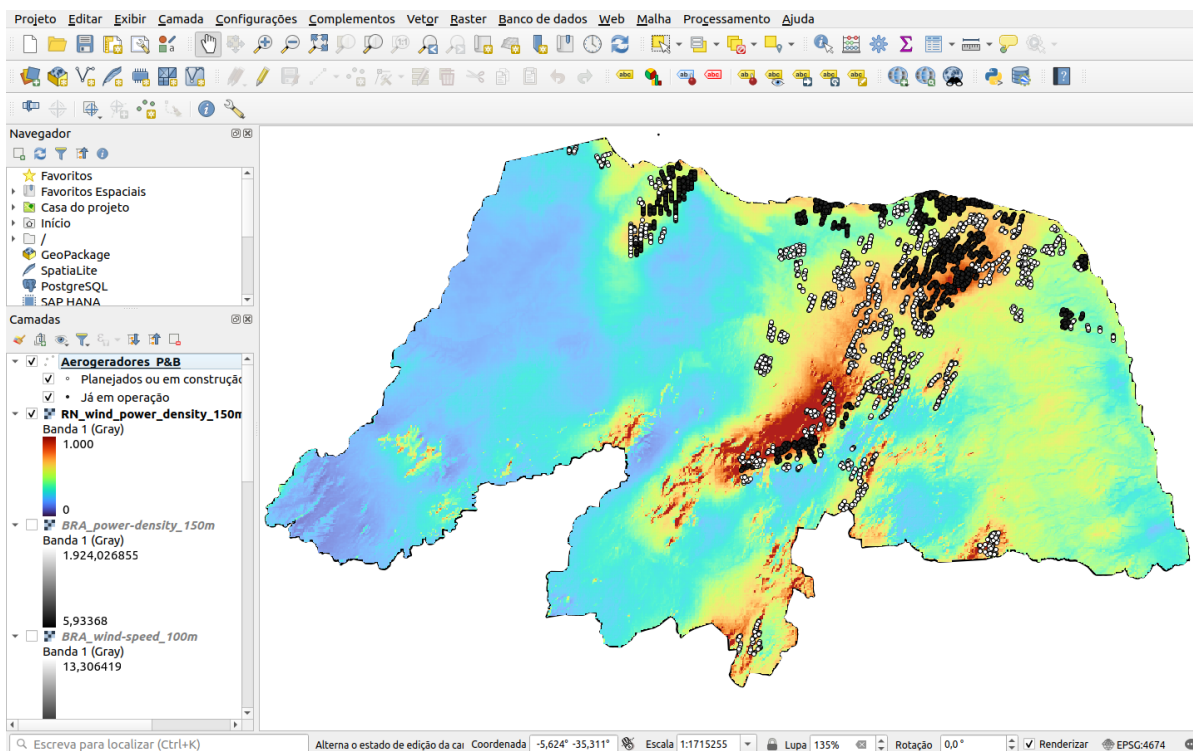
Os tipos de dados essenciais contidos nos arquivos fornecidos pelo *Global Wind Atlas*, abrangem uma variedade de informações cruciais relacionadas à energia eólica. Isso inclui detalhes como a velocidade do vento e a densidade de potência, que são disponibilizados no formato *Geotiff*, identificado pela extensão de arquivo (.tif). Esses dados desempenham um papel fundamental na análise e no planejamento da utilização da energia eólica, permitindo uma compreensão abrangente e precisa das condições eólicas em diversas regiões.

Figura 6 - Interface web do *Global Wind Atlas*, conforme acessado em setembro de 2023.



Fonte: Adaptado de *Global Wind Atlas* (GWA, 2023).

Figura 7 - QGIS - Camada vetorial representando as posições dos aerogeradores no território potiguar, sobreposta a uma camada *raster* representando a densidade de potência eólica

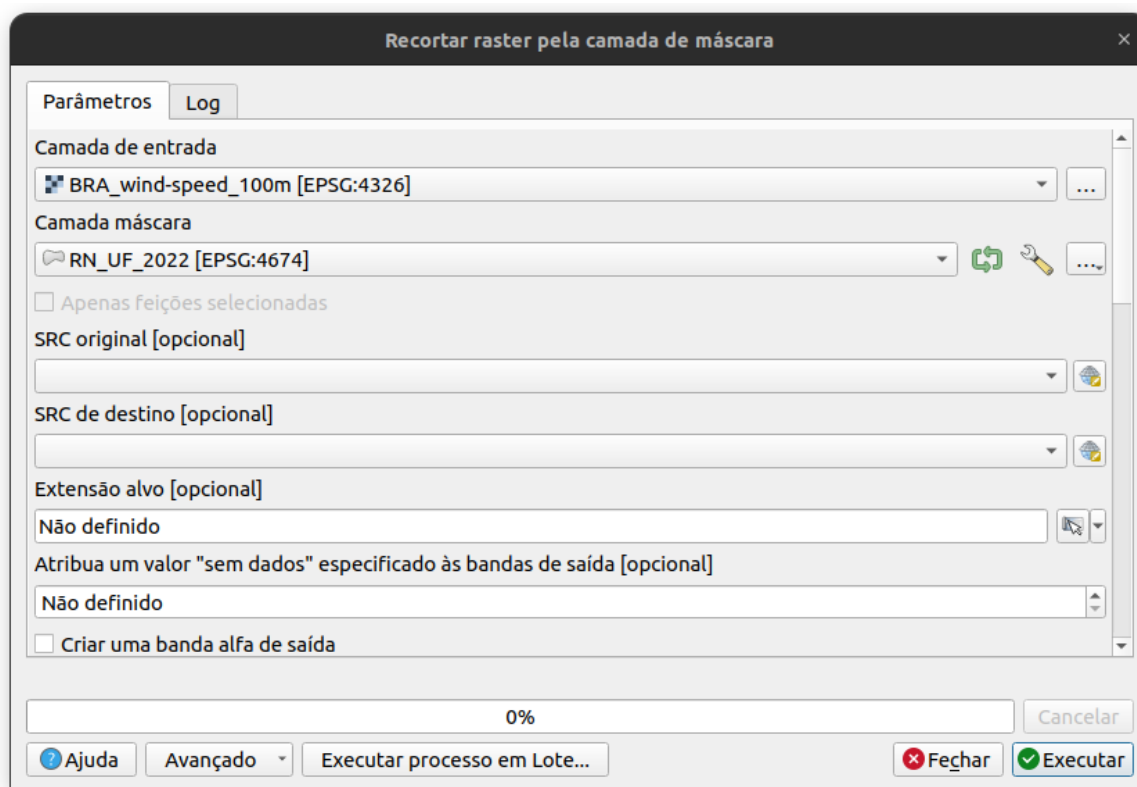


Fonte: Criação própria utilizando o QGIS.

Na figura 7, podemos observar uma representação visual da interface do sistema em que é demonstrado o processo de importação de dados geoespaciais. A camada *Raster*, que contém dados sobre as velocidades dos ventos e a densidade de potência, permite identificar áreas com ventos mais fortes, é importada do arquivo *Geotiff* obtido a partir do GWA. As camadas vetoriais são importadas de um arquivo *Shapefile* obtido a partir do Atlas Eólico do Rio Grande do Norte e têm o propósito de representar as posições dos aerogeradores e o contorno geográfico da região do Rio Grande do Norte. A integração desses dados *Raster* e vetoriais permite uma compreensão mais abrangente e precisa das condições eólicas locais e regionais.

O arquivo original das camadas *Raster* representando os perfis de vento contém dados de todo o Brasil, e por isso faz-se necessário, para a construção dos mapas e análises deste trabalho, extrair apenas as informações referentes ao território do Rio Grande do Norte. Para isso, usa-se a ferramenta do QGIS intitulada *Recortar Raster* pela camada de máscara. A figura 7 mostra um exemplo uso dessa ferramenta, em que a camada de entrada é a camada *Raster* da velocidade de vento a 100 m, e a camada de máscara é a camada vetorial representando o contorno do estado do Rio Grande do Norte.

Figura 8 - Exemplo de uso da ferramenta Recortar raster pela camada de máscara do QGIS, em que a camada *Raster* da velocidade de vento a 100m é recortada de acordo com os limites do Rio Grande do Norte.



Fonte: Criação própria utilizando o QGIS.

