

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS LONDRINA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

VERONIKA SASSEN BRAND

**MAPEAMENTO DO POTENCIAL PARA IMPLANTAÇÃO DE
EMPREENDIMENTOS EÓLICOS NO ESTADO DO PARANÁ**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA
2016

VERONIKA SASSEN BRAND

**MAPEAMENTO DO POTENCIAL PARA IMPLANTAÇÃO DE
EMPREENDIMENTOS EÓLICOS NO ESTADO DO PARANÁ**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Alberto Martins

Co-orientadora: Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes
Batista

LONDRINA

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Coordenação de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

Mapeamento do potencial para implantação de Empreendimentos Eólicos
no Estado do Paraná

por

Veronika Sassen Brand

Monografia apresentada no dia 23 de junho de 2016 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Alexandre Sordi

(UTFPR – Departamento Acadêmico de Ambiental - DAAMB-LD)

Profa. Dra. Sueli Tavares de Melo Souza

(UTFPR - Coordenação de Engenharia Ambiental - COEAM-LD)

Prof. Dr. Jorge Alberto Martins

(UTFPR – Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação - DIRPPG-LD)
Orientador

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma colaboraram para a elaboração deste trabalho. Peço desculpas caso algum nome não seja mencionado!

Primeiramente agradeço à compreensão, carinho e atenção dados pela minha mãe, Tania e irmã, Caroline. Vocês são a minha base e sem o apoio de vocês nada disso teria sido possível. Obrigada!

Em especial agradeço ao querido professor orientador Dr. Jorge Alberto Martins. Obrigada por todos os anos de iniciação científica, pelo espaço oferecido na “salinha”, por todas as oportunidades e votos de confiança, pela paciência e por fim – pelo menos por agora – pela minha orientação. Agradeço também a dedicação da professora co-orientadora Dra. Ligia Flávia Antunes Batista. Obrigada pela atenção tanto na minha orientação quanto pelas aulas ministradas durante a graduação. A sua paixão pelo trabalho é contagiante!

Agradeço à banca, Prof. Dra. Sueli Tavares de Melo Souza e Prof. Dr. Alexandre Sordi, pela disponibilidade e atenção dada ao longo do desenvolvimento e execução do projeto e trabalho final de conclusão de curso. Agradeço também aos professores da UTFPR Londrina que contribuíram diretamente ou indiretamente para a realização desse trabalho e para o meu crescimento pessoal e profissional, especialmente à querida Profa. Dra. Tatiane Dal Bosco e à Profa. Dra. Joseane Theororo.

Agradeço ao Dr. Uwe Seher, pela oportunidade de estágio que deu origem a ideia para esse trabalho de conclusão de curso. À Universität Trier, em especial aos professores Achim Röder, Erik Haß e Mike Teucher e ao programa Ciência sem Fronteiras (CsF) pela oportunidade de estudar fora do Brasil.

Agradeço ao pessoal do EAELab, em especial a Thais Fujita, Maurício Capucim, Dr. Marcos Vinicius Bueno e prof. Dra. Leila Droprinschinski Martins. Aos pesquisadores do CPTEC que me acolheram e orientaram: M.Sc. Thiago Souza Biscaro, Dr. Nelson Ferreira, Dr. Enrique Vieira, Dr. Wagner Flauber e M.Sc. Vinicius Sperling. Aos colegas da FOTOVOLTEC, em especial ao M.Sc. Werner Klaus.

Por fim, agradeço aos meus colegas de graduação e amigos, sobretudo à Rafaella Baracho, Soraya Yoshida e às meninas da EngAmb5, Thais Borini, Nariane Bernardo e às manés.

RESUMO

BRAND, V. S. **Mapeamento do potencial para implantação de Empreendimentos Eólicos no Estado do Paraná**. 2016. 90 f. Monografia (Graduação) – Curso Superior em Bacharelado de Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

A crescente demanda energética no mundo pressiona constantemente a ampliação da capacidade de geração de eletricidade. Logo, novas tecnologias, estratégias de poupança de energia e fontes alternativas de energia estão ganhando destaque. A energia eólica é uma ótima solução não apenas para suprir a demanda crescente, mas também para mitigar as alterações climáticas em curso. Esse tipo de energia pode ainda ter papel social relevante ao permitir que zonas rurais não conectadas à rede tenham acesso a eletricidade. Além disso, o tempo de retorno do investimento é baixo em relação a outras fontes não renováveis. O objetivo do trabalho foi, então, mapear o potencial para a implantação de empreendimentos eólicos *onshore* no Estado do Paraná a partir dos aspectos do meio físico (densidade de potência, declividade, hidrografia, unidades de conservação, linhas de transmissão, malha viária, subestações e áreas urbanizadas) com o uso de Geoprocessamento e Análise Multicritério. Foram executados dois tipos de análise multicritério: a inferência booleana usada para as áreas restritivas e a média ponderada para os demais critérios. O potencial máximo alcançado pela análise foi 0,8775 e o valor médio 0,5838. Os maiores valores de potencial de instalação se encontram na região centro-sul do Paraná nos Campos de Palmas e sudoeste, principalmente nos municípios de Clevelândia, Mariópolis, Marmeleiro e Flor da Serra do Sul. Na fronteira do estado com São Paulo e no norte paranaense, próximo a cidade de Maringá, também se encontram valores elevados. A classe de ocupação do solo Agricultura e Mosaico de atividade agrícola com vegetação natural é a que apresentou maior potencial médio (0,64) e cobre a maior parte do estado. Em todos os empreendimentos eólicos do Paraná – em operação e em planejamento, não localizados em unidades de conservação, observa-se que o potencial para implantação é maior que 0,6.

Palavras-chave: Potencial para implantação. Empreendimentos Eólicos. Análise Multicritério.

ABSTRACT

BRAND, V. S. **Mapping the implantation potential of Wind Power Plants in the State of Paraná.** 2016. 90 f. Monografia (Graduação) – Curso Superior em Bacharelado de Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

The increasing world energy demand constantly presses the expansion of the electricity capacity generation. Therefore, new technologies, energy saving strategies and alternative energy sources are getting importance. Wind power is a great solution not only to supply the growing demand but also to mitigate climate change in progress. This type of energy can also have significant social role in enabling rural areas not connected to the grid to have access to electricity. In addition, the investment payback is relative small when compared to other non-renewable sources. The aim of this project was to map the implantation potential of onshore wind power plants in the state of Paraná from the physical aspects of the environment (e.g. power density, slope, hydrography, conservation units, transmission lines, road network, substations and urbanized areas) using GIS and Multicriteria Analysis. Two types of Multicriteria Analysis were performed: Boolean inference, used to the restricted areas, and the weighted average, for the other criterias. The maximum potential value reached by the analysis was 0.8775 and the average value 0.5838. The largest implantation potential values are located in the south-central region of Parana in Campos de Palmas and southwest, mainly in the municipalities of Clevelândia, Mariópolis, Marmeleiro e Flor da Serra do Sul. On the border with São Paulo State and in the north region of Parana, near the city of Maringá, there are also high values. The land use class “Cropland/Natural Vegetation Mosaic” presented the highest average potential (0.64), and covers most of the state. In every wind power plant - in operation and planning, not located in protected areas in Parana State, it is observed that the implantation potential is greater than 0.6.

Keywords: Implantation Potential. Wind Power Plants. Multicriteria Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes de uma torre eólica	18
Figura 2 – Evolução do tamanho e potência dos aerogeradores ao longo do tempo	19
Figura 3 – Capacidade eólica global instalada 2000 – 2015	20
Figura 4 – Geração bruta de energias renováveis nos anos de 1990 e 2014 na Alemanha	21
Figura 5 – Função de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull com $c = 1$	26
Figura 6 – Função <i>fuzzy</i> linear e senoidal.....	31
Figura 7 – Diagrama de Venn ilustrando a diferença de fronteira entre um conjunto <i>fuzzy</i> (A) e um conjunto booleano (B).....	31
Figura 8 – Unidades de Conservação do Estado do Paraná.....	38
Figura 9 – Bacias Hidrográficas e Hidrografia do Estado do Paraná.....	39
Figura 10 – Linhas de Transmissão de energia elétrica e subestações no Estado do Paraná ..	40
Figura 11 – Ruas, Estradas e Rodovias no Estado do Paraná.....	41
Figura 12 – Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s	43
Figura 13 – Distribuição espacial do vento médio anual a 75 m de altura	46
Figura 14 – Curva de Potência das turbinas ENERCON E-82 2,3 MW e GAMESA G114 2,0 MW	54
Figura 15 – Mapa de Altimetria do Estado do Paraná.....	56
Figura 16 – Mapa de Declividade do Estado do Paraná (em porcentagem).....	56
Figura 17 – Mapa de Declividade do Estado do Paraná padronizado	58
Figura 18 – Densidade de Potência (W/m^2) do Estado do Paraná	59
Figura 19 – Mapa da densidade de potência do Estado do Paraná padronizada.....	60
Figura 20 – Mapa de distância euclidiana padronizada (Linhas de Transmissão).....	61
Figura 21 – Mapa de distância euclidiana padronizada (Ruas, estradas e rodovias)	62
Figura 22 – Mapa de distância euclidiana padronizada (Subestações).....	62
Figura 23 – Mapa de distância euclidiana padronizada (Áreas urbanizadas).....	63
Figura 24 – Mapa dos Fatores Restritivos (Hidrografia)	64
Figura 25 – Mapa dos Fatores Restritivos (Unidades de Conservação).....	64
Figura 26 – Mapa dos Fatores Restritivos (Áreas Urbanizadas)	65
Figura 27 – Mapa temático do potencial para a instalação de empreendimentos eólicos no Estado do Paraná.....	66
Figura 28 – Densidade de potência máxima, média e mínima nas diferentes classes de potencial calculadas.....	67
Figura 29 - Mapa temático do potencial para implantação de empreendimentos eólicos no Estado do Paraná maior que 0,7	72
Figura 30 – Mapa temático do potencial para implantação de empreendimentos eólicos nos Campos de Palmas	73
Figura 31 – Mapa temático do potencial para implantação de empreendimentos eólicos nos Campos Gerais.....	75
Figura 32 – Mapa temático do potencial para implantação de empreendimentos eólicos em Marmeleiro.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo da Evolução da Matriz de Energia Elétrica (MW)	22
Tabela 2 – Potência instalada dos empreendimentos em operação no Brasil.....	23
Tabela 3 – Potência fiscalizada (kW) dos empreendimentos eólicos em operação no Brasil por estado.....	24
Tabela 4 – Consumo paranaense de energia por setor em 2013.....	35
Tabela 5 – Descrição dos empreendimentos eólicos no Estado do Paraná	37
Tabela 6 – Potencial de Geração Eólica no Paraná, por alturas e faixas de velocidades de ventos	44
Tabela 7 – Faixas de declividade e respectivas áreas	57
Tabela 8 – Faixas de densidade de potência (W/m^2) e respectivas áreas.....	60
Tabela 9 – Área e densidade de potência de diferentes classes de potencial de instalação	67
Tabela 10 – Potencial de implantação médio (%) para cada classe de ocupação do solo do arquivo MODIS no Estado do Paraná.....	69
Tabela 11 – Potencial de implantação calculado para os empreendimentos eólicos no Paraná	70
Tabela 12 – Locais escolhidos para o cálculo da estimativa de energia produzida	78
Tabela 13 – Coeficientes da Distribuição de <i>Weibull</i> e Produção anual de energia estimada ...	79
Tabela 14 – Avaliação dos locais quanto aos critérios utilizados no cálculo do potencial	79

LISTA DE SIGLAS

AGEE	Grupo de trabalho em Energias Renováveis
ADA	Área de Influência Direta
ANA	Agência Nacional das Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APA	Área de Proteção Ambiental
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DRO	Despacho de Requerimento de Outorga
EEG	Lei de Energias Renováveis
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPIA	Estudo Prévio de Impacto Ambiental
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
EU	União Europeia
GEOS-5	<i>Goddard Earth Observing System Data Assimilation System Version 5</i>
GIS/SIG	Sistema de Informação Geográfica
GWEC	Conselho Global de Energia Eólica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	Agência Internacional de Energia
IGBP	<i>International Geosphere Biosphere Program</i>
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MERRA	<i>Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications</i>
MMA	Ministério de Meio Ambiente
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	Agência Nacional Espacial Americana
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PCH	Pequena Central Hidrelétrica

PRAD	Programa de Recuperação de Áreas Degradadas
Proinfa	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
REVIS	Refúgio de Vida Silvestre
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UC	Unidade de Conservação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DA ENERGIA EÓLICA.....	16
3.2 COMPONENTES E TECNOLOGIA DOS AEROGERADORES	17
3.3 CENÁRIO MUNDIAL DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS	19
3.4 CENÁRIO NACIONAL DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	22
3.5 COMPORTAMENTO DA ATMOSFERA E POTENCIAL EÓLICO.....	24
3.6 GEOPROCESSAMENTO E SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG).....	28
3.7 ANÁLISE MULTICRITÉRIO	29
3.8 CRITÉRIOS PARA A AVALIAÇÃO DE LOCAIS PARA A INSTALAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS.....	32
4. ÁREA DE ESTUDO.....	35
4.1 UNIDADES DE CONSERVAÇÃO.....	37
4.2 HIDROGRAFIA.....	38
4.3 LINHAS DE TRANSMISSÃO E SUBESTAÇÕES	39
4.4 RUAS, ESTRADAS E RODOVIAS.....	40
4.5 CLIMATOLOGIA NO ESTADO DO PARANÁ	41
4.5.1 REGIME DOS VENTOS NO PARANÁ	42
4.5.2 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA DO PARANÁ NO CONTEXTO BRASILEIRO.....	43
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
5.1 ELABORAÇÃO DO BANCO DE DADOS GEOGRÁFICO	47
5.2 CRITÉRIOS UTILIZADOS NO CÁLCULO DO POTENCIAL	49
5.3 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS	51
5.4 ANÁLISE MULTICRITÉRIO	52
5.5 VALIDAÇÃO DO MAPA DE POTENCIAL EÓLICO.....	53
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
6.1 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS CRITÉRIOS.....	55

6.1.1 DECLIVIDADE	55
6.1.2 POTENCIAL EÓLICO	58
6.1.3 MAPA DE DISTÂNCIAS	61
6.1.4 FATORES RESTRITIVOS.....	63
6.2 POTENCIAL PARA IMPLANTAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS EÓLICOS	65
6.3 CLASSES DE OCUPAÇÃO DO SOLO E O POTENCIAL PARA IMPLANTAÇÃO	68
6.4 EMPREENDIMENTOS EÓLICOS E O POTENCIAL PARA IMPLANTAÇÃO CALCULADO	69
6.4.1 CAMPOS DE PALMAS	73
6.4.2 CAMPOS GERAIS.....	74
6.4.3 MARMELEIRO	77
6.4 ESTIMATIVA DE ENERGIA PRODUZIDA POR UM AEROGERADOR	78
7. CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética no mundo, devido ao aumento populacional e ao uso de equipamentos eletrônicos cada vez mais sofisticados tecnologicamente, pressiona constantemente a ampliação da capacidade de geração de eletricidade. Conseqüentemente, as preocupações com a demanda global de energia e a poluição ambiental associada à sua produção vêm aumentando. Para reduzir estas preocupações as comunidades globais estão tentando encontrar e implementar novas tecnologias, estratégias de poupança de energia e fontes alternativas de energia (SAIDUR, 2011).

A energia eólica é uma ótima solução para mitigar as alterações climáticas e para fornecer eletricidade em zonas rurais não conectadas à rede (TREMEAC; MEUNIER, 2009). Além disso, o retorno do investimento é alto em relação a outras fontes não renováveis, como o petróleo, gás natural e carvão. Isso coloca o vento em uma posição favorável em relação a outras fontes, e sugere que a energia eólica pode render benefícios econômicos e sociais significativos (KUBISZEWSKI; CLEVELAND; ENDRES, 2010).

No Brasil, aproximadamente 61% da energia produzida é proveniente de usinas hidrelétricas, 28% vem da queima de combustíveis nas usinas termelétricas, 6% de energia eólica e 3% de pequenas centrais hidrelétricas (ANEEL, 2016). As projeções do mercado energético para os anos de 2014-2018 são de que a energia eólica tem potencial para desempenhar um papel de liderança no futuro da matriz energética nacional e internacional, segundo o Conselho Global de Energia Eólica (GWEC) que divulgou no relatório *Global Wind Report – Annual Market Update (2014)* (GWEC, 2015).

A produção de energia através de fontes renováveis está diretamente ligada com as alterações no clima, atribuídas à quantidade de gases estufa que são lançados na atmosfera. De acordo com o 4º Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2007, parte significativa do aquecimento da Terra ao longo do último meio século foi causado por atividades humanas. Os gases emitidos pela queima de combustíveis fósseis são considerados como sendo os principais responsáveis pelo efeito estufa.

A energia proveniente de turbinas eólicas não produz poluentes como as outras fontes de energia de origem fóssil, tais como o gás natural, carvão e petróleo. Além disso, a substituição das fontes atuais de energia pode reduzir a poluição do ar e como resultado, reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂), óxido de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO₂) (SAIDUR et. al., 2011). Estima-se que um aerogerador de 2,5 kW pode evitar a emissão de cerca de 2 toneladas de CO₂ por ano e um de 6 kW pode impedir a emissão de cerca de 5 toneladas de CO₂ na atmosfera por ano (ESTF, 2009).

Além disso, o Brasil possui um potencial eólico enorme que não é explorado. Segundo o Atlas do Potencial eólico Brasileiro (2001), o potencial total é de 143 GW, considerando torres de até 50 metros. Todavia, considerando a altura das torres e o avanço tecnológico recente, é muito provável que este valor esteja aquém do verdadeiro potencial de exploração de energia eólica no país. A maioria dos parques eólicos existentes se encontram na região nordeste, somando 267 parques em operação. As regiões sudeste e sul, que possuem potenciais de cerca de 30 e 23 GW, respectivamente, com base nas subestimativas de 2001, representam 35% do potencial nacional, mas possuem apenas 86 parques em operação (ANEEL, 2016).