O mapa 1 esboça a distribuição geográfica das instalações de geração de energia eólica em funcionamento, destacando igualmente as regiões que estão em processo de desenvolvimento de novos parques eólicos. O objetivo principal desse mapa é proporcionar uma ampla visão das atividades relacionadas à geração de energia eólica em várias localidades, os dados de posição dos aerogeradores foram obtidos acerca do Atlas Eólico RN.

Com o objetivo de tornar as informações ainda mais acessíveis e compreensíveis para os observadores, o gráfico apresenta uma legenda de cores no sistema, distinguindo os aerogeradores no estado. Essa inovação consiste em uma representação visual que desempenha o papel de um guia prático, possibilitando uma distinção imediata entre as diversas fases nas localidades de cada projeto. Devido a essa abordagem, torna-se uma tarefa simplificada identificar quais áreas se encontram atualmente em plena produção de energia eólica no Rio Grande do Norte, assim como aquelas que estão na fase de planejamento e construção. Essa abordagem visual eficiente, não apenas facilita a compreensão dos processos

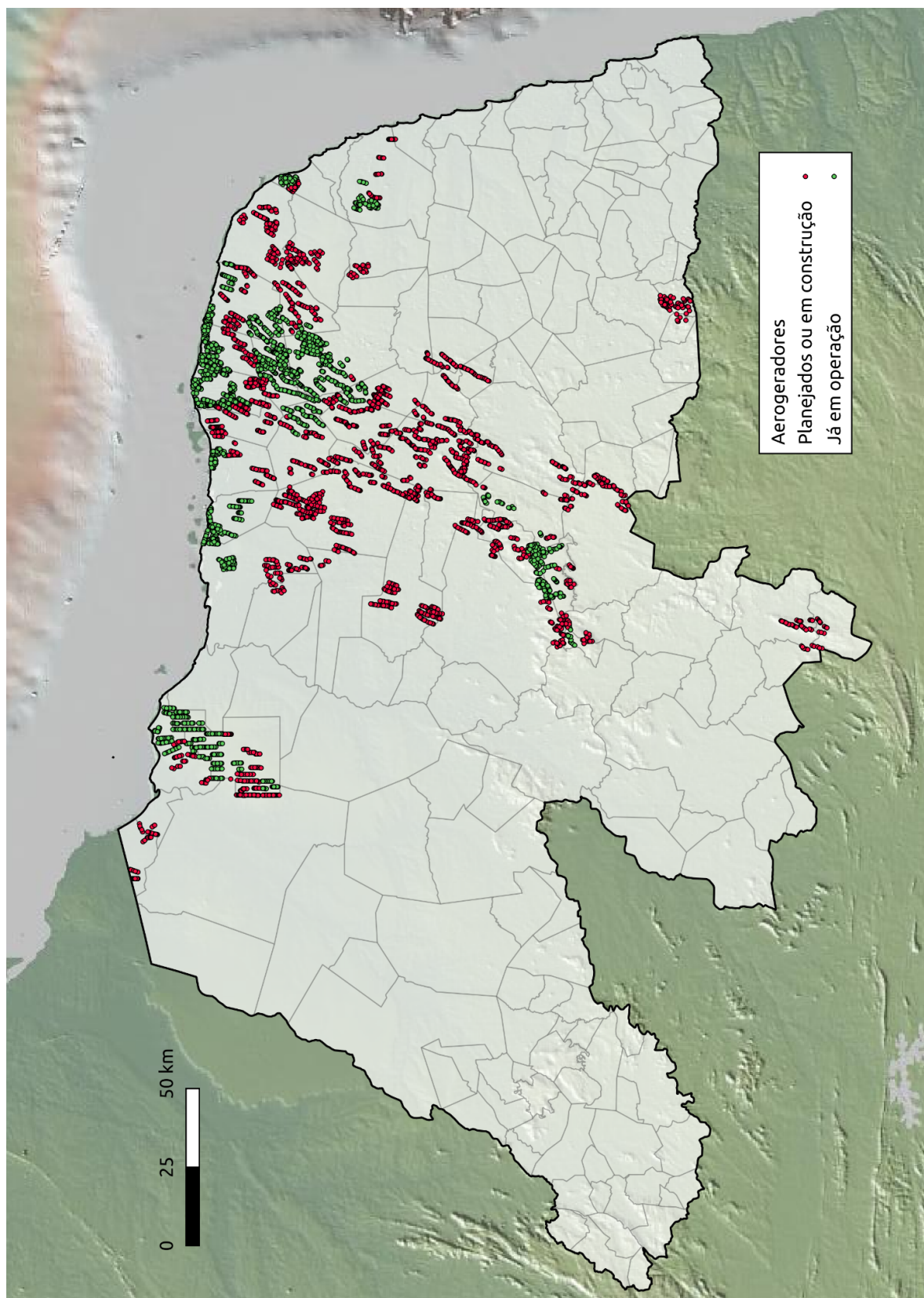
envolvidos, mas também promove uma gestão mais eficaz de empreendimentos relacionados à energia eólica, ao possibilitar uma ampla visão detalhada do estado de cada projeto.

A distribuição da intensidade das massas de ar, especialmente se tratando da velocidade dos ventos, é analisada e apresentada nos apêndices A e B deste estudo. Esses apêndices fornecem informações que nos permite uma compreensão da forma como esses padrões atmosféricos se manifestam em todo o território brasileiro.

No Apêndice A, que apresenta a densidade de potência a 100 metros de altura, analisa-se a distribuição dessa intensidade em várias regiões do Brasil. Isso inclui informações detalhadas sobre as áreas de maior intensidade, suas variações sazonais e como elas interagem com as características geográficas e climáticas do país. Essa análise identifica tendências e padrões climáticos, auxiliando na identificação de regiões propícias para parques eólicos.

No Apêndice B, uma análise complementar da densidade de potência a 150 metros de altura abrange todo o território brasileiro. Nota-se um aumento de potencial em áreas específicas, principalmente no Nordeste e no Sul. Os dados categorizam as regiões com seus níveis de potencial, exibindo a densidade de potência em todo o país, sendo fundamental para a otimização de recursos energéticos renováveis.

Mapa 1- Mapa dos aerogeradores em atividade e em construção, gerado a partir do QGIS.

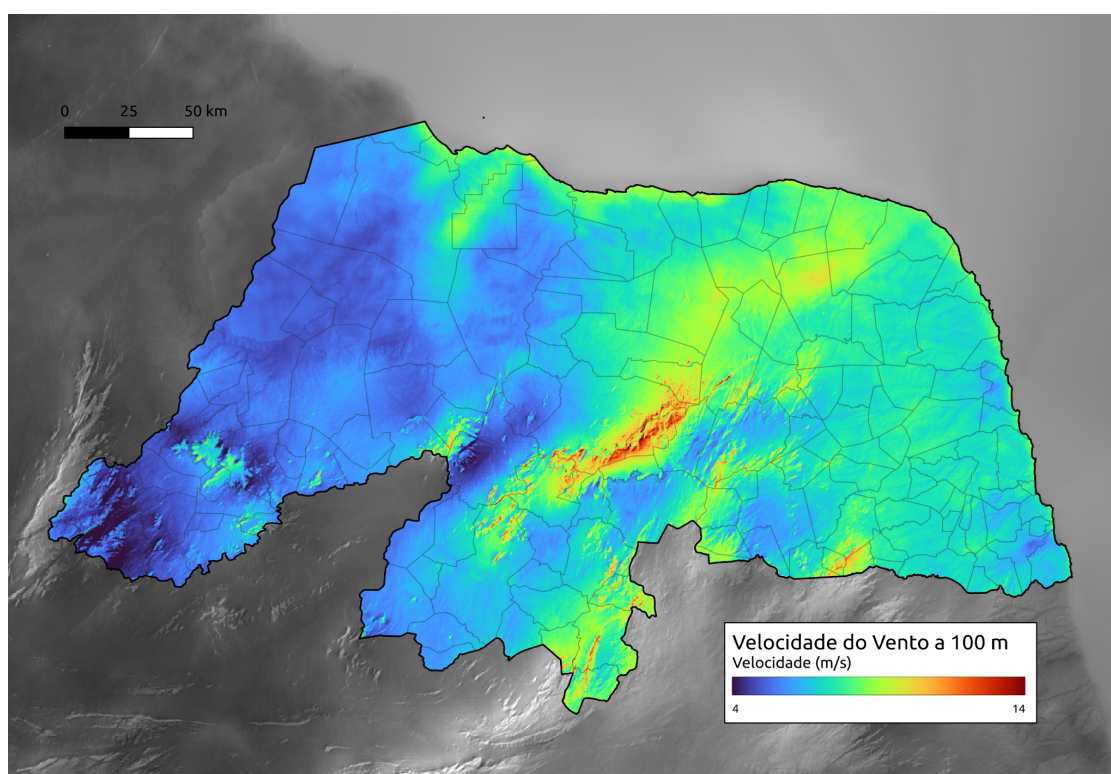


Fonte: Criação própria utilizando o QGIS.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os mapas de vento analisados na pesquisa são uma representação gráfica que exibe a distribuição das velocidades do vento em uma determinada área requisitada. Esses mapas podem ser desenvolvidos a partir de dados coletados por várias fontes, entre satélites, radares, estações meteorológicas terrestres e modelos numéricos de previsão do tempo. As informações sobre a velocidade do vento são geralmente representadas por meio de cores, apontando assim as variações dos níveis de velocidade do vento em uma área específica.

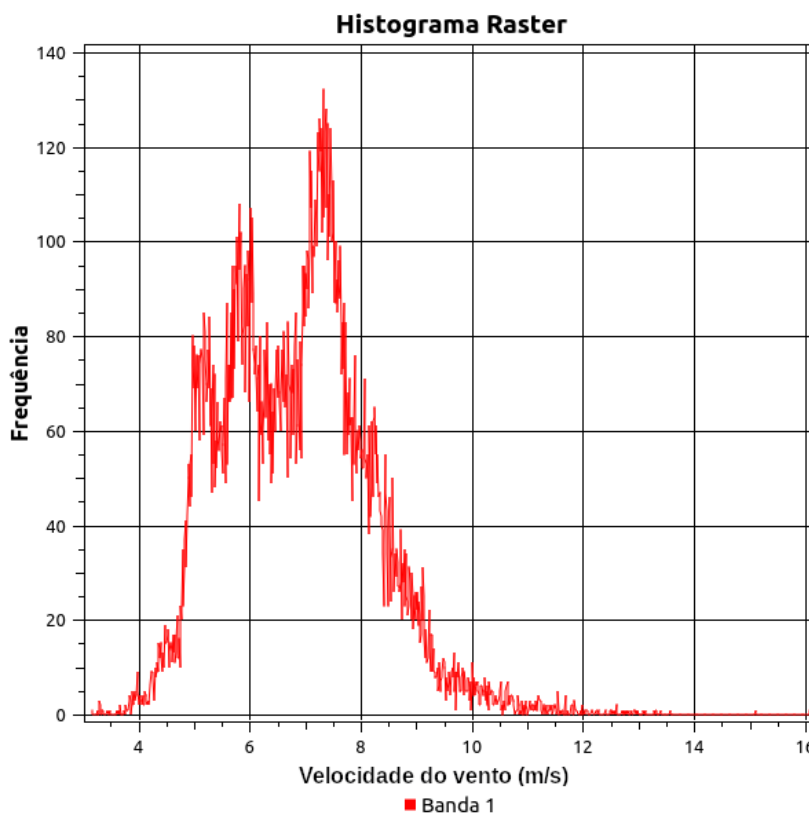
Mapa 2 - Mapa de velocidade do vento do Rio Grande do Norte a 100 m de altura.



Fonte: Criação própria utilizando o QGIS.

No mapa 2 podemos observar a distribuição das velocidade do vento a uma altura de 100 m (cem metros), no estado do Rio Grande do Norte, onde a maior incidência dos ventos são caracterizadas entre as cores laranja e vermelho de acordo com a escala de cores da legenda. Desse modo o mapa caracteriza a região central do estado com a maior intensidade das velocidades a esta altura, em virtude de ser a localidade que apresenta maior ocorrência das cores indicadas em relação às demais regiões do estado. Nessa região localizam-se as cidades de Florânia, Ten. Laurentino Cruz, Santana do Matos, Bodó, Lagoa Nova, Parelhas e Equador, destacadas com maior percentual de velocidade de acordo com a legenda do mapa.

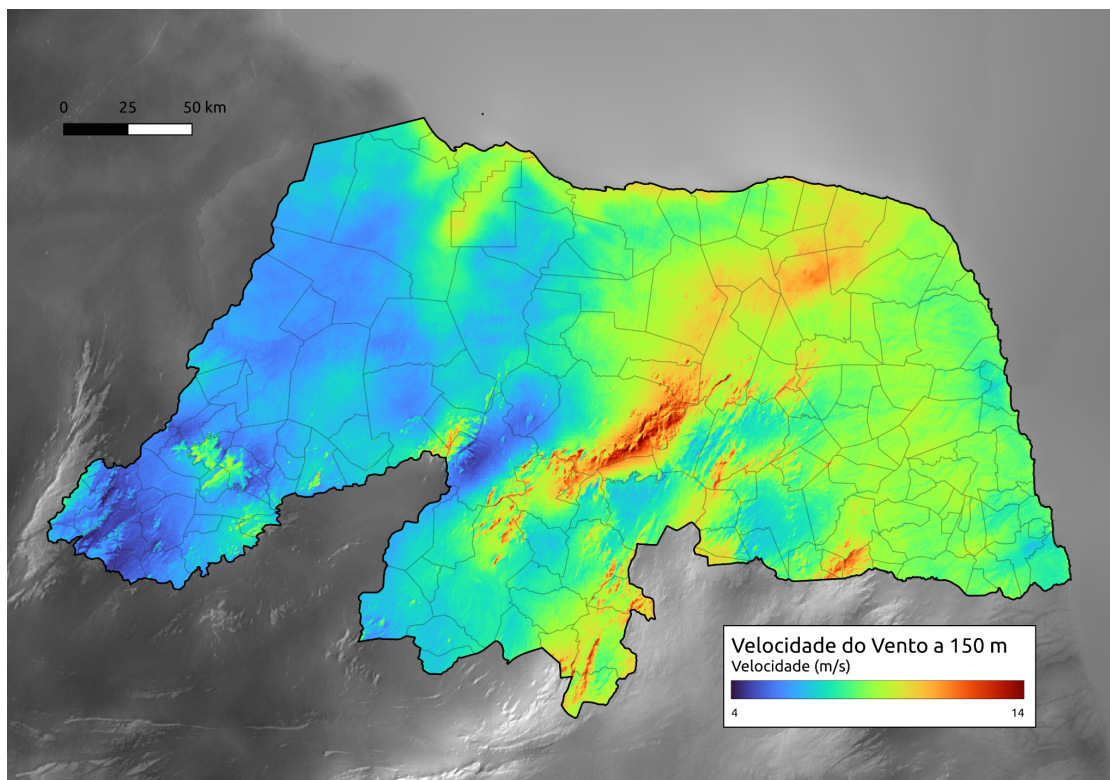
Gráfico 3 - Histograma da velocidade do vento a 100 m em todo o Rio Grande do Norte, gerado a partir do QGIS.



. Fonte: Criação própria utilizando o QGIS.

No gráfico 3 o histograma (histograma da camada *raster*) representado foi criado a partir do próprio programa QGIS, tem como dado-base a velocidade do vento que está sendo representado no gráfico. O gráfico expõe a distribuição estatística das velocidades do vento, apresentando a frequência com que cada valor ocorre no mapa dentro dos limites do Rio Grande do Norte, e o intervalo em que se obtém os melhores resultados a esta altitude.