Grande parte dos recursos energéticos se localiza em regiões pouco desenvolvidas, distantes dos grandes centros consumidores e sujeitos a restrições ambientais. Promover o planejamento de parques eólicos pode alavancar o desenvolvimento econômico-social dessas regiões e garantir o suprimento energético do país, por isso, identificar essas áreas é essencial.

O mapeamento das áreas com maior potencial para a implantação de parques eólicos envolve o uso de uma variedade de fontes de dados e atribuição de pesos diferentes aos critérios escolhidos. Esses critérios são muitas vezes determinados por gestores, especialistas em pesquisa, partes interessadas, ou grupos de interesse para melhorar a tomada de decisões. Os dados, de diferentes fontes, são frequentemente importados para um Sistema de Informação Geográfica (SIG), que os combina (JANKE, 2010).

Assim, o presente trabalho apresenta o mapeamento das áreas com maior potencial para a implantação de parques eólicos *onshore* no estado do Paraná, levando

em consideração os aspectos do meio físico, com o uso de Geoprocessamento e Análise Multicritério.

Este trabalho está organizado em sete capítulos. O Capítulo 1, conteúdo já exposto, contextualiza a questão e o Capítulo 2 apresenta os objetivos. O Capítulo 3, Referencial Teórico, discorre sobre os conceitos utilizados para execução deste estudo. A Área de Estudo é apresentada no Capítulo 4 e os Materiais e Métodos utilizados estão descritos no Capítulo 5, enquanto que nos Capítulos 6 e 7 são apresentados os Resultados e Discussões e as Conclusões, respectivamente.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Mapear o potencial para a implantação de parques eólicos *onshore* no Estado do Paraná a partir dos aspectos do meio físico (densidade de potência, declividade, hidrografia, unidades de conservação, linhas de transmissão, malha viária, subestações e áreas urbanizadas) com o uso de Geoprocessamento e Análise Multicritério.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Descrever as principais características climatológicas do Paraná que demonstrem sua potencialidade para aproveitamento do vento como fonte de energia;
- Elaborar produtos cartográficos de declividade, distância de linhas de transmissão, malha viária, subestações e áreas urbanizadas para serem usados como critérios de decisão no mapeamento do potencial para implantação de empreendimentos eólicos;
- Elaborar produtos cartográficos de hidrografia, unidades de conservação e áreas urbanizadas para serem usados como fatores restritivos no mapeamento do potencial;
- Combinar os dados georreferenciados de declividade, mapa de distância e fatores restritivos por meio de técnicas da média ponderada e inferência booleana, para geração do mapa síntese de potencial;
- Avaliar e validar o mapa de potencial gerado a partir da extração do potencial calculado nos locais com empreendimentos eólicos do Estado do Paraná e da estimativa da energia produzida por um aerogerador em dois pontos: um ponto de alto e um de baixo potencial de implantação.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DA ENERGIA EÓLICA

O uso da energia eólica já vem de longa data. O primeiro registro histórico é de que os moinhos de vento surgiram na Pérsia, por volta de 200 a.C., onde eram usados na moagem de grãos e bombeamento d'água. Mas acredita-se que antes disso os chineses já usavam os moinhos de vento na irrigação dos campos de arroz (CRESESB, 2015).

A introdução dos cata-ventos na Europa deu-se, principalmente, no retorno das Cruzadas há 900 anos (CRESESB, 2015). Os tradicionais moinhos de vento de eixo de rotação horizontal provavelmente foram inventados na Europa. A partir do século XII, esses moinhos, conhecidos como tipo holandês, começaram a ser usados em larga escala em vários países da Europa, como Inglaterra, França e Holanda (FADIGAS, 2011).

No século 17, a Holanda foi o país europeu onde os moinhos de vento tiveram maior influência. Além da moagem dos grãos, a drenagem de terras foi de extrema importância, já que os países baixos ficam abaixo do nível do mar (FADIGAS, 2011 apud. HAU, 2005).

O surgimento da máquina a vapor durante a Revolução Industrial, no século 19, declinou o uso da energia eólica nos países europeus. Em contrapartida, nos Estados Unidos houve a expansão do uso dos moinhos em função da necessidade de energização das áreas que não possuíam reservas hídricas. Esses equipamentos receberam inúmeros aperfeiçoamentos e serviram de base para o atual modelo padrão de turbina eólica americana (FADIGAS, 2011 apud. HAU, 2005).

O início da adaptação dos cata-ventos para geração de energia elétrica teve início no fim do século XIX. Em 1888, Charles F. Brush, um industrial voltado para eletrificação em campo, construiu na cidade de Cleveland, Ohio, o primeiro cata-vento destinado à geração de energia elétrica (CRESESB, 2015).

A Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945) contribuiu para o desenvolvimento dos aerogeradores de médio e grande porte, pois os países em geral empenhavam grandes esforços no sentido de economizar combustíveis fósseis (CRESESB, 2015). O primeiro choque do petróleo, nos anos 70, fez com que a geração de energia a partir de fontes eólicas fosse vista de forma viável e estratégica. Investimento em muitas pesquisas foi realizado para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes, de baixo custo e em larga faixa de operação (NASCIMENTO et al., 2003).

A Agência Internacional de Energia (IEA), criada em 1974, propôs diversificar as fontes de energia, substituir o petróleo por outras fontes de energia e utilizar a energia com mais racionalidade. Isso propiciou a retomada dos investimentos em energia eólica em diversos países (FADIGAS, 2011).

Na Dinamarca, em 1981, o professor Paul La Cour desenvolveu uma turbina eólica acoplada a um gerador de corrente contínua (CC) (FADIGAS, 2011). A Alemanha construiu e operou turbinas com o maior número de inovações tecnológicas da época que permanecem em uso nos modelos atuais. Os componentes do aerogerador eram feitos com materiais compostos, o que aliviaram os esforços em rolamentos. Essa inovação mostrou ser muito mais eficiente comparada aos modelos até então feitos de metais (CRESESB, 2015 apud CHESF-BRASCEP, 1987; CRESESB, 2015 apud DIVONE, 1994).

3.2 COMPONENTES E TECNOLOGIA DOS AEROGERADORES

Os principais componentes de uma turbina eólica moderna de eixo horizontal são mostrados na Figura 1 e descritos abaixo:

- **Fundamento:** é a base do aerogerador, feito de concreto armado. Garante a estabilidade e suporte da carga da estrutura. É necessário que se faça um estudo geológico para atestar a capacidade de carga do solo. Além da armadura e do concreto, pertence ao fundamento o membro de fundação, que contém proteção contra raios e a instalação de condutores.

- Rotor: pás e cubo (suporte), onde estão acopladas, mecanismo de controle de passo da pá;
- Sistema de transmissão mecânico: incluem as partes rotativas da turbina (excluindo o rotor), eixos (alta e baixa rotação), caixa multiplicadora de velocidade, acoplamentos, freio mecânico e gerador elétrico;
- Nacele e sua base: compartimento no qual estão alojados os vários componentes (excluindo o rotor), base da nacele e sistema de orientação do rotor;
- Suporte estrutural (torre): A torre é, na sua maioria a maior e mais pesada parte de uma turbina de vento. São feitas geralmente de aço, mas as torres de concreto estão se tornando mais competitivas.

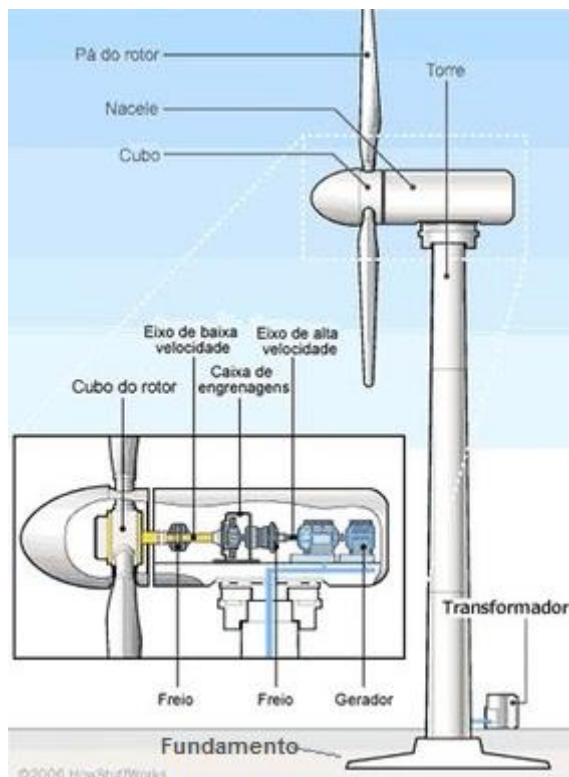


Figura 1 – Componentes de uma torre eólica

Fonte: <http://microeolica.weebly.com/constituiccedilatildeo-de-uma-teh.html>, adaptado

A usina converte a energia cinética do vento em energia elétrica. Isto é feito através do perfil aerodinâmico das pás de rotor, que são rodados pelo ar que flui em um movimento de rotação do gerador.

O comércio e fabricação de turbinas evoluiu muito nas últimas décadas. A Figura 2 mostra o expressivo crescimento do tamanho e da potência de aerogeradores desde 1980. Em 2015 as turbinas alcançaram uma potência unitária de 5 MW e a previsão é que continuem a aumentar.

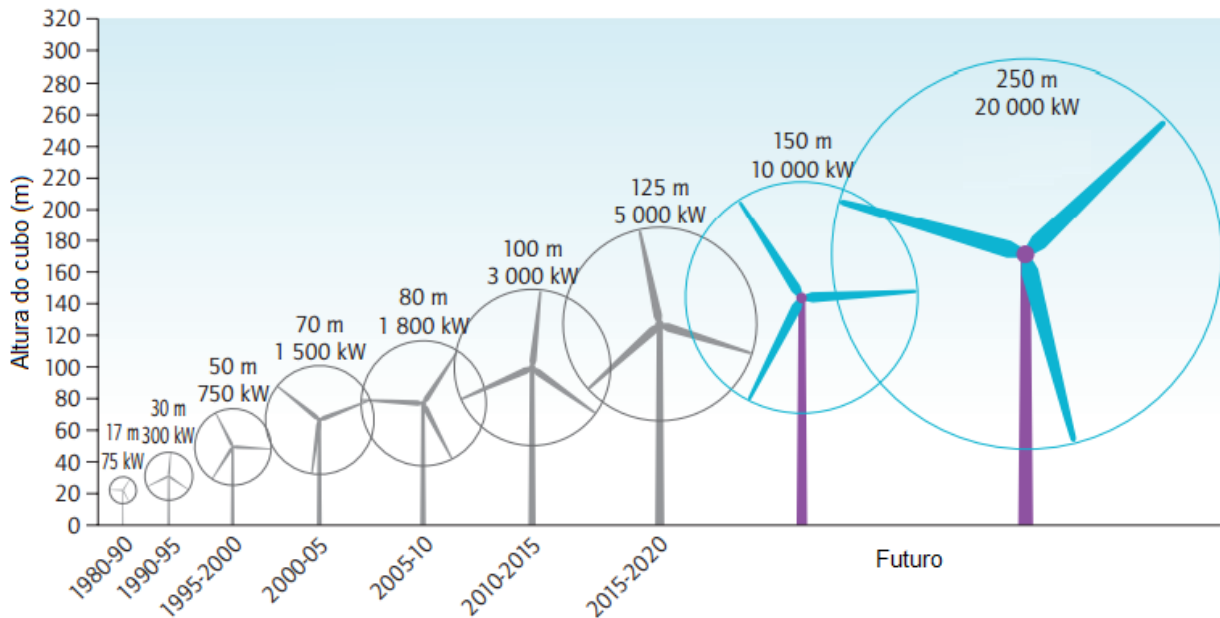


Figura 2 – Evolução do tamanho e potência dos aerogeradores ao longo do tempo

Fonte: IEA, 2013

3.3 CENÁRIO MUNDIAL DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

Em relação aos anos anteriores, em 2014, a participação das fontes de energia renovável continuou a crescer, apesar da diminuição do preço do óleo durante o segundo semestre do ano (REN21, 2015). Pela primeira vez em quatro décadas, a emissão de carbono associada ao consumo de energia permaneceu estável enquanto o consumo mundial cresceu (IEA, 2014).

A diminuição do preço do óleo pode ser associada ao aumento da participação das energias renováveis na matriz energética global e o aumento da eficiência de energia (REN21, 2015). Em 2013, a energia renovável representou 19,1% da energia consumida

globalmente (REN21, 2015). Desta quota total, as energias renováveis modernas – biomassa, geotérmica, solar, eólica, biocombustíveis, etc. – representaram cerca de 10,1% do consumo energético (REN21, 2015).

O ano de 2014 foi recorde para a indústria eólica, pois as instalações anuais ultrapassaram a marca de 50 GW pela primeira vez, trazendo um forte aumento em comparação com 2013, quando as instalações globais foram pouco mais de 35,6 GW. O recorde anterior foi estabelecido em 2012, quando mais de 45 GW de capacidade foi instalada em termos mundiais (GWEC, 2015).

Em 2014 o investimento total no setor de energia limpa foi máximo. O setor de energia eólica mundial viu os investimentos subirem 11% durante o ano. A capacidade instalada total global no final de 2014 foi de 369,7 GW, o que representa um crescimento cumulativo de mercado em mais de 16%, embora seja inferior à taxa média de crescimento ao longo dos últimos 10 anos (2005-2014) de quase 23%, como se observa na Figura 3. Em 2015 a taxa de crescimento da potência instalada global se manteve (17%) (GWEC, 2016).

Desde 1992 a capacidade instalada vem aumentando e a tendência é de que essa quota aumente ainda mais. Isso faz com que a energia eólica seja uma das tecnologias de energia renovável de mais rápido crescimento e seja responsável pela maior parcela da geração de eletricidade de fontes renováveis adicionada nos últimos anos (GWEC, 2015).

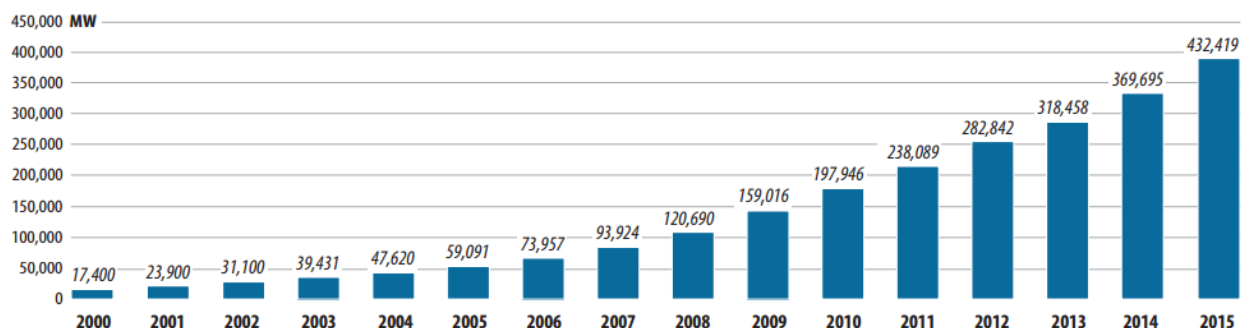


Figura 3 – Capacidade eólica global instalada 2000 – 2015

Fonte: GWEC, 2016

Na Europa, um total de 128,8 GW está instalado, um crescimento de 9,8% em relação ao ano anterior e inferior ao crescimento recorde registrado em 2012 (+12% em relação a 2011). A Alemanha continua a ser o país da União Europeia (EU) com a maior capacidade instalada, seguida pela Espanha, Reino Unido, França e Itália (EWEA, 2015).

Na Alemanha, as energias renováveis atendem à uma fração de 27,7% do consumo de eletricidade (160.610 GWh), e elas forneceram mais energia para a rede do que o carvão mineral (155.800 GWh). A proporção de Energias renováveis no consumo bruto de eletricidade no ano de 2014 aumentou em 2,3 pontos percentuais, que vem crescendo anualmente e alcançando uma ordem de grandeza semelhante à estipulada pela Lei de Energias Renováveis (EEG) de que 45% da produção energética seja renovável até 2025 (IWES, 2015).

A maior parcela advinda de energias renováveis continua a ser a energia eólica com 35% (*onshore* e *offshore*) (ver Figura 4). Segundo o Grupo de trabalho em Energias Renováveis (AGEE), em 2014 as turbinas eólicas alemãs contribuíram com 55.970 GWh de energia. A produção de eletricidade de origem eólica aumentou 4.262 GWh de 2013 para 2014, já a produção dos sistemas fotovoltaicos 3.920 GWh.

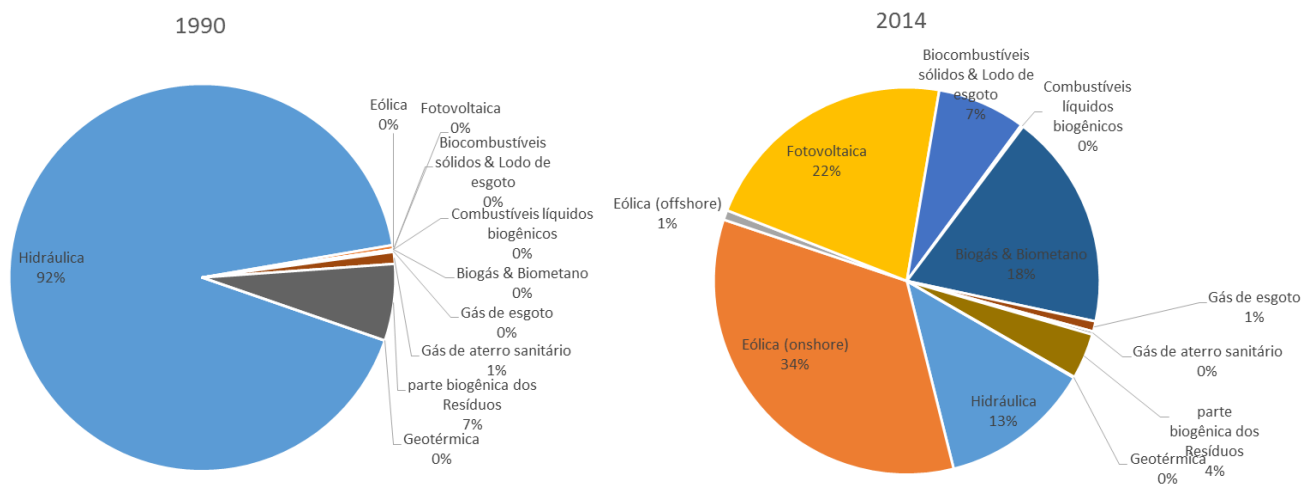


Figura 4 – Geração bruta de energias renováveis nos anos de 1990 e 2014 na Alemanha

Fonte: AGEE (2015), adaptada

Espera-se que nos próximos anos o Brasil, Canadá, Índia e os Estados Unidos aumentem a capacidade instalada no setor eólico (GWEC; GREENPEACE, 2005), o que

de fato vem acontecendo, como mostram as Estatísticas de 2014 e 2015 da GWEC, no qual esses países aparecem entre os 10 com maior capacidade cumulativa instalada.