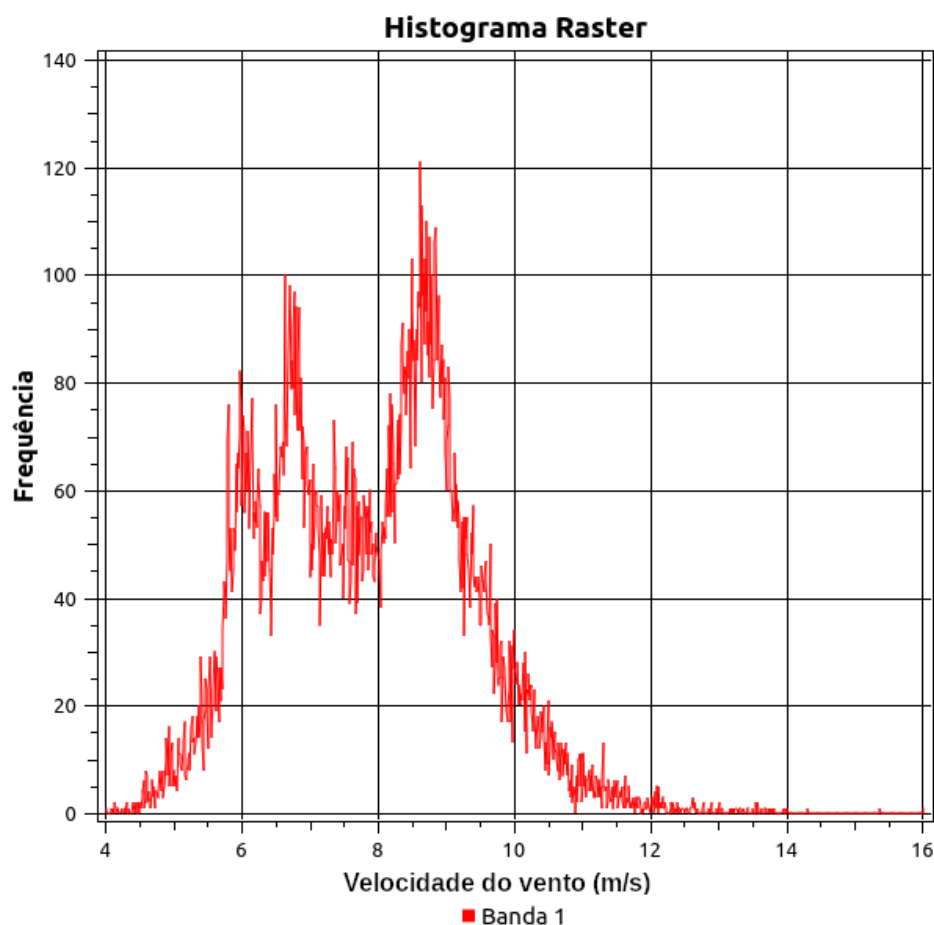
Mapa 3 - Mapa de velocidade do vento do Rio Grande do Norte a 150 m de altura.



Fonte: Criação própria utilizando o QGIS.

Já no mapa 3 caracteriza a distribuição dos ventos a 150 m (cento e cinquenta metros) de altura, onde a escala de cores entre amarelo, vermelho e laranja, são as que detém os maiores níveis de velocidade, identifica uma prevalência de intensidade da velocidade do vento na região central e, em algumas partes da zona costeira do estado, indicando assim as áreas com possíveis potenciais para produção de energia eólica.

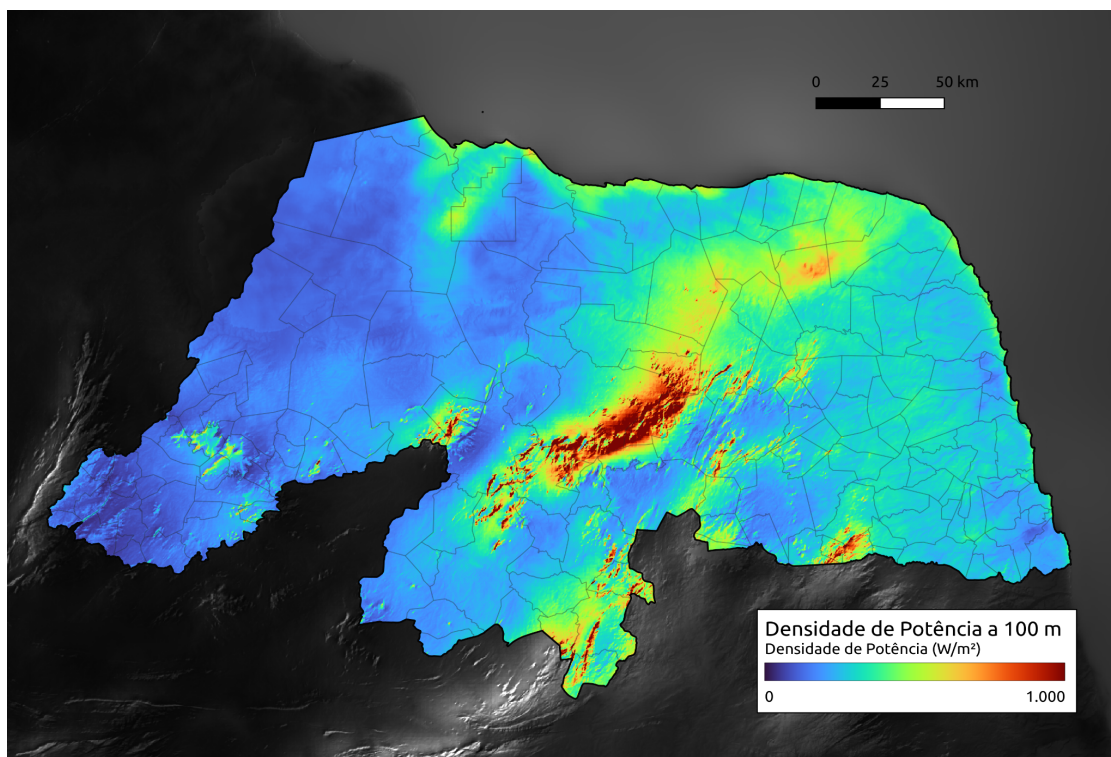
Gráfico 4 - Histograma da velocidade do vento a 150 m, em todo o Rio Grande do Norte, gerado a partir do QGIS.



Fonte: Criação própria utilizando o QGIS.

No histograma representado pelo gráfico 4, podemos observar a frequência com que os valores das cotas se repetem em relação à intensidade das cores em diferentes regiões. Notavelmente, as frequências mais significativas concentram-se na região central, estendendo-se até algumas áreas ao longo da zona costeira. Este padrão revela a distribuição da intensidade das correntes de vento de acordo com a altura ou cota na área mapeada, destacando a predominância de valores específicos nas regiões que apresentam maior intensidade.

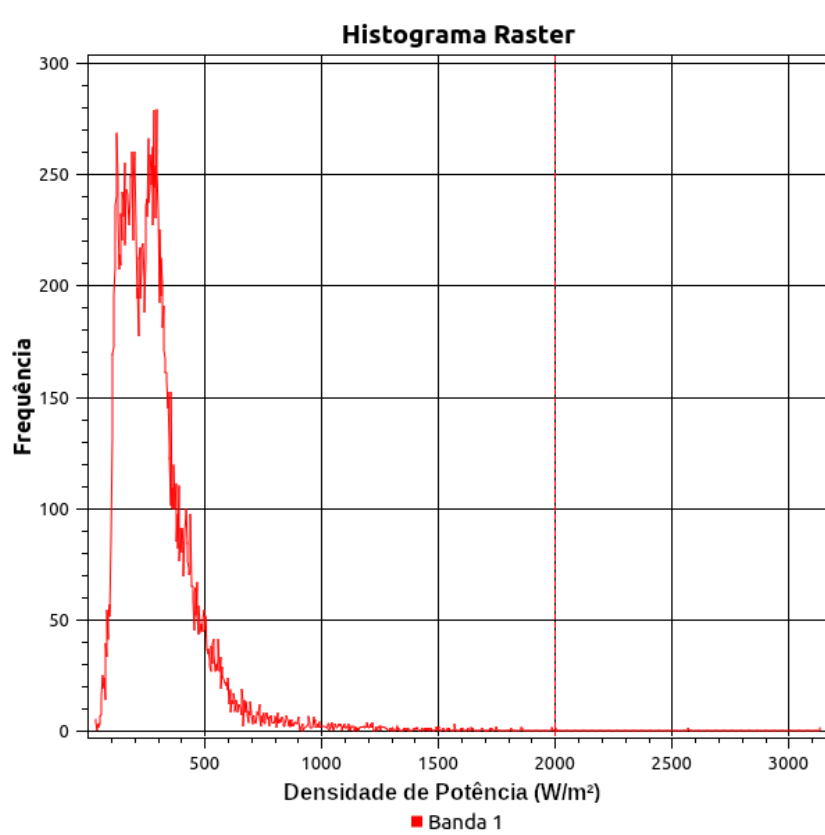
Mapa 4 - Mapa da densidade de potência do Rio Grande do Norte a 100 m de altura.



Fonte: Criação própria utilizando o QGIS.