3.4 CENÁRIO NACIONAL DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

Entre os países da América do Sul, o Brasil emergiu como mercado mais promissor para o desenvolvimento de energia eólica (GWEC, GREENPEACE, 2005). No maior país do continente, a evolução da oferta elétrica entre 2010 e 2015, nas previsões do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (Tabela 1), sofreu mudanças significativas, por tipo de fonte, destacando-se os crescimentos percentuais para a expansão das usinas eólicas (535%) e das usinas a óleo (135 %).

Tabela 1 – Resumo da Evolução da Matriz de Energia Elétrica (MW)

	2010		2015		Crescimento 2010-2015	
	MW	%	MW	%	MW	%
<i>Hidráulica</i>	85.690	79,3	98.035	71,1	12.345	14,4
<i>Nuclear</i>	2.007	1,9	2.007	1,5	-	-
<i>Gás/GNL</i>	9.263	8,6	12.180	8,8	2.917	31,5
<i>Carvão</i>	1.415	1,3	3.205	2,3	1.790	126,5
<i>Biomassa</i>	4.577	4,2	7.272	5,3	2.695	58,9
<i>Óleo/Diesel</i>	4.212	3,9	9.913	7,2	5.701	135,4
<i>Eólica</i>	826	0,8	5.248	3,8	4.422	535,4
<i>Total</i>	107.990	100	137.860	100	29.870	27,7

Fonte: ONS, 2011

O Brasil recebe atualmente 61,12% de sua energia elétrica a partir de usinas hidrelétricas, completada pelas usinas termelétricas (27,74%), eólica (6,05%) e pequenas centrais hidrelétricas (3,38%) (Tabela 2) (ANEEL, 2016). É considerado, portanto, um dos países com a matriz energética mais limpa do mundo. Atualmente estão em operação 355 empreendimentos eólicos no Brasil, produzindo cerca de 8,62 GW e em construção mais 147 empreendimentos (3,43 GW). Ainda temos mais 244 empreendimentos eólicos com construção não iniciada disponibilizando mais 5,82 GW na rede elétrica (ANEEL, 2016).

Tabela 2 – Potência instalada dos empreendimentos em operação no Brasil

	Quantidade	Potência Fiscalizada (kW)	%
<i>Central Geradora Hidrelétrica</i>	555	430.672	0,30
<i>Central Geradora Eólica</i>	355	8.622.590	6,05
<i>Pequena Central Hidrelétrica</i>	457	4.825.445	3,38
<i>Central Geradora Solar Fotovoltaica</i>	39	22.952	0,02
<i>Usina Hidrelétrica</i>	203	87.136.248	61,12
<i>Usina Termelétrica</i>	2.884	39.545.330	27,74
<i>Usina Termonuclear</i>	2	1.990.000	1,40
<i>Total</i>	4.495	142.573.237	100

Fonte: ANEEL, 2016

O crescimento da capacidade eólica instalada é resultado de uma série de incentivos dados pelo Governo Brasileiro. Em 2004 foi introduzido no País o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) (FADIGAS, 2011). Ele também adotou premissas do sistema de cotas, como o leilão de projetos de energia renovável, determinando cotas de potência contratada para cada tecnologia, além de subsídios por meio de linhas especiais de crédito do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) (FADIGAS, 2011).

O Proinfa implantou, até 31 de dezembro de 2011, um total de 119 empreendimentos, constituído por 41 eólicas, 59 pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e 19 térmicas a biomassa (ELETROBRAS, 2015).

Recursos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) também foram imprescindíveis no desenvolvimento de novos parques eólicos através de políticas de planejamento, expansão e busca pela diversificação e sustentabilidade energética do Brasil. Até 2017, 218 Usinas de Energia Eólica serão construídas, das quais 130 (60%) já estão concluídas (PORTAL BRASIL, 2015).

Dos 355 empreendimentos eólicos em operação no país, 269 destes se encontram no Nordeste, 3 no Sudeste e 83 no Sul (Tabela 3). O Nordeste é responsável por 78,81% da potência fiscalizada pela ANEEL (2016). Já na região Sul, dos 20,86% da potência fiscalizada do país, 18,02% são provenientes de parques eólicos no Rio Grande

do Sul. Com o PAC, 218 usinas entrarão em operação, sendo que algumas destas já estão concluídas. 174 são no Nordeste e 44 no Sul. Isso significa 5746 MW, suficientes para abastecer 5,7 milhões de habitantes (PORTAL BRASIL, 2015).

Tabela 3 – Potência fiscalizada (kW) dos empreendimentos eólicos em operação no Brasil por estado

<i>Região</i>	<i>Estados</i>	<i>Quantidade de empreendimentos</i>	<i>Potência Fiscalizada (kW)</i>	<i>Potência Fiscalizada (%)</i>	
<i>Nordeste</i>	RN	97	2.671.556	30,98	78,81
	BA	64	1.612.208	18,70	
	CE	48	1.323.234	15,35	
	PI	25	705.800	8,19	
	PE	20	379.295	4,40	
	PB	13	69.000	0,80	
	SE	1	34.500	0,40	
	MA	1	22,5	0,00	
<i>Sudeste</i>	MG	1	156	0,00	0,33
	SP	1	2,24	0,00	
	RJ	1	28.050	0,33	
<i>Sul</i>	PR	1	2.500	0,03	20,86
	SC	15	242.499,5	2,81	
	RS	67	1.553.766,98	18,02	
	Total	355	8.622.590,22	100,00	100,00

Fonte: ANEEL, 2016

3.5 COMPORTAMENTO DA ATMOSFERA E POTENCIAL EÓLICO

É relevante entender como a dinâmica da atmosfera interfere na disponibilidade do recurso energético eólico. O movimento de parcelas de ar, na atmosfera, é denominado vento. Na meteorologia, a velocidade e a direção do vento, juntamente com a temperatura, a umidade e a pressão do ar atmosférico, são as variáveis mais importantes empregadas na descrição meteorológica da atmosfera terrestre (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008).

O vento, como agente meteorológico, atua nas modificações das condições do tempo, sendo responsável pelo transporte de umidade e de energia na atmosfera (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008). O setor eólico se interessa não apenas no aspecto meteorológico, mas exige uma avaliação mais apurada das condições de vento em diferentes tipos de relevos, rugosidade do terreno e em diferentes alturas, afim de uma avaliação mais precisa do aproveitamento energético dos ventos (FADIGAS, 2011).

Os principais mecanismos de formação de ventos são o aquecimento desigual da superfície terrestre em escala global, advindo das estações do ano, diferentes latitudes e longitudes, ciclo dia e noite, e dependendo do local (litoral ou interior, e montanha ou vale) (DO AMARANTE, 2007). O vento pode variar bastante espacialmente, dependendo do local e da altura, e temporalmente, dependendo do horário e do dia. No intervalo de meses e anos o regime passa a apresentar uma certa regularidade.

A fim de dimensionar um sistema para aproveitar energia eólica, é necessário conhecer o regime de vento do local (FADIGAS, 2011), ou seja, a frequência com que o vento sopra e com que intensidade isso ocorre. Assim, em termos estatísticos o comportamento do vento pode ser representado por uma distribuição probabilística. Informações sobre os parâmetros que descrevem o comportamento dos ventos podem ser obtidos através do tratamento de dados de estações meteorológicas.

Existem várias funções de distribuição probabilística que descrevem o comportamento do vento, e cada uma delas representa um determinado padrão, assim, não necessariamente diferentes locais terão o mesmo tipo de função descritiva (FADIGAS, 2011). As principais funções usadas pela engenharia eólica são:

- Distribuição Normal (Gaussiana ou bivariável),
- Distribuição exponencial,
- Distribuição de Rayleigh, e
- Distribuição de Weibull.

A distribuição de *Weibull* (Figura 5) é a que consegue representar melhor um grande número de padrões de comportamento de vento tanto nas camadas próximas à superfície quanto nas mais afastadas (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008), isso porque ela incorpora a distribuição exponencial quando $k=1$ e a de Rayleigh quando $k=2$,

além de se ajustar de forma semelhante à distribuição normal quando o valor de k é próximo de 3,5 (FADIGAS, 2011).

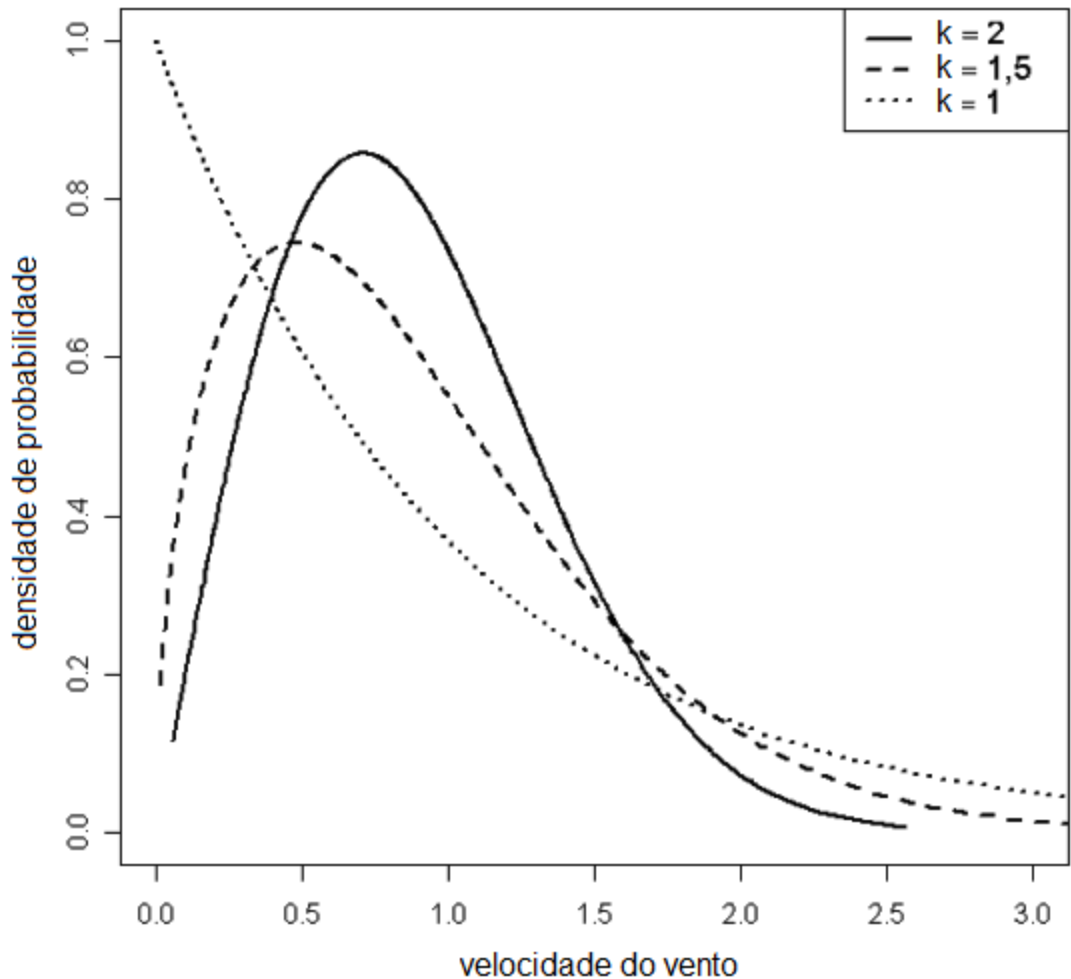


Figura 5 – Função de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull com $c = 1$

Fonte: Portal Action, adaptado

A equação de densidade de probabilidade que define a distribuição *Weibull* é mostrada a seguir na Equação 1.

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (1)$$

onde c é o parâmetro de escala, em m/s, proporcional a velocidade média do vento, v é a velocidade do vento, em m/s, e k é o parâmetro forma, que especifica a forma da distribuição de *Weibull*. Valores de k próximos a 1 significam ventos muito variáveis,

enquanto que ventos constantes são caracterizados por um maior valor de k , próximo de 3 (SUISSE ÉOLE, 2015).

Existem diversos métodos numéricos para o cálculo dos parâmetros de *Weibull*. Sete deles são apresentados e avaliados no artigo de Rocha et. al. (2012) como o método gráfico, empírico, dos momentos e máxima semelhança (*maximum likelihood*). Nesse último, por exemplo, os parâmetros de forma (k) e escala (c) são calculados a partir de iterações numéricas conforme as Equações 2 e 3, onde n é o número de observações e v_i é a velocidade do vento no instante i . (ROCHA et al., 2012)

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad (2)$$

$$c = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (3)$$

Em alturas de interesse para o aproveitamento energético, o vento é afetado por obstáculos próximos aos aerogeradores, rugosidade do terreno (tipo de vegetação, uso e ocupação do solo) e declividade (presença de colinas, depressões ou vales) (FADIGAS, 2011). A velocidade em alturas diferentes da de medição pode ser calculada a partir da Equação 4. Note que a velocidade (V_2) depende da rugosidade do terreno (Z_0), da altura (H_1) e velocidade do vento medidos (V_1) e da altura na qual se quer determinar a velocidade do vento (H_2).

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{\ln\left(\frac{H_2}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_1}{Z_0}\right)} \quad (4)$$

Um aerogerador capta parte da energia cinética do vento e transforma em potência (dada em *Watts* ou *Joule/s*), que é a energia convertida por unidade de tempo. A potência contida no vento (P) é função do cubo da velocidade do vento e é dada pela Equação 5.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (5)$$

ρ é a densidade do ar (kg/m^3); A , a área do rotor (m^2) e v , a velocidade do vento (m/s).

A potência elétrica gerada por um aerogerador pode ser calculada com base em técnicas estatísticas. Para uma distribuição de vento conhecida $p(v)$ e uma curva de

potência $Pe(v)$ de um aerogerador, também conhecida, a potência elétrica ($\bar{P}e(v)$) pode ser calculada pela Equação 6.

$$\bar{P}e(v) = \int_0^{\infty} Pe(v)p(v)dv \quad (6)$$

De forma simplificada, pode-se calcular a potência elétrica a partir de uma somatória expressa na Equação 7.

$$\bar{P}e = \sum_{v=1}^{v_{cut-out}} Pe(v)p(v) \quad (7)$$

A velocidade varia de 1 até a velocidade *cut-out*, velocidade na qual o aerogerador é desligado por medida de segurança.

O bom conhecimento do regime de vento é o ponto de partida para o planejamento de um sistema de aproveitamento da energia eólica (FADIGAS, 2011). A climatologia do local tem expressiva influência sobre o regime de ventos e conseqüentemente sobre o potencial eólico. Estes fatores serão discutidos para a região da Área de Estudo na seção 4.5 CLIMATOLOGIA NO ESTADO DO PARANÁ.

3.6 GEOPROCESSAMENTO E SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)

O potencial eólico não é espacialmente homogêneo, assim, necessita-se que sejam utilizadas tecnologias que relacionem os fatores ambientais e infraestruturais, por meio de análises espaciais. O cruzamento de informações e a interpretação dos mapas é facilitada pelo uso de ferramentas de SIG.

Conforme Fitz (2008), “pode-se considerar o geoprocessamento como uma tecnologia, ou mesmo um conjunto de tecnologias, que possibilita a manipulação, a análise, a simulação de modelagens e a visualização de dados georreferenciados”.

Segundo Moreira (2001), os dados cartográficos, fotografias aéreas, imagens de satélite e mapas temáticos são armazenados no banco de dados geográfico em duas grandes classes, a matricial (*raster*) e a vetorial (*shapefile*).

Na representação matricial, o espaço é representado por uma matriz composta por linhas e colunas. Cada célula possui um número de linha e de coluna apropriado,

além de um valor Z correspondente ao atributo investigado (MOREIRA, 2001). Na representação vetorial, a localização e a aparência gráfica de cada objeto são representadas por um ou mais pares de coordenadas sendo estes pontos, linhas, áreas ou polígonos (MOREIRA, 2001).

Através do geoprocessamento, o uso desses tipos de dados auxilia nos estudos como: Diagnóstico Ambiental, Avaliação de Impacto Ambiental e Mapeamento Temático. O conjunto de dados, *softwares*, operador e metodologias compatíveis com a finalidade do projeto são denominadas de Sistema de Informações Geográficas - SIG (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

Um SIG pode ser entendido, então, como uma reunião de sistemas associados, constituídos de módulos que podem ser independentes ou não. Por isso vários *softwares* vêm com módulos separados, cabendo ao usuário escolher quais deve utilizar para atingir seu objetivo (FITZ, 2008).

Câmara e Ortiz (1998) dizem que a distância entre o uso do *software* e um resultado operacional é muito grande, pois envolve aspectos como a geração de dados geográficos, disponibilidade de metodologias de trabalho adequadas e mecanismos de divulgação dos resultados obtidos. Assim, a escolha de um *software* adequado é de extrema importância.