No mapa 4 de densidade de potência, refere-se à quantidade de energia disponível nas áreas em uma altura de 100 m (cem metros). Essa densidade é um fator crucial para avaliar o potencial de geração de energia eólica na região específica, e para o dimensionamento de parques eólicos. Observa-se que a densidade de potência varia significativamente de uma localização para outra, dependendo das condições climáticas e geográficas. Especificamente a parte central do Rio Grande do Norte é a que porta os maiores potenciais de acordo com a legenda estabelecida, ajudando na seleção das regiões apropriadas para a instalação de parques eólicos e na avaliação do potencial de geração de energia nas áreas com as maiores intensidades de acordo com as características da legenda.

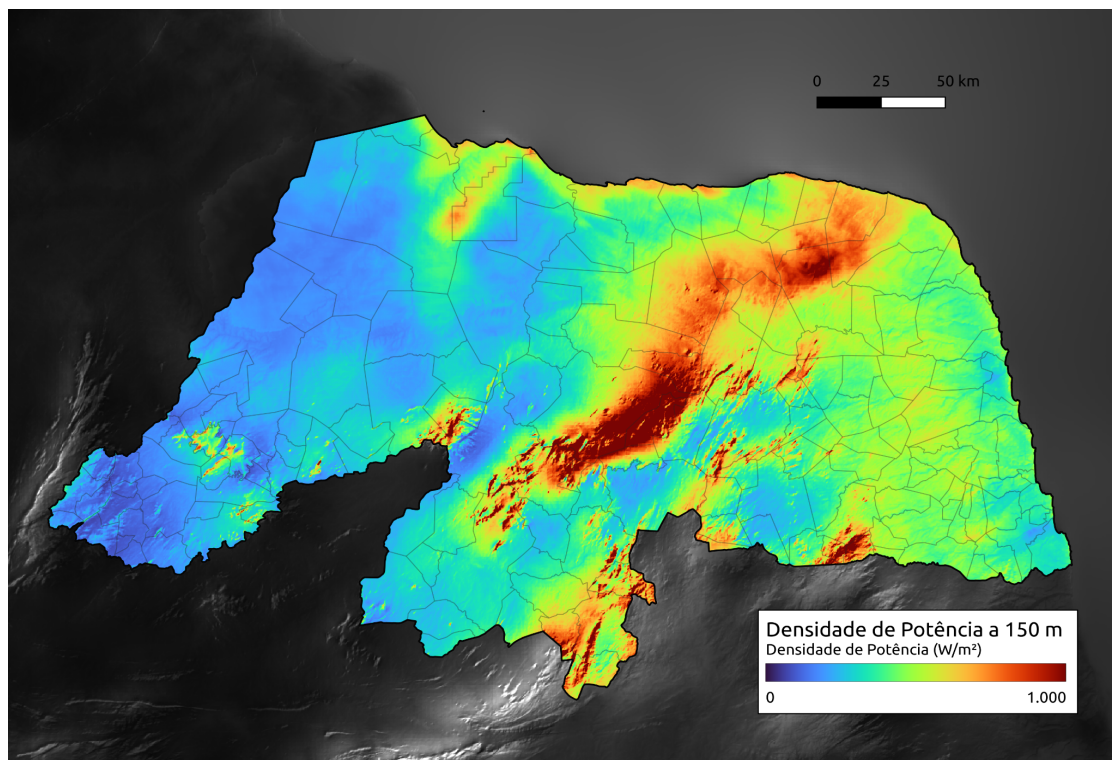
Gráfico 5 - Histograma da densidade de potência a 100 m, em todo o Rio Grande do Norte, gerado a partir do QGIS.



Fonte: Criação própria utilizando o QGIS.

O histograma referente ao gráfico 5 indica a frequência das cotas, no qual, é realizado uma análise estatística para calcular a densidade de potência na altura analisada, onde é possível identificar os padrões e as tendências dos potenciais nas altitudes indicadas, revelando informações sobre a distribuição de dados em um contexto visual. O gráfico indica o intervalo com maior densidade de potência no estado referente a altura analisada.

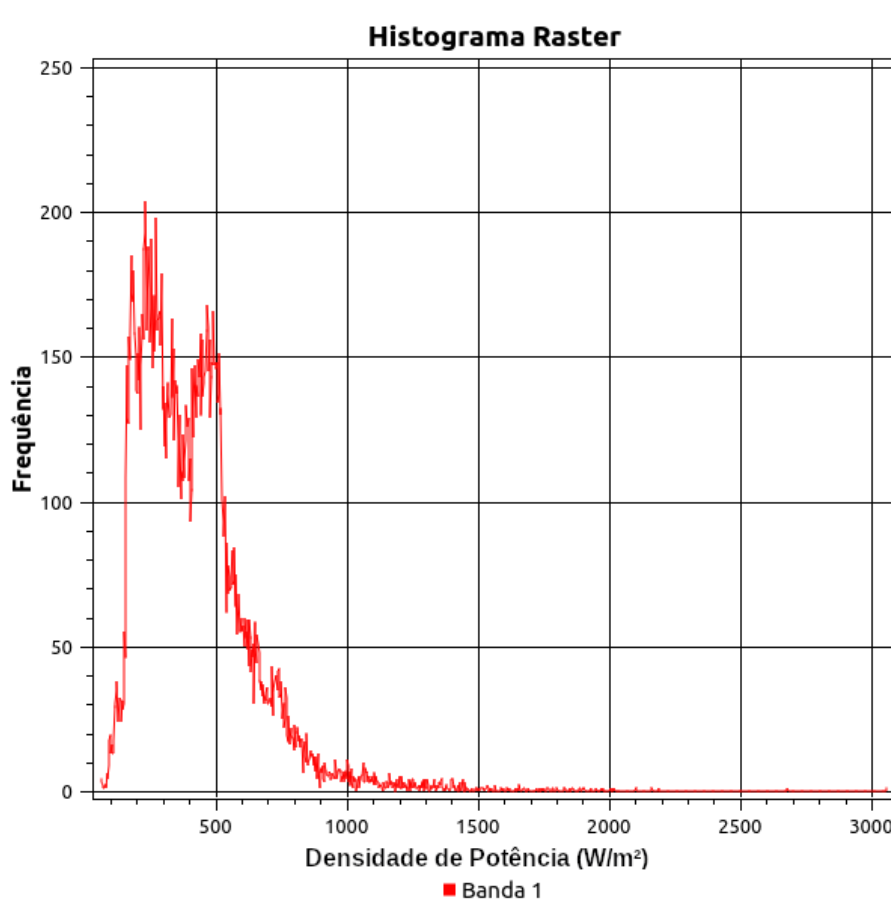
Mapa 5 - Mapa da densidade de potência do Rio Grande do Norte a 150 m de altura.



Fonte: Criação própria utilizando o QGIS.

Ao explorar o mapa 5 de densidade de potência, decorrente da análise a uma altura de 150 m (cento e cinquenta metros), de acordo com a especificação da intensidade das cores referente a legenda do mapa, é observada uma grande capacidade de potencial de geração de energia no Rio Grande do Norte em diversas regiões que abrangem o estado. Com um destaque das cidades de Florânia, Ten. Laurentino Cruz, Santana do Matos, Bodó, Lagoa Nova, Cerro Corá, Fernando Pedroza, Pedro Avelino e Lajes, que incorporam a região central do estado, existindo também um destaque das cidades de Santana do Seridó, Parelhas, Equador, Carnaúba dos Dantas e Acari, nos municípios do agreste São Tomé, Monte das Gameleiras, Serra de São Bento, São José do Campestre, Caiçara do Rio do Vento, Ruy Barbosa, Riachuelo, Bento Fernandes, nos municípios do litoral norte, João Câmara, Parazinho, Touros, São Miguel de Touros, e no oeste potiguar destacando as cidades de Serra do mel e Areia Branca, são as cidades que apresentam os maiores níveis de potencial de produção de energia eólica. Essa identificação das regiões destacadas com um considerável potencial para a geração de energia eólica é um processo de extrema importância, destacando as condições favoráveis e vantajosas para a instalação de infraestruturas de geração de energia através do vento.