3.7 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Grande parte dos projetos desenvolvidos em SIG visam combinar dados espaciais, para descrever e analisar interações e fazer previsões através de modelos, que sirvam de subsídios para as decisões tomadas por especialistas (MOREIRA et. al., 2001).

Esses modelos em geral são produzidos a partir de método de análise multicritério, a qual pode ser aplicada segundo diferentes abordagens, dentre elas, a inferência Booleana, a média ponderada e a inferência *Fuzzy*.

O Modelo Booleano envolve combinação lógica de mapas binários através de operadores condicionais (MOREIRA et. al., 2001). Os vários planos de informação podem ser combinados para dar suporte a uma hipótese. Cada localização é então testada, para determinar se as evidências nesse ponto satisfazem ou não as regras definidas pela hipótese.

O resultado é expresso de forma binária, “0” (hipótese não satisfeita) e “1” (hipótese satisfeita), não sendo possível a condição talvez (MOREIRA et. al., 2001). Esse método é prático e simples, mas pode não ser o mais adequado, uma vez que não permite a representação de zonas de transição entre 0 e 1, que estabeleceriam mudanças graduais entre os limites das classes resultantes.

Pode-se, por exemplo, gerar mapas de potencial de escoamento e de risco de alagamento a partir do cruzamento de planos de informação, aplicando-se Inferência Booleana. Tomando como dados iniciais um mapa de potencial de escoamento e um mapa declividade, pode-se criar uma regra booleana em que são consideradas áreas de risco de alagamento as que possuam escoamento elevado e declividade baixa como no artigo de Brand, Uzêda e Batista (2013).

No método de média ponderada cada mapa de entrada é utilizado como um critério de evidência que recebe um peso diferente dependendo da importância que se dá (MOREIRA et. al., 2001). O resultado é um mapa com áreas que expressam um grau de importância relativa através dos valores numéricos de saída. O método de Média Ponderada permite uma maior flexibilidade na combinação de mapas do que o método Booleano, mas recai no caráter linear de adição das evidências (MOREIRA et. al., 2001 apud BONHAM-CARTER, 1994).

A lógica difusa, ou *fuzzy*, é uma extensão da lógica booleana que admite valores intermediários entre o falso “0” e o verdadeiro “1” (OLIVEIRA, 2010). Ela representa zonas de transição que são estimadas a partir de funções. As mais comuns são a linear e a senoidal, mas também existem funções sigmoidais e *J-shaped*.

Segundo Moreira et. al. (2001), as funções lineares são dadas por duas ou mais linhas que se encontram em um ponto central ou em mais pontos. A inclinação da reta indica a região de transição da função. A função senoidal tem a forma de uma função

seno e tem parâmetros que definem sua forma e zona de transição. Pode-se observar o gráfico das funções na Figura 6.

Um conjunto que tem uma função de pertinência como a da Figura 6, é chamado de conjunto *fuzzy*. Um conjunto deste tipo tem como característica a indefinição de fronteiras. Por exemplo, na natureza o conjunto de classes de solo pode ser denominado de conjunto *fuzzy* (MOREIRA et. al., 2001) uma vez que as mudanças de uma classe de solo para outra não são abruptas (com limites rígidos, definidos por linhas). O que se observa é uma mudança gradual definida por uma zona de transição entre uma classe e outra. A Figura 7 ilustra a diferença de fronteiras entre conjuntos booleano e conjuntos *fuzzy*.

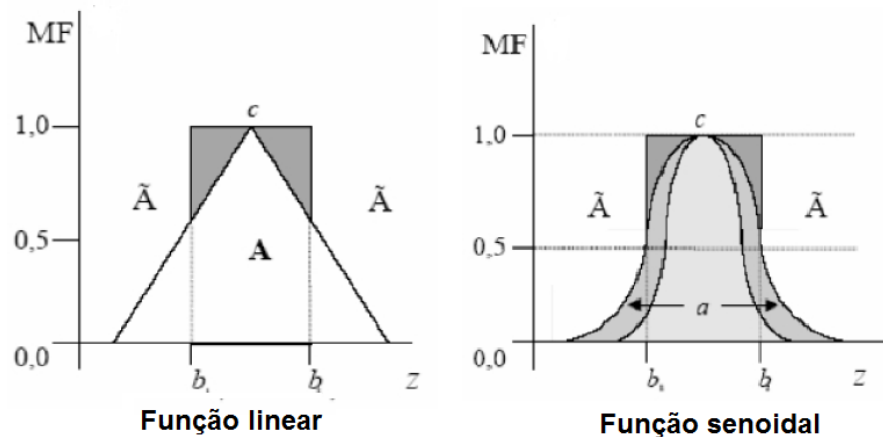


Figura 6 – Função *fuzzy* linear e senoidal

Fonte: MOREIRA et al. (2001) apud Burrough e McDonnell (1998), adaptado

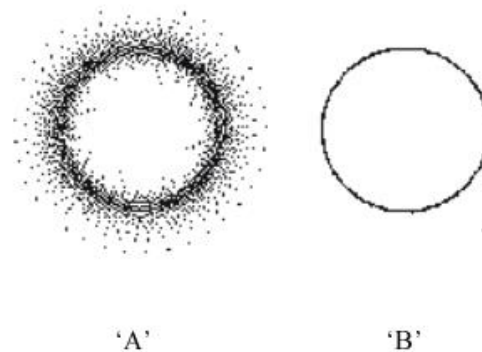


Figura 7 – Diagrama de Venn ilustrando a diferença de fronteira entre um conjunto *fuzzy* (A) e um conjunto booleano (B)

Fonte: MOREIRA et. al. (2001) apud Burrough(1998)

3.8 CRITÉRIOS PARA A AVALIAÇÃO DE LOCAIS PARA A INSTALAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS

A análise multicritério já foi extensamente utilizada em uma série de enfoques diferentes, como por exemplo, na avaliação de locais para instalação de aterros sanitários (CHANG; PARVATHINATHAN; BREEDEN, 2008; WANG et al., 2009) e fragilidade ambiental (DONHA; SOUZA; SUGAMOSTO, 2006; YING et al., 2007). Para a avaliação da aptidão de áreas para implantação de parques eólicos não é diferente. A escolha dos critérios que influenciam a aptidão do local é de extrema importância na avaliação, e dependem da abordagem adotada.

Ramachandra e Shruthi (2005) mapearam os locais potenciais para impulsionar o setor eólico em Karnataka na Índia. O estudo emprega o SIG para mapear os recursos eólicos e analisar sua variabilidade espacial e sazonal.

No artigo de Hansen (2005), o objetivo foi desenvolver avaliações multicritérios, que poderiam fornecer ferramentas para analisar os impactos ambientais e sócio-econômicos trazidos com o desenvolvimento de usinas eólicas. Alguns dos critérios elencados foram restritivos – locais de proteção para pássaros, ambientes protegidos por lei, áreas alagadas – e outros receberam diferentes pesos como – potencial eólico, proximidade com lagos, florestas, estradas, linhas de transmissão, antenas de rádio, entre outros.

Baban e Parry (2001), usando as informações de questionários e da literatura publicada disponível, desenvolveram critérios de SIG para o desenvolvimento de parques eólicos para o Reino Unido. Foram considerados como critérios a topografia, direção e velocidade do vento, uso e ocupação do solo, hidrologia, proximidade com adensamentos populacionais, acessibilidade ao local, proximidade com recursos históricos/culturais e ecologia.

Aydin, Kentel e Duzgun (2010) usaram como critérios de decisão o potencial de energia eólica, aptidão e aceitabilidade ambiental na Turquia. Levaram em conta também

os potenciais impactos ambientais da geração eólica de acordo com as legislações turcas e outros estudos.

O estudo de Haaren e Fthenakis (2011) foi o mais completo e um dos poucos que considerou os custos como fator limitante. Este apresentou um novo método de seleção do local para parques eólicos no Estado de Nova York, com base em uma otimização espacial de custo-receita. Eles fizeram uma avaliação dos seguintes parâmetros:

- Econômicos (custo das linhas de transmissão, custo da área, custo ao acesso das estradas, etc.);
- de planejamento (ruído, distância segura de áreas urbanas, etc.);
- Físicos (altitude, declividade, solos porosos); e
- Ecológicos (habitat de pássaros, proximidade com florestas),

e também compararam esses critérios entre diversas metodologias de trabalhos já publicados.

A pesquisa feita por Janke (2010), objetivou determinar quais as classes de cobertura do solo onde ocorrem ventos mais fortes e onde o potencial de energia solar é maior e identificar as áreas que são adequados para fazendas eólicas e solar através da análise multicritério. Os fatores levados em consideração foram: o potencial eólico (velocidade do vento a 50 m acima do solo) e dados de insolação anual, cobertura do solo, densidade populacional, distância de estradas, linhas de transmissão, e centros urbanos.

Os critérios selecionados por Janke (2010) foram sucintos, mas capazes de garantir uma cobertura abrangente em relação aos aspectos técnicos e ambientais relacionados à implantação e operação de parques de geração de energia eólica (VICARI, 2012). Um estudo baseado neste trabalho foi feito no Rio Grande do Sul por Vicari (2012). O autor utilizou praticamente os mesmos critérios que Janke (2010) mas com pesos diferentes na combinação linear ponderada.

Outro fator importante na análise é como a conexão do empreendimento será feito na Rede de Distribuição. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) prevê três tipos de conexão (EPE, 2014):

- 1) Conexão por meio de linha de transmissão exclusiva;

- 2) Conexão por meio de seccionamento de linha de transmissão existente;
- 3) Instalação de um novo transformador elevador exclusivo no ponto de conexão.

Nos casos 1 e 3 é preciso informar à EPE qual será a subestação de conexão e no caso 2 a distância da subestação mais próxima, já que será necessário construir uma subestação (EPE, 2014). As opções 1 e 3 são mais viáveis já que não exigem a construção de uma subestação, ou seja, a distância de uma subestação em um empreendimento eólico é um fator importante de decisão na escolha do local.

4. ÁREA DE ESTUDO

O estado do Paraná se encontra na região sul do Brasil e ocupa uma área de aproximadamente 199.308 km². É cortado pelo trópico de Capricórnio e faz limites com os estados de São Paulo (SP), Mato Grosso do Sul (MS) e Santa Catarina (SC). O estado possui 399 municípios e a capital é Curitiba (IBGE, 2014).

A população do Paraná em 2010 era de 10.444.526. Em 2015, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) estima que a população cresceu para 11.163.018, um aumento de aproximadamente 6,44% da população. Só na Região Metropolitana de Curitiba residem 3.414.115 brasileiros, o que corresponde a 30,6% da população do estado.

O aumento da população demanda mais energia elétrica. Em 2013, o Paraná consumiu um total de 28.118.471 MWh para 4.308.588 consumidores. O setor que mais consumiu foi o residencial com 25,22% da energia, seguido do industrial (24,64%).

Tabela 4 – Consumo paranaense de energia por setor em 2013

	<i>Consumo (MWh)</i>	<i>Número de Consumidores</i>	<i>% do Consumo</i>
<i>Residencial</i>	7.090.296	3.428.224	25,22
<i>Setor Secundário (Indústria)</i>	6.928.548	95.574	24,64
<i>Setor Comercial</i>	5.197.882	347.597	18,49
<i>Rural</i>	2.111.004	379.377	7,51
<i>Outras Classes</i>	2.352.747	57.686	8,37
<i>Consumo Livre(1)</i>	4.438.006	130	15,78
<i>TOTAL</i>	28.118.471	4.308.588	100,00

Fonte: COPEL (2013), adaptado

(1) Refere-se ao consumo de energia elétrica da autoprodução da indústria. Inclui os consumidores atendidos por outro fornecedor de energia e os que possuem parcela da carga atendida pela COPEL Distribuição e a outra parcela por outro fornecedor.

Como já foi descrito no Referencial Teórico, apesar da região sul apresentar o terceiro maior potencial eólico do país, possui apenas 83 empreendimentos eólicos. No Paraná só está em operação um parque eólico. A Central Eólica de Palmas – PR foi inaugurada em 1999 e trata-se da primeira central eólica do Sul do Brasil, localizada no

Município de Palmas – PR, com potência instalada de 2,5 MW. Realizado pela Companhia Paranaense de Energia – COPEL e pela Wobben Windpower (do Brasil), o projeto tem 5 turbinas de 500 kW (ANEEL, 2008).

Atualmente, o Paraná possui 30 empreendimentos eólicos em despacho de Requerimento de Outorga (DRO), ou seja, houve permissão para que os empreendimentos fossem construídos antes da emissão da outorga. No total, a potência outorgada do Estado do Paraná chegará a 806,4 MW quando todos os parques estiverem em operação (Tabela 5).

Tabela 5 – Descrição dos empreendimentos eólicos no Estado do Paraná

Nome	Município	Potência outorgada (kW)	Estágio	Número de Turbinas	Modelo da Turbina	Potência (kW)
Água Santa I	Palmas	29900	DRO	13	Siemens SWT 113	2300
Água Santa II	Palmas	29900	DRO	13	Siemens SWT 113	2300
Água Santa III	Palmas	20700	DRO	9	Siemens SWT 113	2300
Campos Gerais I	Carambeí	28000	DRO	14	Gamesa G114	2000
Campos Gerais II	Castro	30000	DRO	15	Gamesa G114	2000
Campos Gerais III	Castro	30000	DRO	15	Gamesa G114	2000
Campos Gerais IV	Castro	24000	DRO	12	Gamesa G114	2000
Campos Gerais V	Tibagi	20000	DRO	10	Gamesa G114	2000
Campos Gerais VI	Tibagi	30000	DRO	15	Gamesa G114	2000
Campos Gerais VII	Tibagi	30000	DRO	15	Gamesa G114	2000
Campos Gerais VIII	Tibagi	28000	DRO	14	Gamesa G114	2000
Campos Gerais IX	Tibagi	30000	DRO	15	Gamesa G114	2000
Campos Gerais X	Tibagi	26000	DRO	13	Gamesa G114	2000
Campos Gerais XI	Tibagi	26000	DRO	13	Gamesa G114	2000
Campos Gerais XII	Tibagi	28000	DRO	14	Gamesa G114	2000
Campos Gerais XIII	Tibagi	30000	DRO	15	Gamesa G114	2000
Campos Gerais XV de Palmas	Palmas	2500	Operação	5	Wobben E40/500	500
Frísia I	Carambeí	30000	DRO	15	Gamesa G114	2000
Frísia II	Carambeí	30000	DRO	15	Gamesa G114	2000
Rosa dos Ventos I	Marmeleiro	29700	DRO	11	Alstom ECO-122	2700
Rosa dos Ventos II	Marmeleiro	29700	DRO	11	Alstom ECO-122	2700
Rosa dos Ventos III	Marmeleiro	27000	DRO	10	Alstom ECO-122	3000
Serra da Esperança I	Palmas	29900	DRO	13	Siemens SWT 113	2300
Serra da Esperança II	Palmas	13800	DRO	6	Siemens SWT 113	2300
Ventos do Paraná I	Carambeí	23100	DRO	*	*	*
Ventos do Paraná II	Carambeí	29400	DRO	*	*	*
Ventos do Paraná III	Carambeí	23100	DRO	*	*	*
Ventos do Paraná IV	Carambeí	27300	DRO	*	*	*
Ventos do Paraná V	Carambeí	25200	DRO	*	*	*
Ventos do Paraná VI	Carambeí	25200	DRO	*	*	*

*Informações não encontradas

Fonte: ANEEL (2016), IMPACTO ASSESSORIA AMBIENTAL (2013, 2015) e LACTEC (2014)

4.1 UNIDADES DE CONSERVAÇÃO

Dentro do Estado do Paraná existem 64 UCs federais, estaduais e municipais, sendo que 28 são de uso sustentável e 36 delas são de proteção integral, totalizando uma área de 19.125,062 km² (MMA, 2015). Isso representa quase 9,6% do território paranaense. Observa-se na Figura 8 como elas estão distribuídas pelo estado.

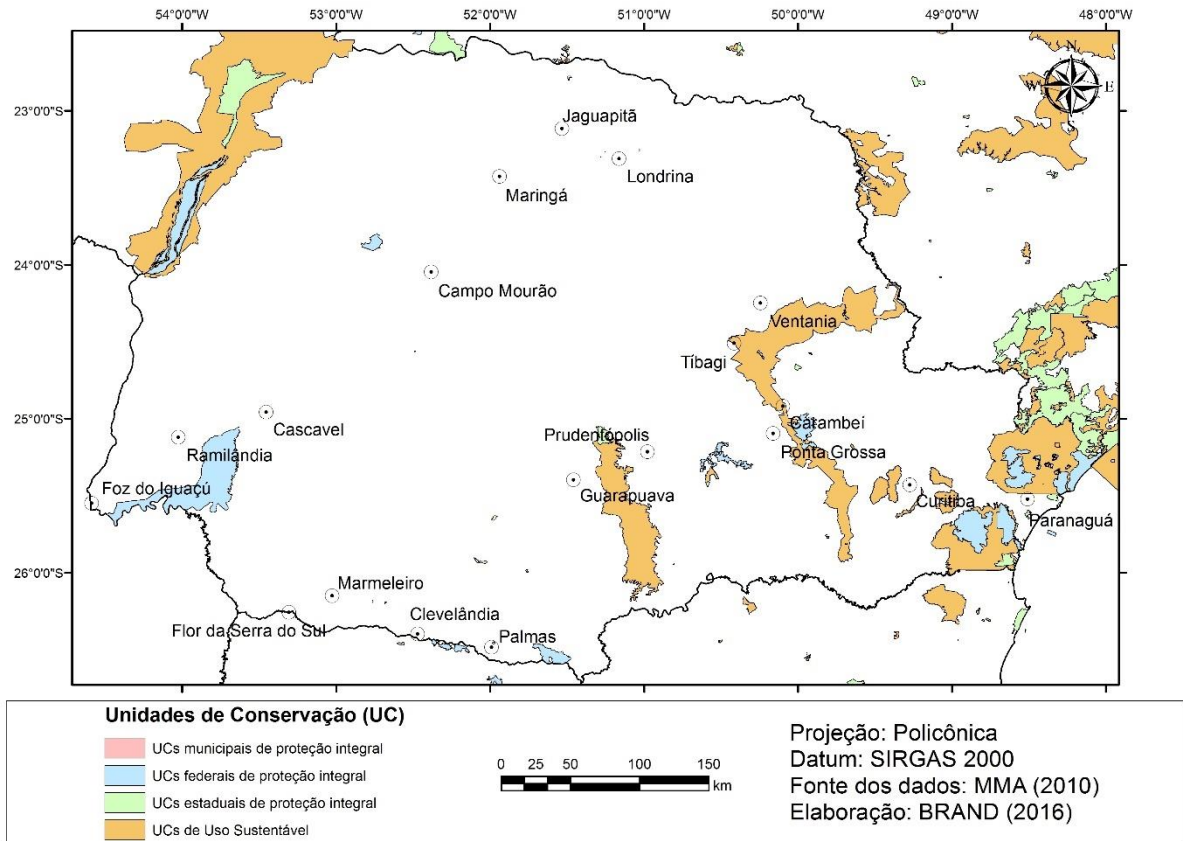


Figura 8 – Unidades de Conservação do Estado do Paraná

As três maiores UCs são: a Área de Proteção Ambiental (APA) da Escarpa Devoniana (4.156,3 km²), APA de Guaraqueçaba (2.809,2 km²) e a APA Ilhas e Várzeas do Rio Paraná (2.778,7 km²), apenas a área sobre o território paranaense.

4.2 HIDROGRAFIA

As Bacias Hidrográficas são conceituadas como sendo uma região hidrográfica limitada por um divisor de águas e, com base neste princípio, o Estado do Paraná foi dividido em 16 Bacias Hidrográficas, instituídas pela Resolução N° 024/2006/SEMA, como segue: Litorânea, Iguaçu, Ribeira, Itararé, Cinzas, Tibagi, Ivaí, Paranapanema 1, Paranapanema 2, Paranapanema 3, Paranapanema 4, Pirapó, Paraná 1, Paraná 2, Paraná 3 e Piquiri (SEMA, 2010) como mostra na Figura 9.

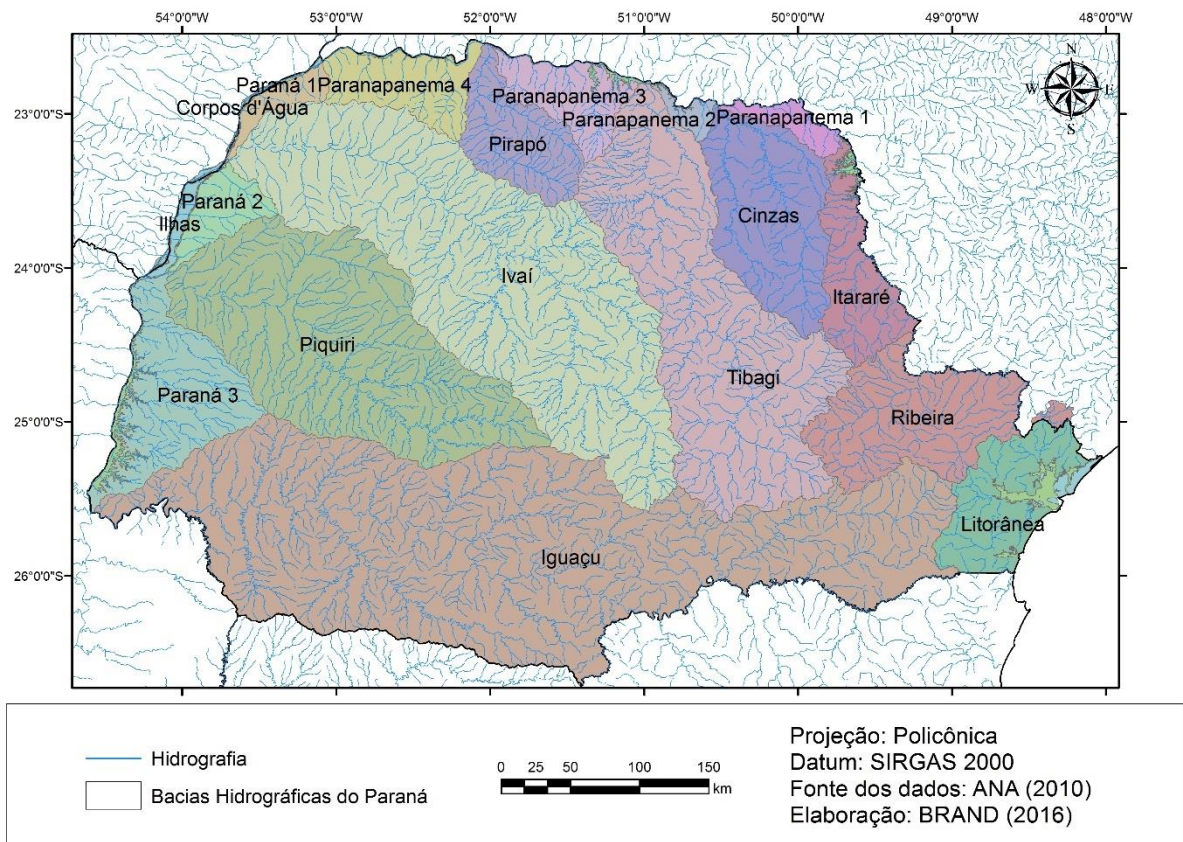


Figura 9 – Bacias Hidrográficas e Hidrografia do Estado do Paraná

4.3 LINHAS DE TRANSMISSÃO E SUBESTAÇÕES

Pelo Estado do Paraná passam linhas de transmissão com seis tensões diferentes de 138, 230, 440, 500, 600 e 750 kV (ONS, 2015). As linhas com as maiores tensões são aquelas que levam a energia produzida na Usina de Itaipu para a região

sudeste, como mostra a Figura 10. De maneira geral, o Paraná é bem servido de conexões com as linhas de transmissão, com exceção do noroeste do estado.

Quanto ao número de subestações, o Paraná apresenta 41 distribuídas como mostra a Figura 10. Percebe-se que, a região central e o noroeste do estado apresentam poucas subestações, o que torna a construção de uma subestação necessária se houver a instalação de um empreendimento eólico.

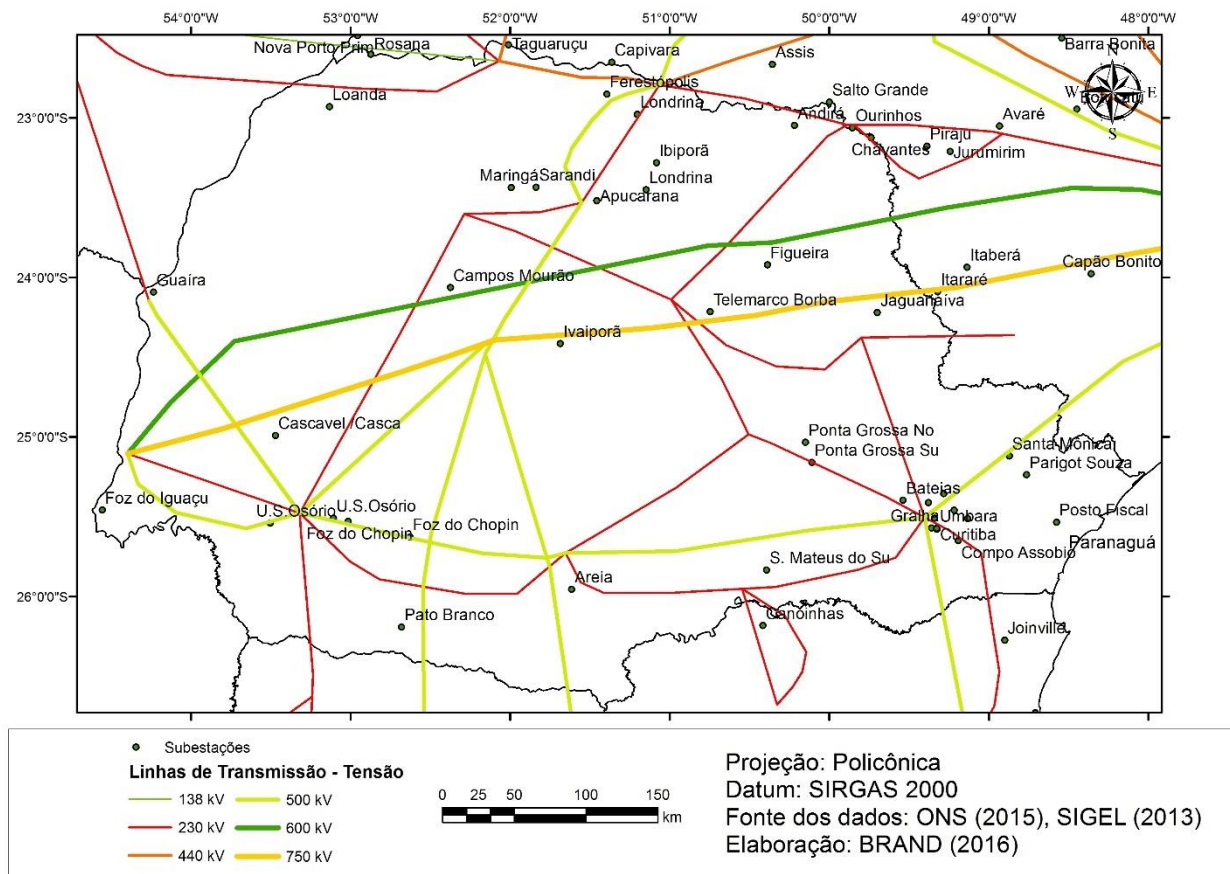


Figura 10 – Linhas de Transmissão de energia elétrica e subestações no Estado do Paraná

4.4 RUAS, ESTRADAS E RODOVIAS

O Estado possui maior concentração de ruas, rodovias e estradas de acesso, principalmente nas proximidades de Curitiba, no eixo Curitiba-centro-norte e no sudoeste

do estado. Em contrapartida, região centro-sul apresenta pouca densidade de ruas, estradas e rodovias, provavelmente porque nessa região não são encontradas cidades grandes que se destaquem, com exceção de Guarapuava (Figura 11).

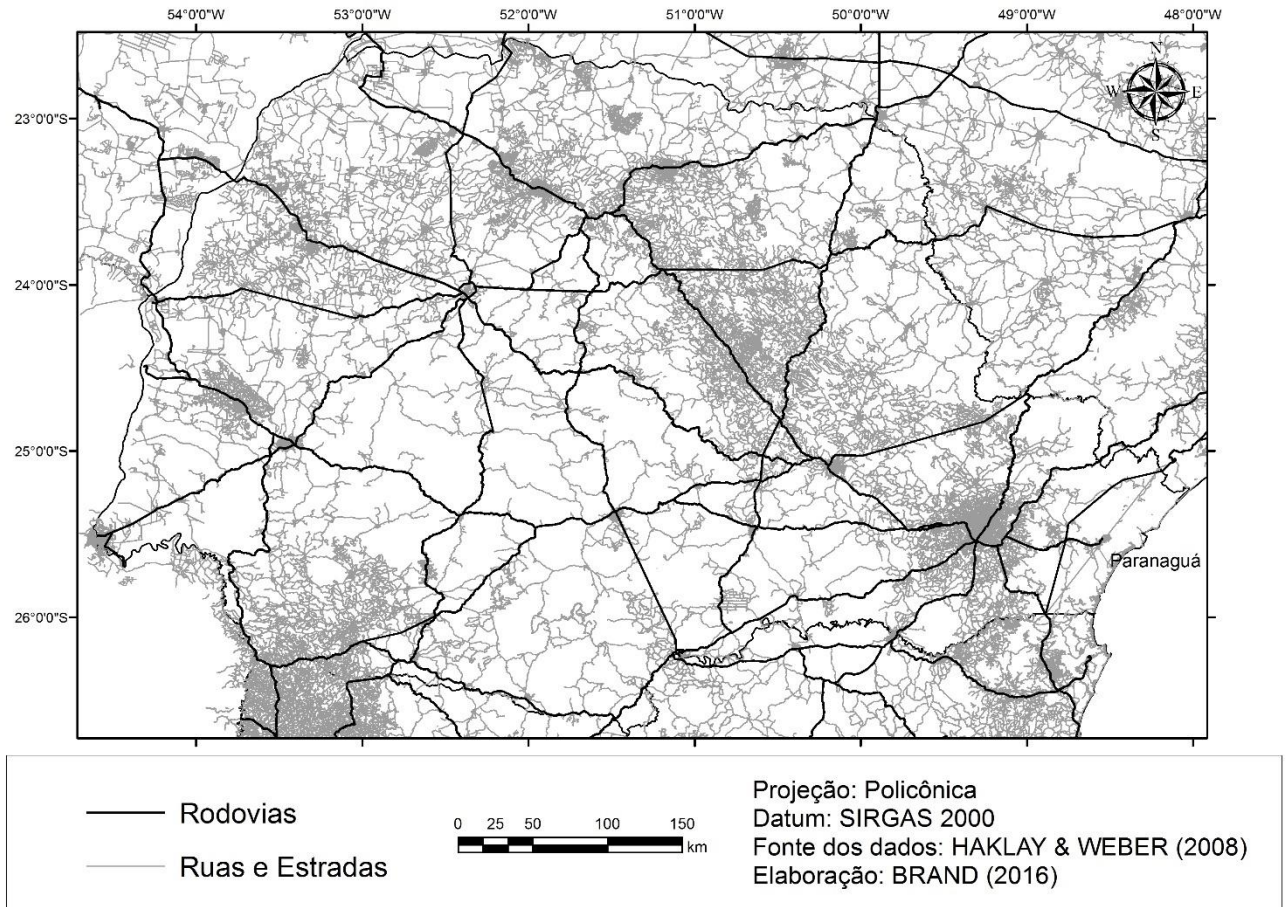


Figura 11 – Ruas, Estradas e Rodovias no Estado do Paraná

4.5 CLIMATOLOGIA NO ESTADO DO PARANÁ

O estado do Paraná se localiza em uma área predominantemente de clima temperado (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). Enquanto o litoral apresenta clima tropical superúmido, as regiões norte, oeste e sudoeste apresentam clima subtropical úmido, com verões quentes e estação seca não muito bem definida. Já as regiões mais

altas dos planaltos caracterizam-se pelo clima temperado ou subtropical de altitude, com as estações do ano mais diferenciadas: verões frescos e geadas frequentes no inverno; é o caso das regiões dos planaltos de Curitiba, Guarapuava e Palmas (DO AMARANTE, 2007).

A temperatura média apresenta diferença significativa entre as regiões noroeste e sudeste do Estado. As regiões altas das escarpas e a zona norte do Planalto de Curitiba têm temperaturas médias sazonais variando entre 10°C no inverno e 19°C no verão. O litoral é sempre mais quente que o interior do Estado em razão das baixas altitudes, e apresenta menor amplitude térmica devido à proximidade com o mar (DO AMARANTE, 2007).

Quanto a precipitação, nota-se uma tendência a verões chuvosos e invernos secos, principalmente na região do Planalto de Cambará (nordeste do Estado). No litoral, a chuva é relativamente bem distribuída durante o ano, um pouco mais escassa nos meses de junho, julho e agosto. No interior do Estado, uma região de precipitações mais intensas, as chuvas deslocam-se do Planalto de Palmas, na primavera, para o Planalto de Apucarana, mais ao norte, no verão (DO AMARANTE, 2007).

4.5.1 Regime dos ventos no Paraná

No Paraná, os ventos são mais intensos na segunda metade do ano em todas as regiões do Estado em diferentes proporções (DO AMARANTE, 2007). Nos regimes diurnos, a ação das brisas marinhas aumenta as velocidades de vento das 11 horas até as 18 horas na região litorânea.

Nos planaltos centrais e sul do Estado, onde se localiza a Usina de Palmas, as velocidades de vento se intensificam durante o período noturno, com picos ocorrendo a partir de 22 horas até as 6 horas da manhã. Já as medições realizadas no norte do Estado, na torre de Santo Antônio, próxima a Maringá, indicaram um deslocamento desses picos para o período da manhã, especialmente durante a segunda metade do

ano. Para o interior do Estado, essas velocidades suavizam durante o período da tarde (DO AMARANTE, 2007).

4.5.2 Potencial de geração de energia eólica do Paraná no contexto Brasileiro

De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001), o Brasil tem um grande potencial gerador de energia eólica. Tem-se a presença de ventos duas vezes superior à média mundial, além de uma baixa volatilidade da oscilação da velocidade, o que facilita seu aproveitamento (ANEEL, 2008).

A partir dos resultados do Atlas, estimou-se que o potencial disponível para vento médio anual igual ou superior a 7 m/s é da ordem de 143 GW (Figura 12). As regiões Nordeste, Sul e Sudeste apresentaram os maiores potenciais e juntos representam quase 88% da potência instalável no Brasil.