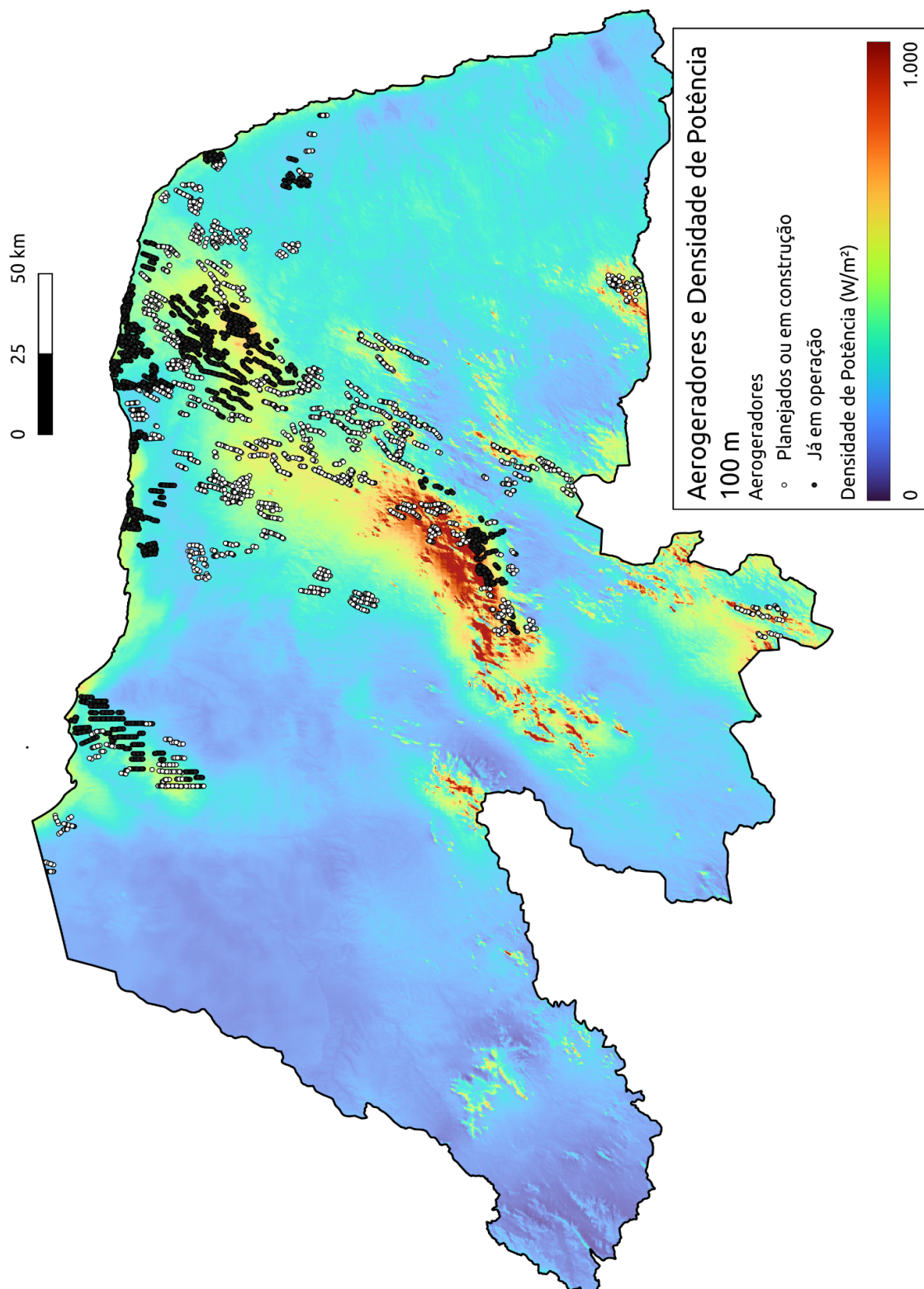
Gráfico 6 - Histograma da densidade de potência a 150 m, em todo o Rio Grande do Norte, gerado a partir do QGIS.



Fonte: Criação própria utilizando o QGIS.

O gráfico 6 destaca os intervalos que se dispõe de maiores potenciais de produção de energia de acordo com a variação de altitude, identificando assim os locais onde a geração de energia é mais promissora, considerando a relação entre altitude e potencial de produção de energia. Ao analisar o gráfico 6 e o mapa 5 fica evidente o intervalo com maior potencial de produção referente às regiões do estado que a essa altitude, oferecem as condições apropriadas para o desenvolvimento dessa fonte.

Mapa 6 - Aerogeradores e densidade de potência a 100 m. Desenvolvido a partir de dados de posição dos aerogeradores atualizados até 2022 disponíveis no Atlas Eólico e Solar do RN.



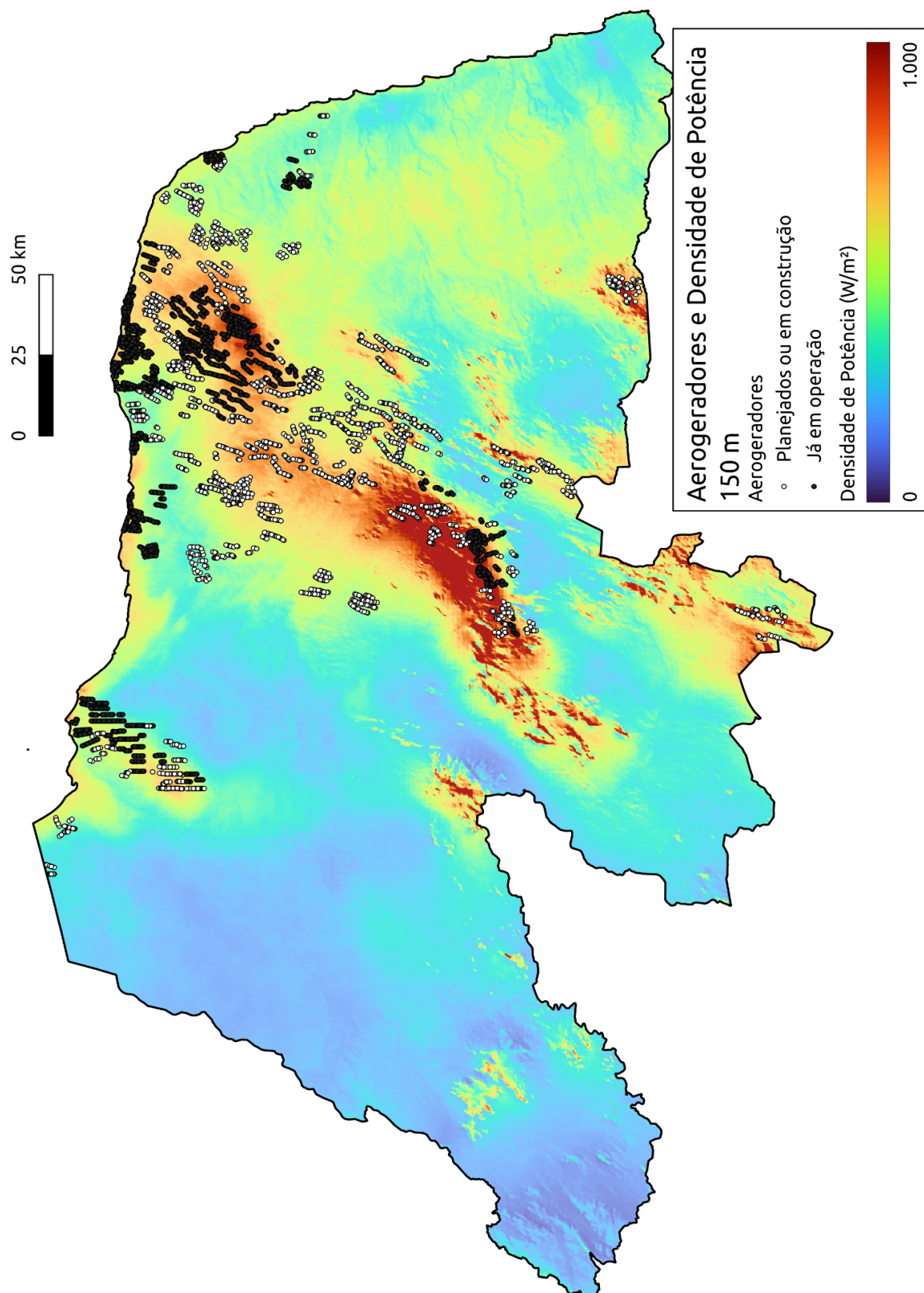
Fonte: Criação própria utilizando o QGIS.

O mapa 6, que representa os aerogeradores e a densidade de potência a uma altitude de 100 metros (cem metros), oferece uma visão abrangente das instalações de aerogeradores no Rio Grande do Norte, juntamente com o potencial de produção de energia nessa elevação específica. Nessa altura as condições atmosféricas são particularmente favoráveis para a geração de energia eólica em algumas localidades do estado. Ao analisar esse mapa, é evidente que boa parte das instalações dos parques eólicos estão localizadas nas áreas em que o mapa identifica como possuidoras dos maiores potenciais de produção de energia. Isso ressalta uma clara correlação entre a localização das instalações e a distribuição dos potenciais.

A representação visual do mapa 6 não apenas identifica as instalações existentes, como também destaca as áreas com um alto potencial para posteriores empreendimentos de energia eólica. A análise dessas informações é primordial para o planejamento e a expansão da geração de energia sustentável no estado. A correlação entre a localização das instalações e os mapas de vento demonstra a importância da tomada de decisões informadas na escolha dos locais para parques eólicos, maximizando assim a eficiência e a capacidade de produção de energia renovável, assim como a prevenção de perdas de investimentos empregados.

A construção de parques eólicos impulsiona o desenvolvimento e reduz a dependência de outras fontes de energia, no entanto, esse processo também acarreta impactos adversos no ecossistema local, podendo afetar a fauna e flora característica da região. A instalação de torres eólicas, estradas de acesso e linhas de transmissão modificam o habitat natural, podendo desamparar espécies locais e afetar rotas de migração de aves. A preparação do terreno para a instalação das torres eólicas causam desmatamento e degradação do solo, levando à diminuição de vegetação nativa e à redução da capacidade de absorção de água do solo, o que contribui para a desertificação do local. Como no caso da serra do feiticeiro, localizada no município de Lajes-RN, que vem enfrentando problemas decorrentes da expansão dos parques eólicos, causando ameaça à existência de espécies nativas da região. Para mitigar esses impactos e permitir uma expansão sustentável da energia eólica na Caatinga, é necessário planejamento, avaliação ambiental e implementação de medidas de mitigação. Além disso, é fundamental monitorar os impactos ambientais ao longo do tempo, para aprimorar as práticas conforme necessário diminuindo a degradação do ecossistema.

Mapa 7 - Aerogeradores e densidade de potência a 150 m. Desenvolvido a partir de dados de posição dos aerogeradores atualizados até 2022 disponíveis no Atlas Eólico e Solar do RN.



Fonte: Criação própria utilizando o QGIS.

O mapa 7, que apresenta informações sobre aerogeradores e densidade de potência, oferece uma perspectiva ainda mais abrangente das instalações de energia eólica no estado, juntamente com o potencial de produção de energia, porém, neste caso agora a análise foi realizada a partir da altitude de 150m (cento e cinquenta metros). A análise realizada a partir desta altura revela um potencial de produção de energia substancialmente maior em comparação com análises a altitudes mais baixas. Essa condição atmosférica favorável posiciona o estado como um dos principais produtores de energia eólica do país, a relação entre a potência gerada e elevação, como representada pelo mapa, destaca as áreas com os maiores índices de potência, e, essas mesmas áreas são as regiões onde a maioria das instalações eólicas do estado estão localizadas. A correlação entre os dados de altura e da distribuição dos aerogeradores, demonstra como as características topográficas influenciam a escolha dos locais para parques eólicos, as regiões com maiores índices apresentam maior concentração de parques, ou seja, são regiões mais promissoras para produção e para futuras instalações. Essa análise da correlação entre a altitude e a produção de energia é fundamental para o desenvolvimento e para obtenção da maximização do potencial de energia limpa e sustentável.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados que foram analisados nos histogramas das velocidades do vento revelam uma notável concentração de potência eólica identificada quando observa-se medições realizadas à altura de 150 metros. Mostrando que a essa altura, as condições atmosféricas favorecem significativamente a produção de energia eólica. Ao comparar os locais dos aerogeradores com o mapa de densidade de potência gerado a partir desses dados, existe uma correspondência entre as características eólicas e as localizações geográficas dos aerogeradores, isso significa que essa análise sugere que a estratégia de aumentar a altura das turbinas eólicas para capturar velocidades de vento mais elevadas é uma abordagem promissora, por este motivo que no estados os empreendimento estão sendo desenvolvidos em locais com maiores altitudes. Vale mencionar a capacidade do QGIS em criar mapas de densidade de potência a partir dos dados eólicos coletados, tornando-se um recurso valioso para o planejamento e análise de futuros parques, proporcionando uma visão clara das áreas mais propícias para a instalação tanto no âmbito onshore como no *offshore*.

A construção de parques eólicos estimula o desenvolvimento e reduz a dependência de outras fontes de energia, além de diminuir a emissão de gases poluentes, mas também causa impactos adversos no ecossistema local, afetando a fauna e flora, modificando o habitat natural e causando desmatamento e degradação do solo. Para permitir uma expansão sustentável da energia eólica, é essencial um planejamento cuidadoso, avaliação ambiental, medidas de mitigação e monitoramento contínuo dos impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

- ATLAS EÓLICO. Disponível em: <<http://atlaseolicosolarn.com.br>>. Acesso em: 28 set. 2023.
- BARROS, Beatriz. Fatores que influenciam na produção de energia eólica. Engenharia360.com. Disponível em: <<https://engenharia360.com/fatores-que-influenciam-energia-eolica/>>. Acesso em: 31/08/2023.
- BEZERRA, Francisco Diniz. Energia eólica no Nordeste. 2019.
- BORGES, Emílio; BRAGA, João Pedro. O efeito de Coriolis: de pêndulos a moléculas. Química Nova, v. 33, p. 1416-1420, 2010.
- CHRISTÓFARO, Bruno Ramos. Estudo do potencial eólico em offshore para a geração de energia elétrica no litoral do Paraná. 2010.
- COSTA, Carlos Wilmer; MOSCHINI, Luiz Eduardo; LORANDI, Reinaldo. Aquisição de dados geográficos em plataformas livres para estudos ambientais em bacias hidrográficas. Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas, p. 15, 2016.
- DANTAS, Gerbeson Carlos Batista et al. Panorama do setor eólico no estado do Rio Grande do Norte no período 2004-2017. Estudos Avançados , v. 35, pág. 79-94, 2021.
- FADIGAS, Eliane A. Faria Amaral. **Energia Eólica**. Santana de Parnaíba: Editora Manole, 2011.
- GWA, Global Wind Atlas. Disponível em: <<https://globalwindatlas.info>>. Acesso em: 15 set. 2023.
- INCRA. Norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais. 2013.
- ITO, Marcia Harumi; FONSECA FILHO, Homero; CONTI, Luís Américo. Uso do software livre QGIS (Quantum GIS) para ensino de Geoprocessamento em nível superior. Revista cartográfica, v. 94, p. 127-148, 2017.

JULIA LAYTON. How Wind Power Works: Modern Wind-power Technology. 2006.

Disponível em:
<<https://science.howstuffworks.com/environmental/greenscience/wind-power.htm>>. Acesso em: 19 out. 2023.

MARTINS, Fernando Ramos; GUARNIERI, Ricardo André; PEREIRA, Enio Bueno. O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, p. 1304.1-1304.13, 2008.

MATHEW, S. Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics.

Berlin: Springer-verlag. 2006. 246 p.

OLIVEIRA, Luís Filipe Marques Pedreira de et al. Análise do comportamento dinâmico de torres de geradores eólicos. 2012.

OLIVEIRA, Thamires de Almeida. Viabilidade técnico-econômica da turbina eólica offshore. 2019.

PINTO, Milton de Oliveira. Estudo estimativo básico para implantação de turbinas eólicas offshore no litoral do estado do Rio Grande do Norte. 2017. Dissertação de Mestrado. Brasil.

PINTO, Milton de Oliveira et al. Fundamentos de energia eólica. **Rio de Janeiro: LTC**, v. 1, 2013.

RODRIGUES, Marcus Vinicius Sousa; NEPOMUCENO, Arlean Fernandes; MORAIS, E. Uma breve descrição do setor de energia eólica no estado do Rio Grande do Norte. In: **Brazil Windpower Conference & Exhibition (Accessed February, 2020) at: <http://abeeolica.org.br>**. 2017.