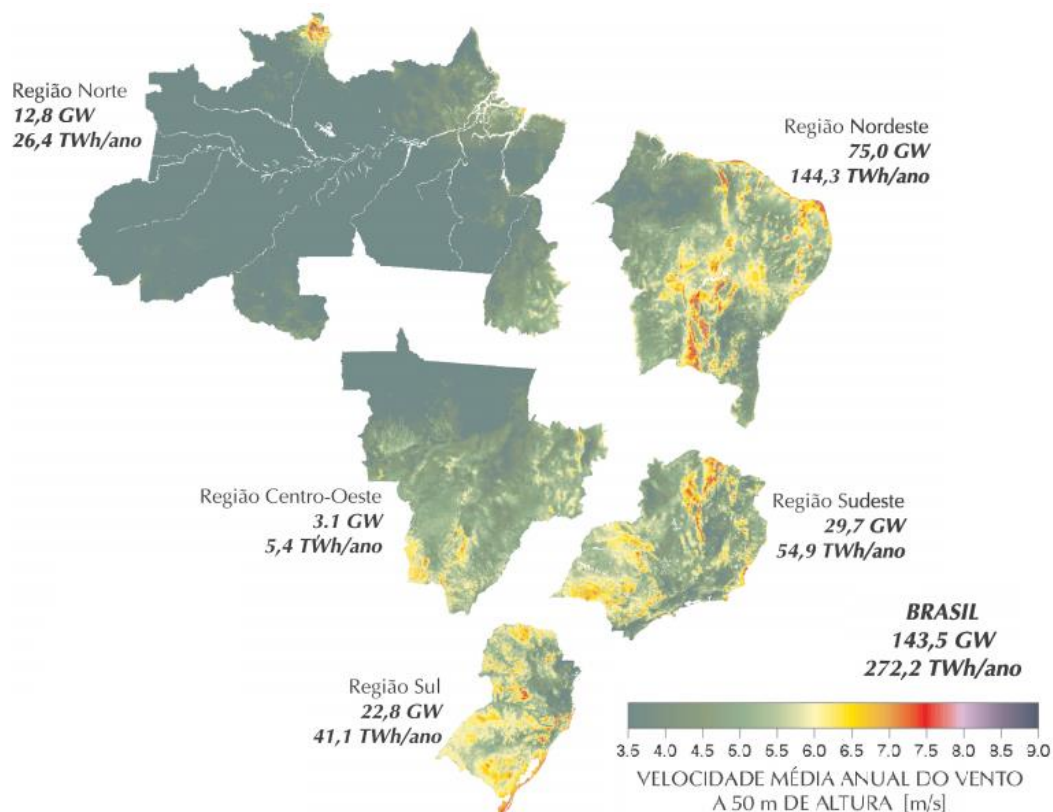


Figura 12 – Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s

Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001)

A Região Sul possui o terceiro maior potencial eólico regional do país. Mais especificamente no estado do Paraná, os resultados do Atlas do potencial eólico do estado (2007), mostra que a potência instalável é de 310 MW, 1.360 MW e 3.370 MW para áreas com ventos iguais ou superiores a 7,0 m/s nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, respectivamente.

Abaixo pode ser visto na Tabela 6 os resultados gerais obtidos pelo Atlas (2007). Esses resultados demonstram o potencial de capacidade instalável em função das áreas em classes de velocidade do vento e altura do aerogerador.

A estimativa de geração eólica anual no Estado é de 850 GWh, 3.760 GWh e 9.390 GWh nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, para velocidades de vento acima de 7,0 m/s (DO AMARANTE, 2007). Como o Estado consome cerca de 22.020 GWh, a produção de energia eólica poderia suprir 3,8%, 17,1% e 42,64% do consumo energético nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, para velocidades de vento acima de 7,0 m/s.

Tabela 6 – Potencial de Geração Eólica no Paraná, por alturas e faixas de velocidades de ventos

POTENCIAL DE GERAÇÃO EÓLICA									
INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADE						INTEGRAÇÃO CUMULATIVA			
ALTURA [m]	VENTO [m/s]	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW]	FATOR DE CAPACIDADE	ENERGIA ANUAL [GWh]	VENTO [m/s]	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW]	ENERGIA ANUAL [GWh]
50	6.0 - 6.5	3181	6362	0,228	12683	> 6.0	4033	8066	16792
	6.5 - 7.0	696	1392	0,268	3262	> 6.5	852	1704	4110
	7.0 - 7.5	139	278	0,305	743	> 7.0	156	312	847
	7.5 - 8.0	12	25	0,338	73	> 7.5	17	34	105
	8.0 - 8.5	3	7	0,368	22	> 8.0	5	9	32
	> 8.5	1	3	0,425	10	> 8.5	1	3	10
75	6.0 - 6.5	12152	24304	0,231	49254	> 6.0	15310	30619	64726
	6.5 - 7.0	2476	4952	0,270	11716	> 6.5	3158	6315	15471
	7.0 - 7.5	574	1148	0,308	3102	> 7.0	681	1363	3756
	7.5 - 8.0	96	193	0,344	580	> 7.5	107	215	654
	8.0 - 8.5	8	16	0,372	52	> 8.0	11	22	74
	> 8.5	3	6	0,414	22	> 8.5	3	6	22
100	6.0 - 6.5	25220	50440	0,234	103580	> 6.0	32638	65275	140255
	6.5 - 7.0	5730	11460	0,272	27289	> 6.5	7417	14835	36675
	7.0 - 7.5	1370	2739	0,310	7430	> 7.0	1687	3375	9386
	7.5 - 8.0	275	550	0,347	1672	> 7.5	318	636	1956
	8.0 - 8.5	37	75	0,377	246	> 8.0	43	85	284
	> 8.5	5	11	0,408	38	> 8.5	5	11	38

Fonte: Atlas Eólico do Estado do Paraná (2007)

Interessante também notar que, se a velocidade de vento considerada fosse acima de 6,5 m/s nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, a geração aumentaria em 5 vezes. Isto é, se pensarmos em melhoria das tecnologias envolvidas, de tal forma que velocidades menores pudessem ter aproveitamento, o Paraná teria uma produção de energia eólica formidável.

Ainda de acordo com o Atlas Eólico do Estado do Paraná (2007), dentre as áreas mais favoráveis à implantação de parques eólicos, se destacam o planalto de Palmas, os campos de Guarapuava e os campos de Castro, como pode ser visto na Figura 13.

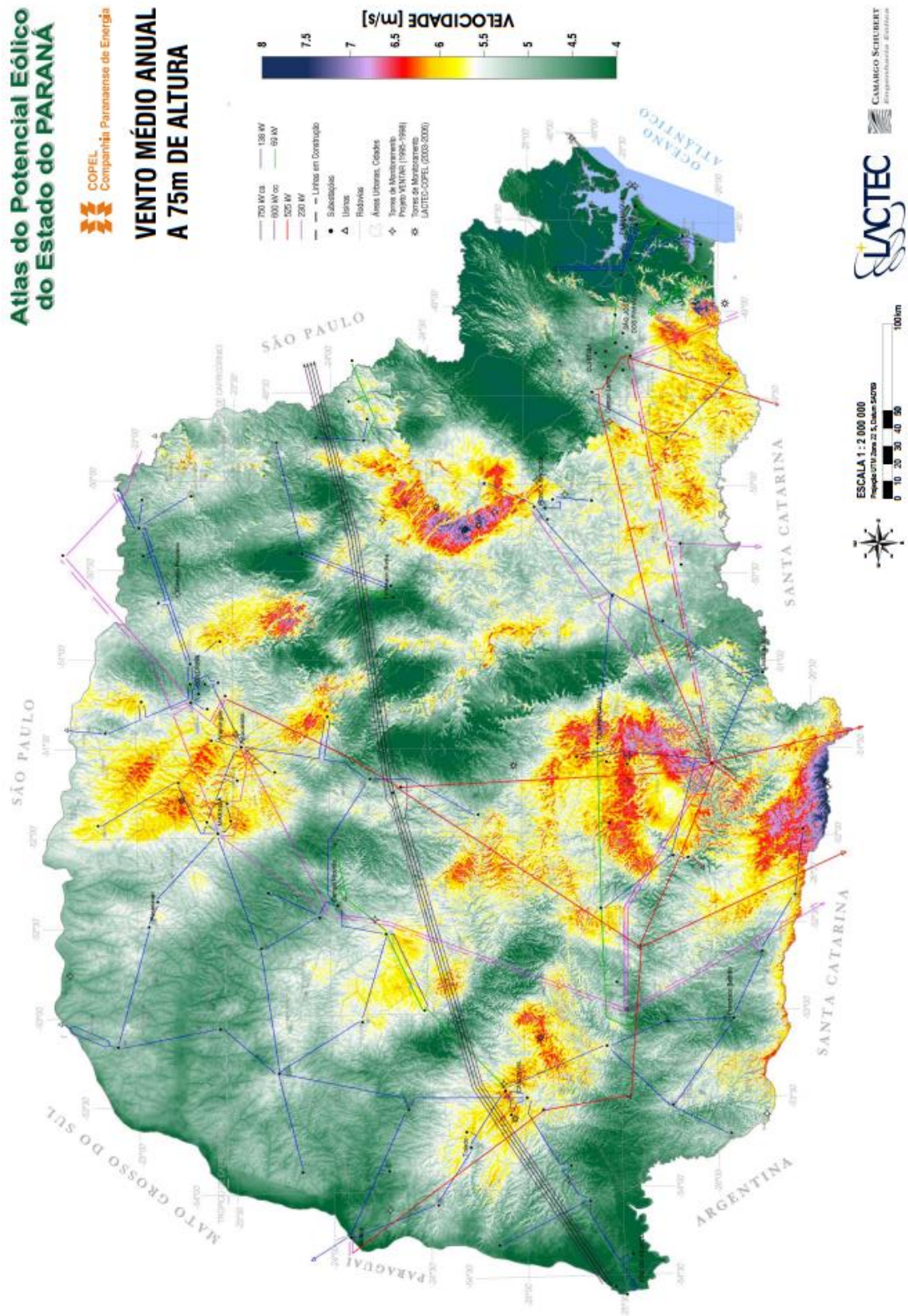


Figura 13 – Distribuição espacial do vento médio anual a 75 m de altura

Fonte: Atlas Eólico do Estado do Paraná (2007)

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos, foram necessárias algumas etapas intermediárias para a obtenção do mapa síntese de potencial eólico. O SIG escolhido para a realização deste trabalho foi o ArcGIS. É um pacote de *softwares* da ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) de elaboração e manipulação de informações vetoriais e matriciais para o uso e gerenciamento de bases temáticas (DOS SANTOS, 2009).

As etapas foram baseadas, em sua maioria, nos estudos de Vicari (2012) e Janke (2010), e serão descritas nas seções 6.1 a 6.5.

5.1 ELABORAÇÃO DO BANCO DE DADOS GEOGRÁFICO

Para a realização dos levantamentos de aptidão para a implantação de sistemas geradores de energia eólica na área de estudo, foram utilizados dados georreferenciados, ou seja, dados associados às coordenadas geográficas.

Os dados do potencial eólico disponibilizados pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) (2008) apresentam a média anual do potencial eólico a 50 m de altitude. Com uma resolução de 10 km, cada célula traz a velocidade do vento em m/s, classe de potência (7 classes), densidade de potência em Watts/km² e o parâmetro k da função de Weibull (CEPEL, 2008). Nesse trabalho utilizou-se a densidade de potência como critério.

Os mapas dos potenciais eólicos foram calculados a partir de simulações produzidas pelo MesoMap por 360 dias, extraído de um período de 15 anos de dados. O MesoMap é um grupo integrado de modelos de simulação atmosférica, bases de dados geográficos e meteorológicos, redes de computadores e sistemas de armazenamento. A simulação realizada com o MesoMap foi verificada por meio de medições anemométricas de alta qualidade em um variado regime de vento (CEPEL, 2008).

Os objetos cartográficos georreferenciados a serem utilizados no trabalho e suas respectivas fontes se encontram no Quadro 1.

Vetores	Explicação	Fonte
Centrais geradoras eolielétricas	Referência de localização de parques eólicos no Brasil.	(SIGEL, 2016)
Subestações	Localização das subestações de energia.	(ONS, 2015)
Linhas de Transmissão	Linhas de cabeamento responsáveis pela condução da energia elétrica até as subestações de energia.	(SIGEL, 2013)
Ruas, Estradas e Rodovias	Localização de ruas, estradas e rodovias federais e estaduais no Brasil.	(HAKLAY & WEBER, 2008)
Unidade de Conservação (UC)	Localização das Unidades de Conservação no Brasil.	(MMA, 2010)
Hidrografia	Localização dos corpos hídricos no Brasil.	(ANA, 2010)

Quadro 1 – Dados base utilizados e suas respectivas fontes

Para definir as áreas urbanizadas e fazer a análise do potencial de implantação por classe de ocupação do solo utilizou-se um produto do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo do satélite TERRA. O produto é descrito no artigo de Schneider et. al. (2009) e Friedl et al. (2010).

A classificação usada neste produto é baseada no esquema com 17 classes do Programa Internacional de Geosfera e Biosfera (*International Geosphere Biosphere Program – IGBP*), descrito no artigo de Justice et al. (1998). No Quadro 2, as classes foram descritas para melhor análise.

Os dados de altimetria foram provenientes da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) que propiciou a elaboração de um modelo digital de elevação de 80% do globo através da interferometria de radar com resolução espacial de 30 metros. Originalmente o modelo foi elaborado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e pela Agência Nacional Espacial Americana (NASA) que foi posteriormente processado por Jarvis et al. (2008) para completar algumas regiões sem dados. Os dados estão disponíveis no site: <http://srtm.csi.cgiar.org/>.

Nome da Classe	Descrição
<i>Floresta perene de folhas agulhadas</i>	Mais que 60% da área do pixel é dominada por vegetação arbórea com altura maior do que 2 metros e que permanece verde durante o ano todo.
<i>Floresta perene latifoliada</i>	Mais que 60% da área do pixel é dominada por vegetação arbórea com altura maior do que 2 metros e que permanece verde durante o ano todo.
<i>Floresta decídua agulhada</i>	Terras dominadas por vegetação lenhosa cobrindo mais de 60% da área e altura superior a 2 metros. Árvores perdem as folhas durante a estação seca.
<i>Floresta latifoliada decídua</i>	Locais dominados por vegetação lenhosa cobrindo mais de 60% da área e altura superior a 2 metros. Consiste em árvores de folha larga com um ciclo anual de folha com períodos de perda de folha.
<i>Floresta mista</i>	Terras dominadas por vegetação lenhosa cobrindo mais de 60% da área e altura superior a 2 metros. Consiste em uma mistura das classes de florestas anteriores em que nenhuma das classes excede 60% da área do pixel.
<i>Vegetação arbustiva densa</i>	Locais com vegetação arbustiva esparsa de baixa estatura. Cobertura total maior que 60% do pixel.
<i>Vegetação arbustiva esparsa</i>	Locais com vegetação arbustiva esparsa de baixa estatura. Cobertura total menor do que 60% do pixel.
<i>Savanas arborizadas</i>	Locais com gramíneas, árvores e arbustos em cerca de 30 a 60% da área do pixel.
<i>Savanas</i>	Locais com gramíneas, árvores e arbustos em cerca de 10 a 30% da área do pixel.
<i>Pastagens</i>	Terras com tipos herbáceas de cobertura, normalmente gramíneas. Árvores e arbustos podem cobrir menos de 10% da área.
<i>Áreas permanentemente alagadas</i>	Áreas permanentemente alagadas com presença ou não de herbáceas ou vegetação lenhosa. A vegetação pode estar presente em qualquer água salgada, salobra ou água doce. Apenas áreas maiores do que 500 km ² são mapeadas.
<i>Agricultura</i>	Terras onde as culturas compõem > 60% da cobertura total do terreno.
<i>Áreas urbanas</i>	Áreas Urbanas
<i>Mosaico de atividade agrícola com vegetação natural</i>	Terras com mosaicos de atividades agrícolas, como colheita e outros tipos de cobertura da terra em que nenhum componente excede 60% da paisagem.
<i>Áreas descobertas ou esparsamente vegetadas</i>	Terras com solo exposto, areia ou pedras e com menos de 10% de cobertura de vegetação durante qualquer época do ano.

Quadro 2 – Descrição das classes de ocupação do solo do arquivo de vegetação do MODIS

5.2 CRITÉRIOS UTILIZADOS NO CÁLCULO DO POTENCIAL

Em suma, os parques eólicos precisam estar localizados em locais com boas condições de vento, suficientes para produzir energia de forma viável. Além disso, do ponto de vista de planejamento, tem-se implicações sociais associadas a um projeto

como este, como a poluição sonora, poluição visual, sombreamento, segurança e estética. Assim, os parques eólicos precisam estar fora das zonas urbanas. Outra questão importante é o acesso ao local para a minimização dos custos de desenvolvimento. O local deve estar localizado o mais próximo possível de uma estrada, rua ou rodovia principal.

Em termos ambientais, a flora e fauna já protegida por lei na forma de Unidades de Conservação devem ser resguardadas, já que possuem valor ecológico e interesse científico. Outra restrição importante são os recursos hídricos. Por fim, o local do parque deve ter acesso à rede de transmissão de energia através de linhas de transmissão e subestações.

Para que essas premissas sejam atendidas, o cálculo do potencial eólico do Estado do Paraná exigiu que fossem definidos critérios que influenciassem a viabilidade técnica e econômica na instalação e operação desses empreendimentos eólicos. Esses critérios (Quadro 3) foram definidos através de pesquisa bibliográfica (ver seção 3.8 CRITÉRIOS PARA A AVALIAÇÃO DE LOCAIS PARA A INSTALAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS), resultando nos fatores que serão considerados para este estudo.

Os critérios utilizados por Vicari (2012), baseados no artigo de Janke (2010), foram adaptados e escolhidos neste trabalho, pois mostraram-se coerentes e compatíveis com os dados disponíveis para o estado do Paraná. Fez-se apenas uma alteração com relação aos pesos dos critérios e a adição do critério distância de subestações.

A Lei 10.438/2002 estabelece que o custo de transporte de energia não pode ultrapassar 50% do valor total para os projetos até 30 MW de potência (FADIGAS, 2011). Dessa forma, essa combinação garante que a geração ocorra próxima às linhas de transmissão e subestações para transmissão de energia e diminua o custo e perdas de transporte de energia.

Os fatores e os respectivos valores possíveis e pesos se encontram no Quadro 3. As áreas de Unidades de Conservação, Hidrografia e Áreas urbanizadas foram consideradas fatores restritivos, assim não apresentam pesos, e os valores assumidos podem ser 0 (não apto) e 1 (apto para a instalação de parques eólicos). Os demais critérios podem assumir valores entre 0 e 1.

<i>Crêterios</i>	<i>Valor</i>	<i>Peso</i>
<i>Potencial eólico (densidade de potência – W/m²)</i>	[0-1]	3
<i>Distância de linhas de Transmissão</i>	[0-1]	3
<i>Distância de Subesta�es</i>	[0-1]	1
<i>Distância de áreas urbanizadas</i>	[0-1]	1
<i>Distância de ruas, estradas e rodovias</i>	[0-1]	1
<i>Declividade</i>	[0-1]	1
<i>Unidades de Conserva�o</i>	[0,1]	restritivo
<i>Hidrografia</i>	[0,1]	restritivo
<i>�reas Urbanizadas</i>	[0,1]	restritivo

Quadro 3 – Critérios levados em considera o para o cálculo do potencial para implanta o

5.3 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

Para a realiza o da análise multicritério, com a finalidade de se obter um mapa com as áreas potenciais para a gera o de energia eólica, será necessário fazer o pré-processamento dos dados para padronizá-los. Todos os passos foram realizados no *software* ArcGIS.

Com o intuito de evitar erros, todos os dados foram convertidos para o mesmo sistema de referência. O sistema escolhido foi o SIRGAS2000, pois o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS)   o sistema de referência geodésico oficial para o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e para as atividades da Cartografia Brasileira. Além disso, todos os dados foram recortados apenas para a área de estudo, para poupar esforço computacional.

Alguns critérios levantados necessitam do mapa de distâncias (linhas de transmissão, estradas e rodovias, centros urbanos e subesta es). Este foi calculado através da ferramenta de Distâncias Euclidiana. O arquivo produzido cont m os valores de distância em rela o ao atributo mais próximo para cada ponto da superfície.

Os dados que estavam em formato vetorial (geo-objetos como pontos, linhas e polígonos) foram transformados em geo-campos (dados matriciais) para a realiza o da

análise multicritério. Os dados vetoriais eram: potencial eólico (densidade de potência), Unidades de Conservação (UC) e hidrografia, os quais foram transformados para *Raster* com o uso da ferramenta *Converter*.

A partir da imagem de altimetria obtida, gerou-se a carta hipsométrica. A partir da grade numérica do relevo, gerou-se a carta de declividade (em porcentagem).

Com a ferramenta Cálculos de *Raster* foi feita a normalização dos dados. Para isso, foi necessário dividir os valores pelo valor máximo do conjunto de dados. Assim, o arquivo de saída tem dados que variam de 0 a 1 apenas. Em especial, para os critérios em que o potencial eólico é maior quando as distâncias são menores foi feita a inversão dos valores subtraindo o valor padronizado de 1. Este é o caso das distâncias das linhas de transmissão, das linhas viárias, das subestações e da declividade.

5.4 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Após a preparação dos dados, foi realizada a análise multicritério. Essa análise considerou os fatores definidos na metodologia (seção 6.2).

Foram executados dois tipos de análise multicritério: a inferência booleana usada para as áreas restritivas (áreas de unidades de conservação, áreas urbanizadas e hidrografia) e a média ponderada, usada para combinar esses planos de dados da seguinte forma:

$$S = \left(\sum_{i=1}^6 C_i \cdot P_i \right) \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \quad (8)$$

Sendo:

S = potencial para implantação de empreendimentos eólicos [0-1];

C_i = critério definido no Quadro 3;

P_i = peso definido no Quadro 3;

R_1, R_2, R_3 = critérios restritivos no Quadro 3.

5.5 VALIDAÇÃO DO MAPA DE POTENCIAL EÓLICO

A validação do mapa de potencial gerado foi feita a partir da estimativa da energia produzida por um aerogerador em um local de alto potencial para implantação de empreendimentos eólicos e um de baixo, utilizando as equações apresentadas na seção 3.5 COMPORTAMENTO DA ATMOSFERA E POTENCIAL EÓLICO.

Os dados de velocidade do vento utilizados foram do MERRA (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications*), um serviço *online* que disponibiliza séries temporais (desde janeiro de 1985) de temperatura, umidade relativa, pressão e velocidade e direção do vento com frequência horária e resolução espacial de 50 km.

MERRA é um produto de reanálise da NASA que usa a nova versão do *Goddard Earth Observing System Data Assimilation System Version 5* (GEOS-5). O projeto se concentra em análises históricas do ciclo hidrológico em uma ampla escala de tempo e clima. Mais informações estão disponíveis no site <http://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/>.

Optou-se por utilizar dados de reanálise de velocidade do vento porque não foram encontrados dados medidos *in situ* e as estações meteorológicas mais próximas ficavam a cerca de 48 km de distância dos locais escolhidos para avaliação e haviam muitas falhas de medição na série histórica.

As curvas de potência $P_e(v)$ dos aerogeradores ENERCON E-82 2,3 MW e GAMESA G114 2,0 MW foram obtidas através das especificações fornecidas pelos fornecedores das turbinas (ENERCON, 2015; GAMESA, 2016). As curvas de potência utilizadas na estimativa se encontram na Figura 14. Esses modelos de aerogeradores foram escolhidos pois ambos são produzidos no Brasil e têm sido usados nos parques eólicos brasileiros nos últimos anos.

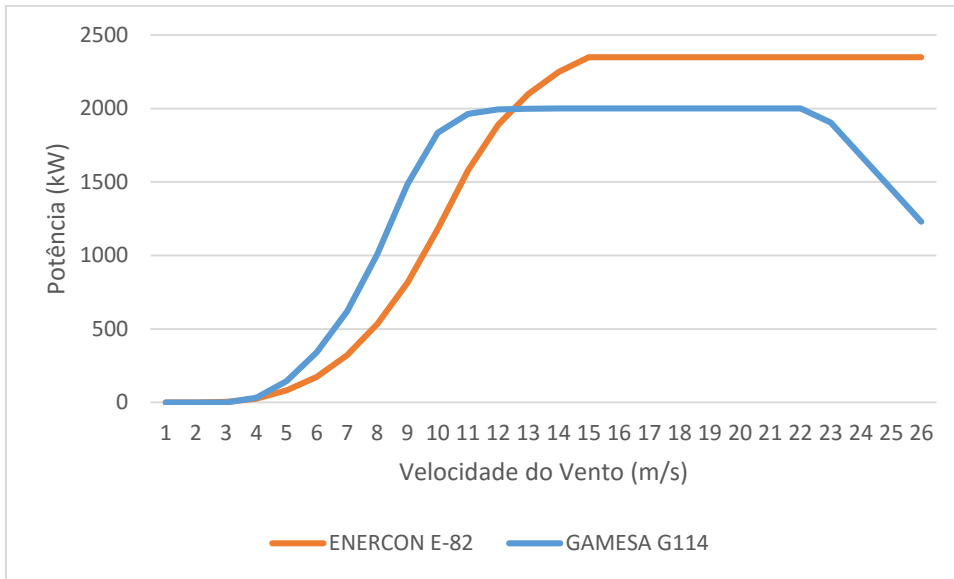


Figura 14 – Curva de Potência das turbinas ENERCON E-82 2,3 MW e GAMESA G114 2,0 MW

Os dados de velocidade do vento horários de 1990 – 2016 do MERRA foram então extrapolados para a altura de cubo dos aerogeradores escolhidos através da Equação 4 apresentada na seção 3.5 COMPORTAMENTO DA ATMOSFERA E POTENCIAL EÓLICO. A rugosidade do terreno (Z_0) considerada foi de 0,05. A partir desses dados extrapolados, calculou-se os parâmetros da distribuição de *Weibull* que melhor se ajustam aos dados através do *software* STATISTICA 7. O *software* utiliza o método *maximum likelihood* para estimar os parâmetros. Assim, pode-se determinar as distribuições de vento $p(v)$ dos locais escolhidos para validação.

A Equação 7 foi então utilizada para o cálculo da potência elétrica produzida por um aerogerador. O resultado foi multiplicado por 8760 para obter-se a produção anual de energia do aerogerador em MWh.

Além disso, também foram avaliados se os critérios utilizados na análise (declividade, distância de linhas de transmissão, estradas, subestações e centros urbanos) foram atendidos no local de potencial alto e não atendidos no de baixo potencial.

Comparou-se também o mapeamento do potencial calculado com a existência de empreendimentos eólicos (construídos ou em construção) no estado. Extraiu-se os valores de potencial nas coordenadas geográficas dos parques disponibilizadas pelo SINGEL (2016).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS CRITÉRIOS

Primeiramente serão apresentados os mapas intermediários usados como critérios no cálculo do mapa final de potencial para implantação de parques eólicos.

6.1.1 Declividade

Para análise do critério da declividade, foram feitos os mapas de altimetria e declividade (Figura 15 e Figura 16). As cotas altimétricas da área de estudo se encontram entre 0 e 1.831 metros. O Paraná é dividido em cinco grandes unidades morfoesculturais: a Planície litorânea, a Serra do Mar, o Primeiro, Segundo e o Terceiro Planalto Paranaense (MINEROPAR, 2006).

A Planície litorânea é a região do litoral, entre o oceano atlântico e a Serra do Mar. A altitude varia de 0 a 200 metros acima do nível do mar e grande parte da área tem declividade menor que 6% (MINEROPAR, 2006). A Serra do mar é o conjunto de montanhas próximo ao litoral. É nessa região que se encontra o ponto mais alto do estado, o Pico do Paraná, com 1831 metros de altura e apresenta declividade, em sua grande parte, maior que 30%.

O Primeiro planalto ou planalto de Curitiba apresenta altitudes entre 100 e 1400 metros e tem a menor extensão em área dos planaltos (MINEROPAR, 2006). No Segundo Planalto ou planalto de Ponta Grossa, as altitudes variam entre 380 e 1300 metros (MINEROPAR, 2006). O Terceiro planalto ou planalto de Guarapuava é o maior dos planaltos em extensão. As altitudes variam entre 120 e 1360 metros (MINEROPAR, 2006).

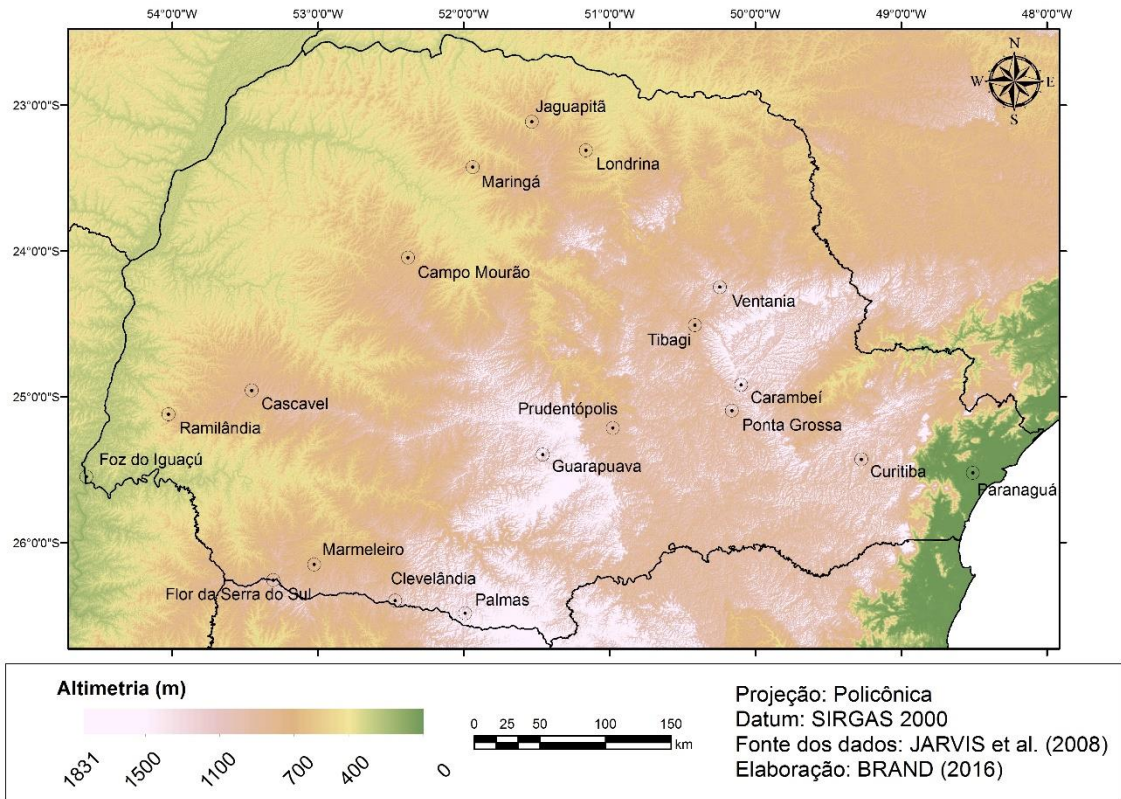


Figura 15 – Mapa de Altimetria do Estado do Paraná

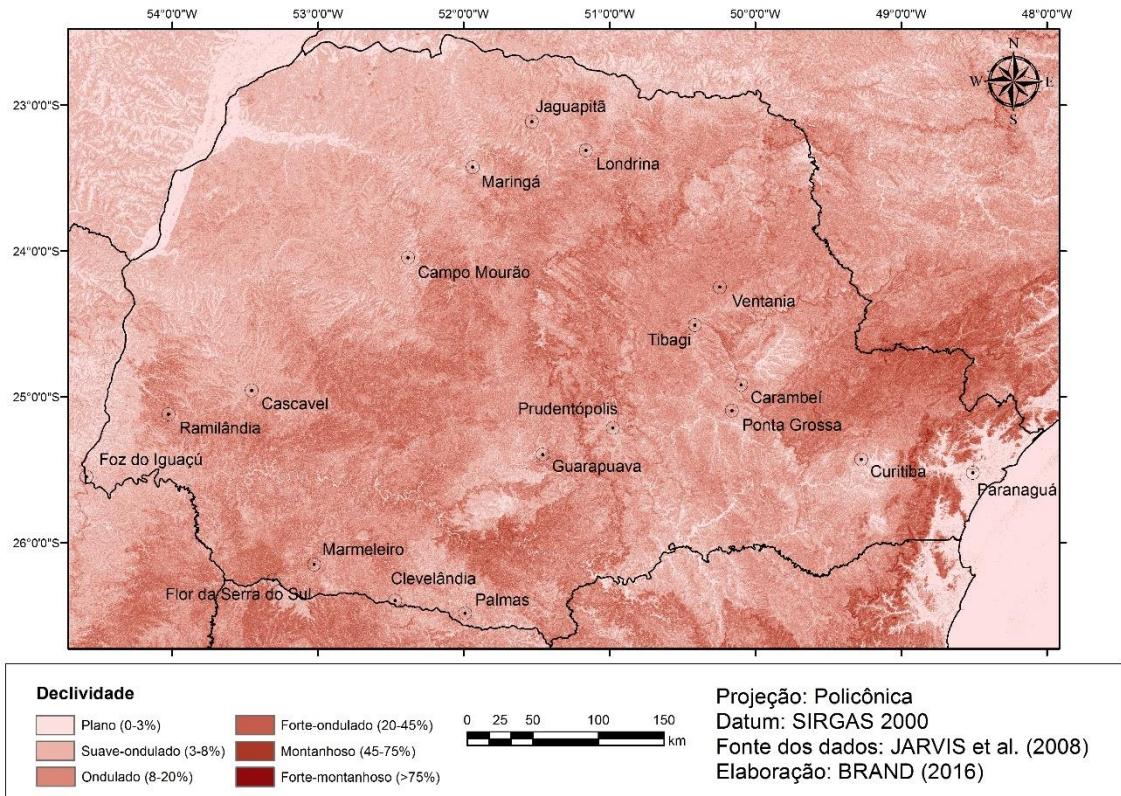


Figura 16 – Mapa de Declividade do Estado do Paraná (em porcentagem)

No Paraná como um todo, as faixas de declividade, estabelecidas pela Embrapa (1979), e suas respectivas áreas estão dispostas na Tabela 7.

Tabela 7 – Faixas de declividade e respectivas áreas

<i>Declividade em %</i>	<i>Declividade em graus</i>	<i>Área (km²)</i>	<i>Área (%)</i>
0 a 3%	0 – 1,7°	23.585,8	13,27
3 a 8%	1,7 – 4,6°	69.841,2	39,29
8 a 20%	4,6 – 11,3°	64.515,75	36,30
20 a 45%	11,3 – 24,2°	18.758,62	10,55
45 a 75%	24,2 – 36,9°	1.013,50	0,57
> 75%	> 36,9°	34,06	0,02
<i>Total</i>		177.748,9	100

No artigo de Baban e Parry (2001), apenas áreas com declividade menor que 10% poderiam alocar parques eólicos no Reino Unido. Como observado na Tabela 7, 52,56% da área do Estado do Paraná possui declividade menor ou igual a 8%, ou seja, mais fácil pode ser a instalação dos empreendimentos eólicos, em questão de facilidade de acesso ou necessidade de terraplanagem. Uma alta declividade no terreno pode causar dificuldades técnicas de instalação de parques eólicos e causar turbulência no fluxo de vento.

O mapa de declividade (Figura 16) foi normalizado e invertido para ser usado como critério no cálculo do potencial para implantação final. O resultado se encontra na Figura 17.