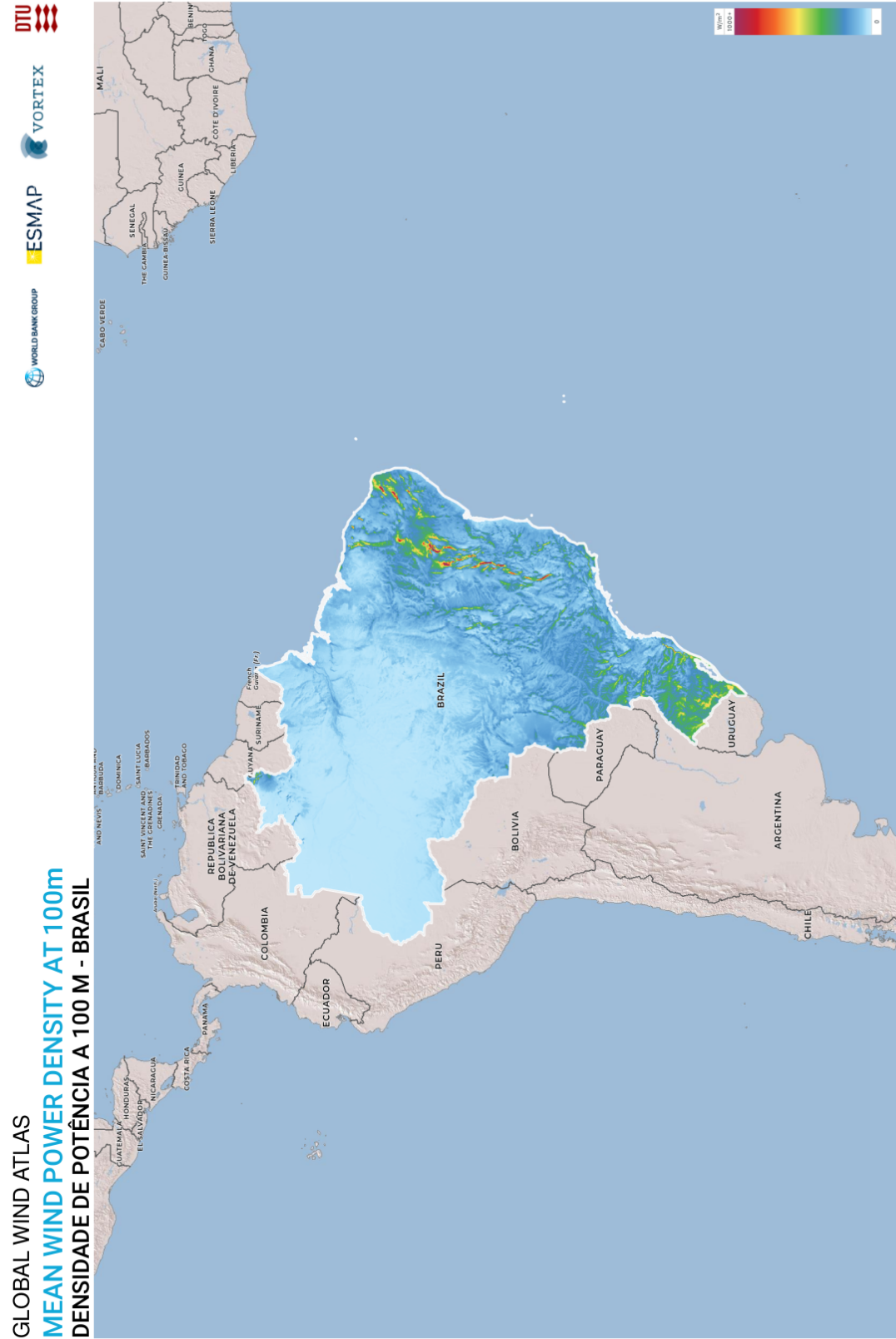
RODRIGUES, M. V. S.; AQUINO, M. D. Estrutura legal da gestão das águas no Estado do Rio Grande do Norte. *Revista de Gestão de Água da América Latina - REGA*, v.10, n.1, p.17-28, 2013.

SAMPAIO, Keila Regina Alves; BATISTA, Valmir. O atual cenário da produção de energia eólica no Brasil: Uma revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, p. e57710112107-e57710112107, 2021.

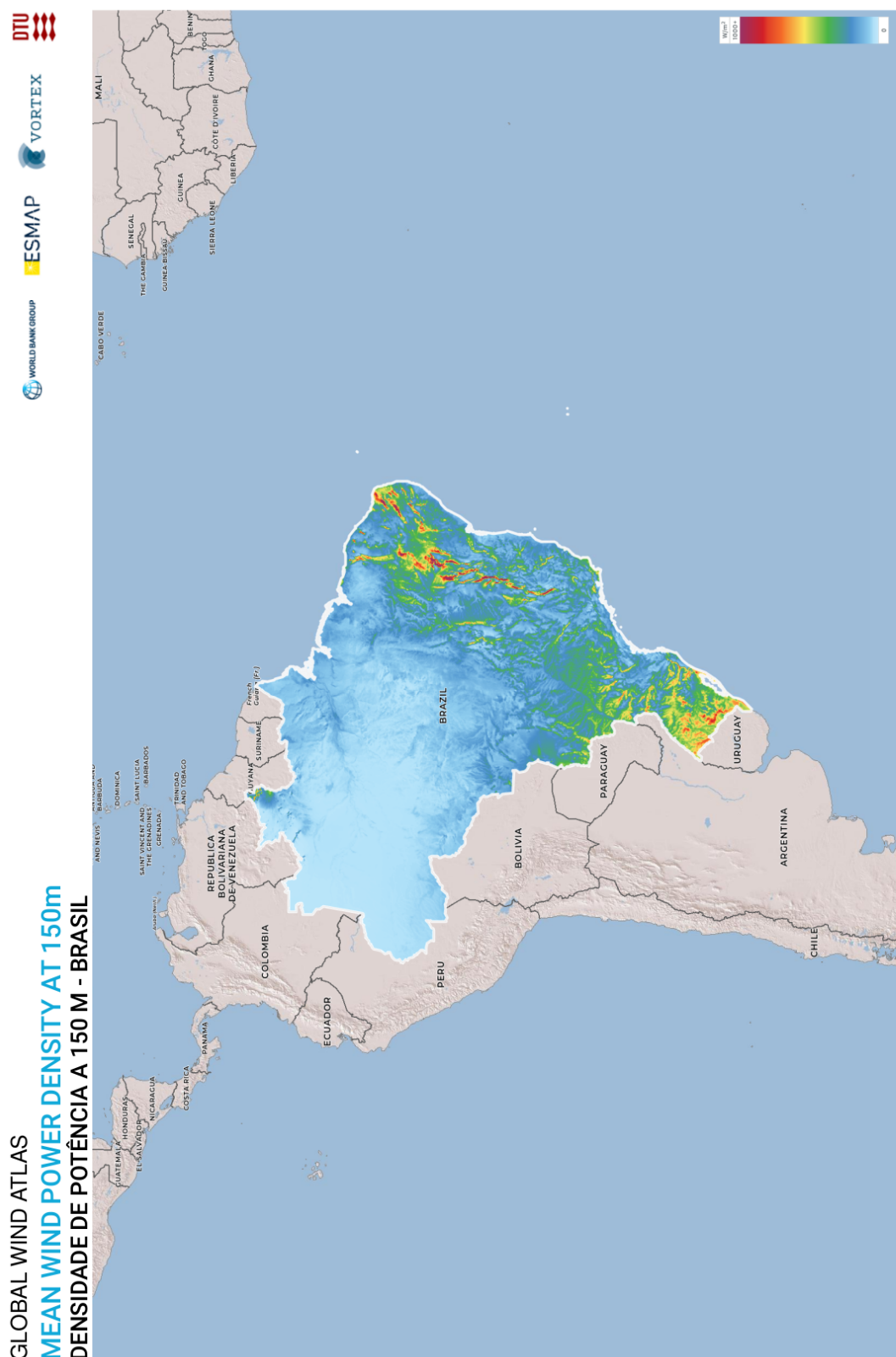
TERCIOTE, Ricardo. A energia eólica e o meio ambiente. *Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural*, 2002.

WIKIMEDIA. Lee Ranch Wind Speed Frequency. Disponível em:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lee_Ranch_Wind_Speed_Frequency.svg. Acesso
em: 1 de setembro de 2023.

APÊNDICE A



APÊNDICE B



This map is printed using the Global Wind Atlas online application website (v.3.3) owned by the Technical University of Denmark. For more information and terms of use, please visit <https://globalwindatlas.info>