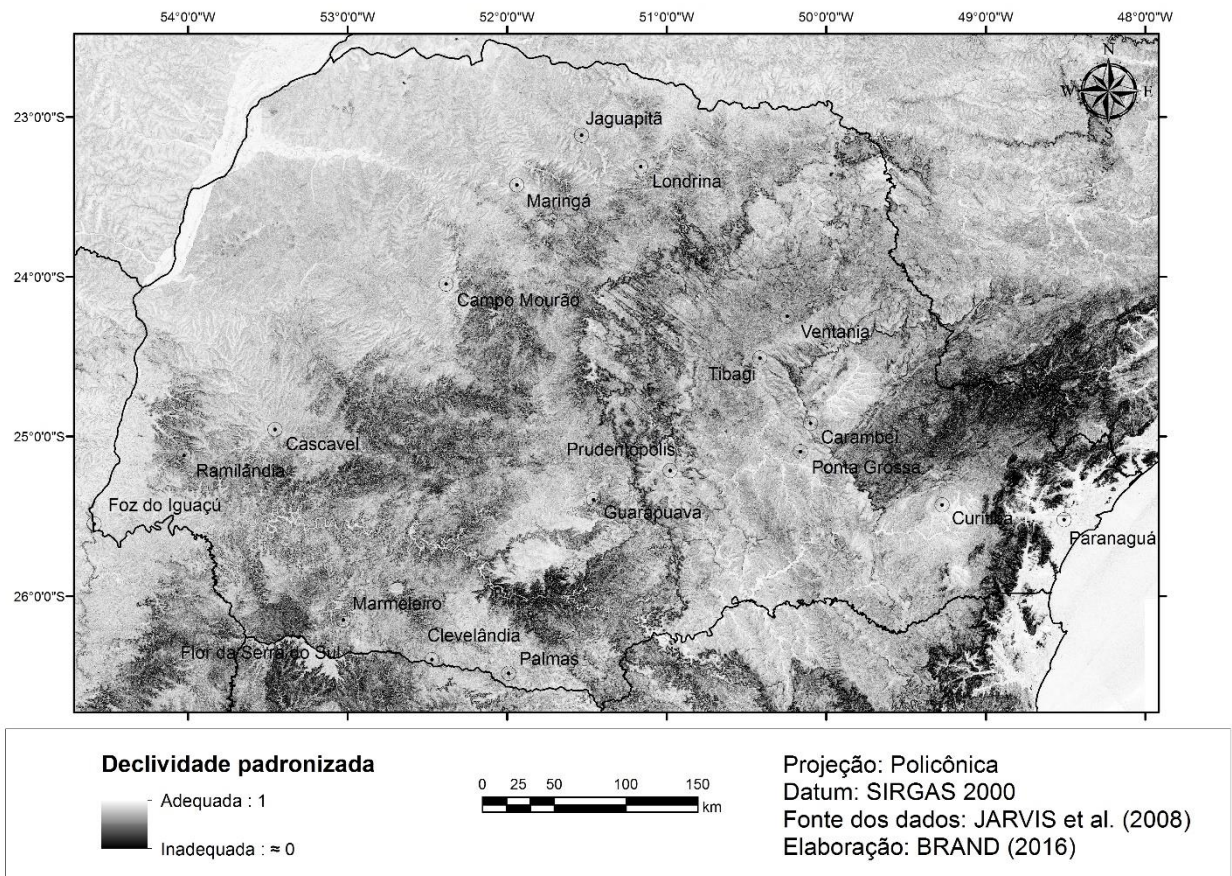


Figura 17 – Mapa de Declividade do Estado do Paraná padronizado

6.1.2 Potencial Eólico

Os dados de densidade de potência da CEPEL a 50m de altura foram interpolados no *software* ArcGIS com o interpolador *Spline* para gerar dados mais resolvidos e com transições mais suaves. De 10 km, passou-se a ter uma resolução de 90 m aproximadamente. O mapa da densidade de potência utilizada no cálculo do mapa de potencial eólico final se encontra na Figura 18.

As áreas que apresentaram as maiores densidades de potência foram as regiões de Palmas, Clevelândia, Mariópolis, Marmeleiro e Flor da Serra do Sul no centro-sul e sudoeste do estado, em Ramilândia a oeste de Cascavel, Laranjeiras do Sul a oeste de Guarapuava, Tibagi, Ventania e Piraí do Sul nos Campos Gerais e na região ao norte de

Maringá, como mostra a Figura 18. Essas regiões coincidem na sua grande maioria com as regiões de maiores velocidades médias de vento a 50m de altura, de acordo com o Atlas do Potencial Eólico do Paraná com exceção da região de Guarapuava, que no Atlas aparece próxima de uma região com velocidades médias entre 6 e 6,5 m/s e na Figura 18 com densidade de potência na faixa de 150 a 250 W/m².

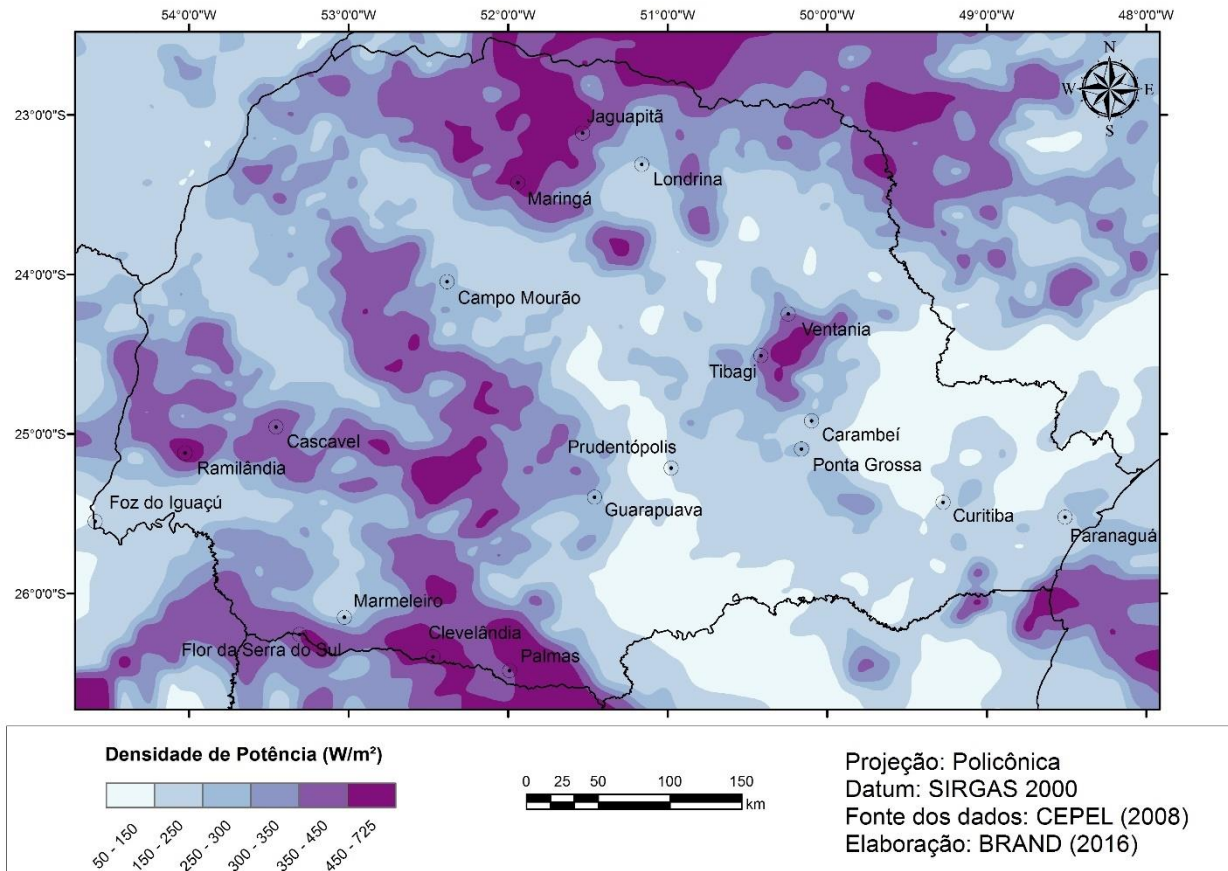


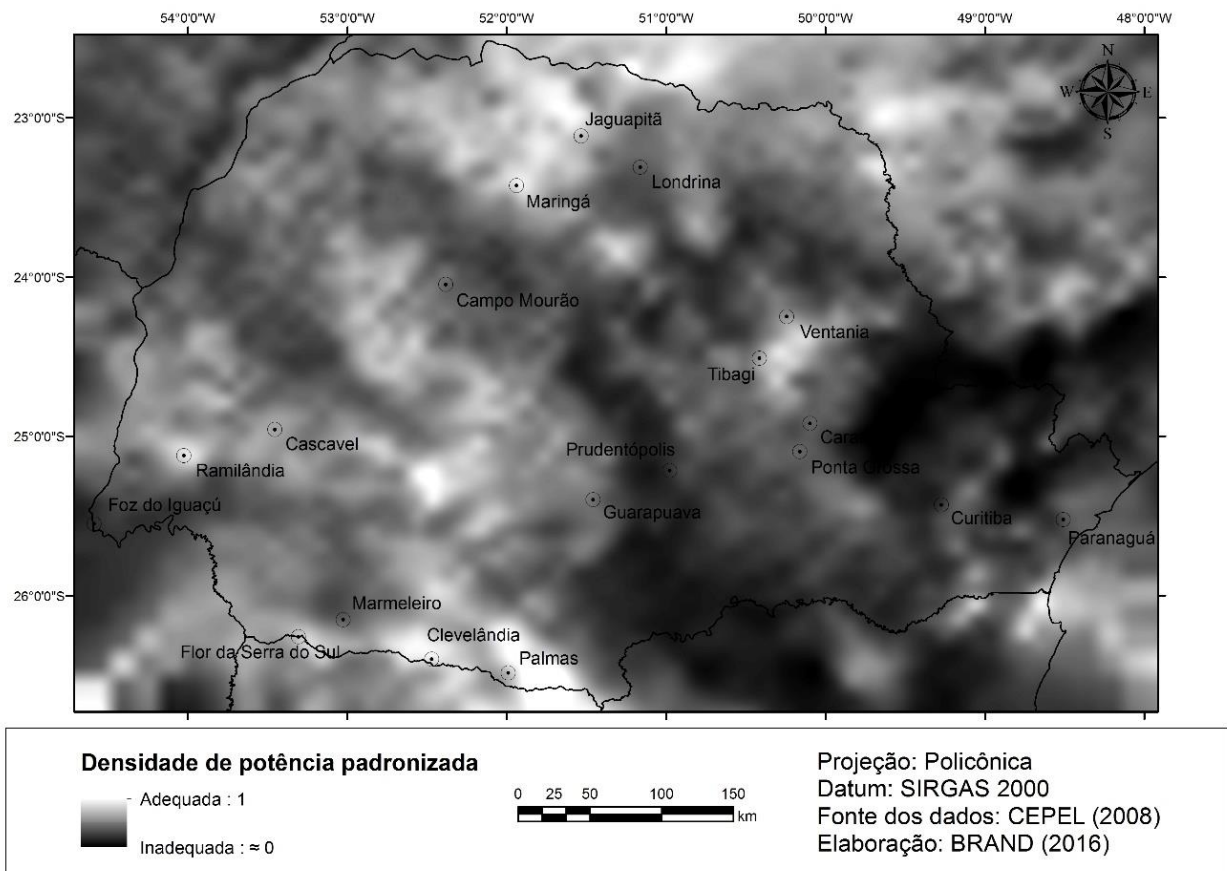
Figura 18 – Densidade de Potência (W/m²) do Estado do Paraná

A Tabela 8 expressa a área (em km² e %) das classes de densidade de potência no Estado do Paraná. Percebe-se que 37,73% do Estado possui densidade de potência maior do que 300 W/m². Um bom indicativo para a instalação de parques eólicos na região como já indicava o Atlas Eólico do Paraná. Lembrando que a altura de referência desses dados é de 50 m.

Tabela 8 – Faixas de densidade de potência (W/m^2) e respectivas áreas

Densidade de Potência W/m^2	Área (km^2)	Área (%)
50 a 150	19.488,14	10,96
150 a 250	57.553,96	32,38
250 a 300	33.634,22	18,92
300 a 350	28.588,49	16,08
350 a 450	29.428,63	16,56
450 a 730	9.055,68	5,09
Total	177.749,12	100

O mapa da densidade de potência padronizada usado como critério no cálculo da análise multicritério se encontra na Figura 19.

**Figura 19 – Mapa da densidade de potência do Estado do Paraná padronizada**

6.1.3 Mapa de distâncias

Os mapas padronizados de distâncias para os critérios linhas de transmissão, ruas, estradas e rodovias, subestações e áreas urbanizadas foram feitos nos quais valores variam de 0 a 1, sendo 1 áreas mais aptas para a instalação de empreendimentos eólicos e 0 áreas inaptas. Os resultados estão nas Figuras 19 a 22.

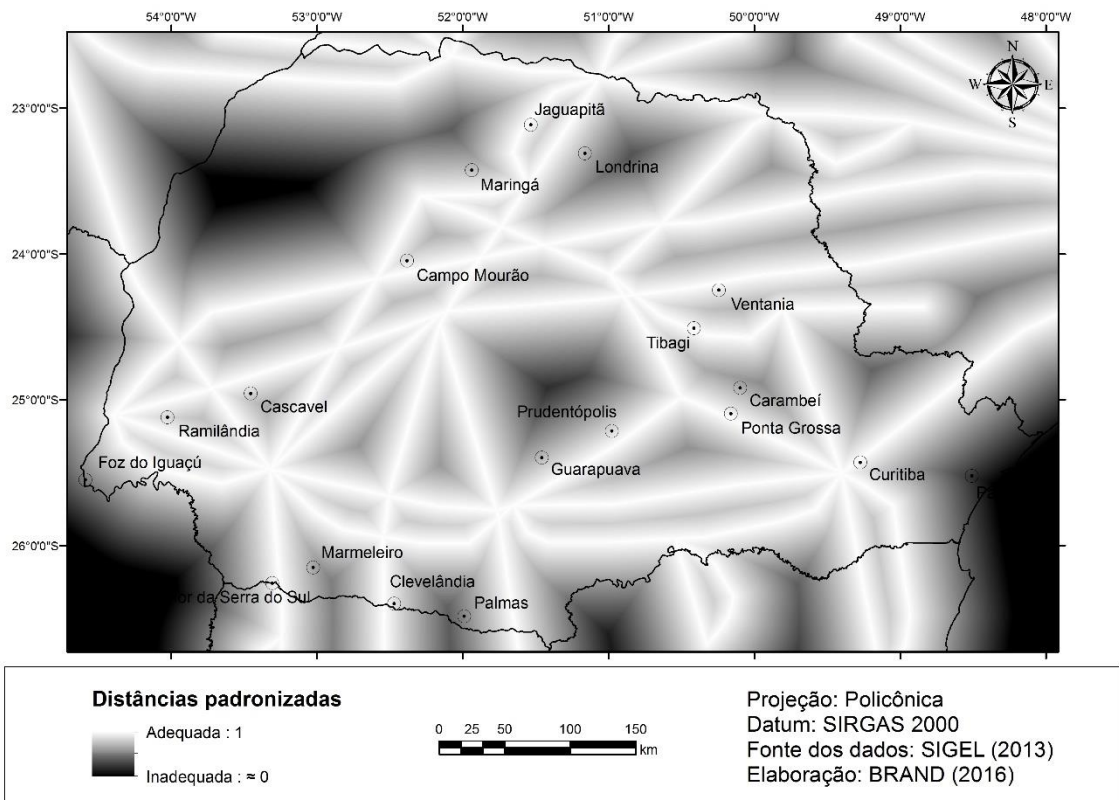


Figura 20 – Mapa de distância euclidiana padronizada (Linhas de Transmissão)

Observa-se que nos casos das distâncias padronizadas das Linhas de Transmissão, Malha viária e Subestações (Figura 20, Figura 21 e Figura 22, respectivamente) quanto menor a distância maior é o grau de aptidão do local. Já no caso da distância padronizada das áreas urbanizadas (Figura 23), quanto maior a distância maior o grau de aptidão.

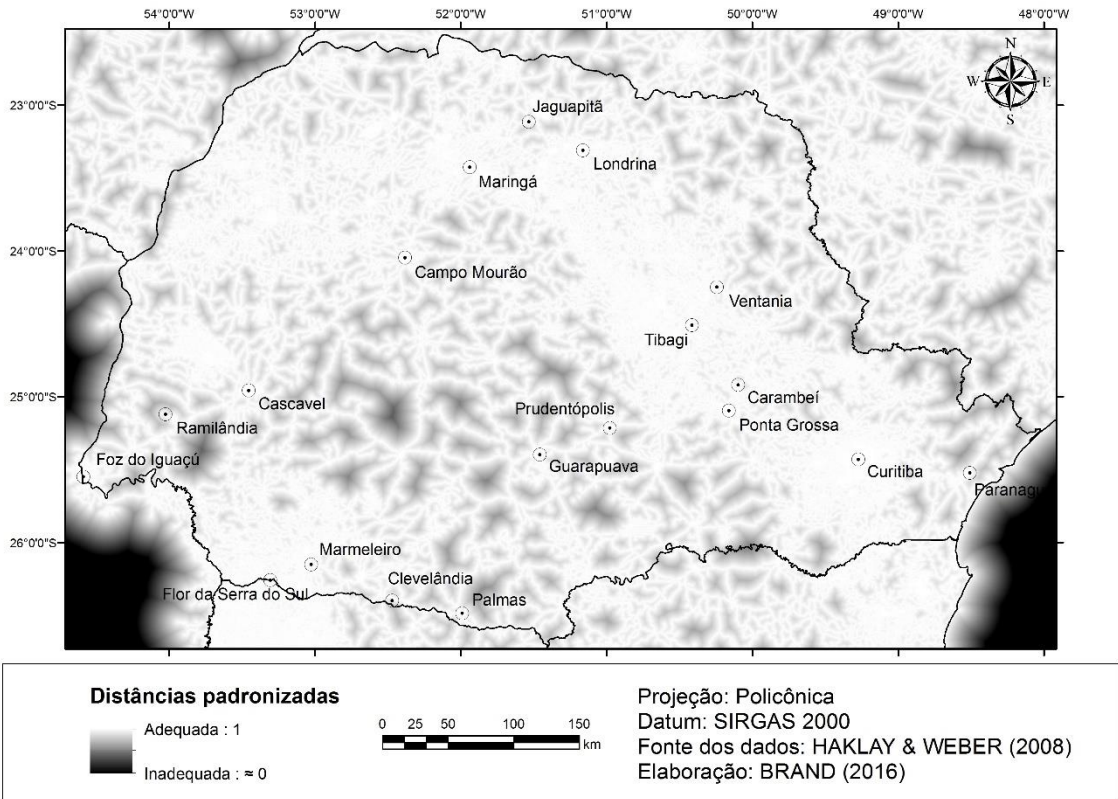


Figura 21 – Mapa de distância euclidiana padronizada (Ruas, estradas e rodovias)

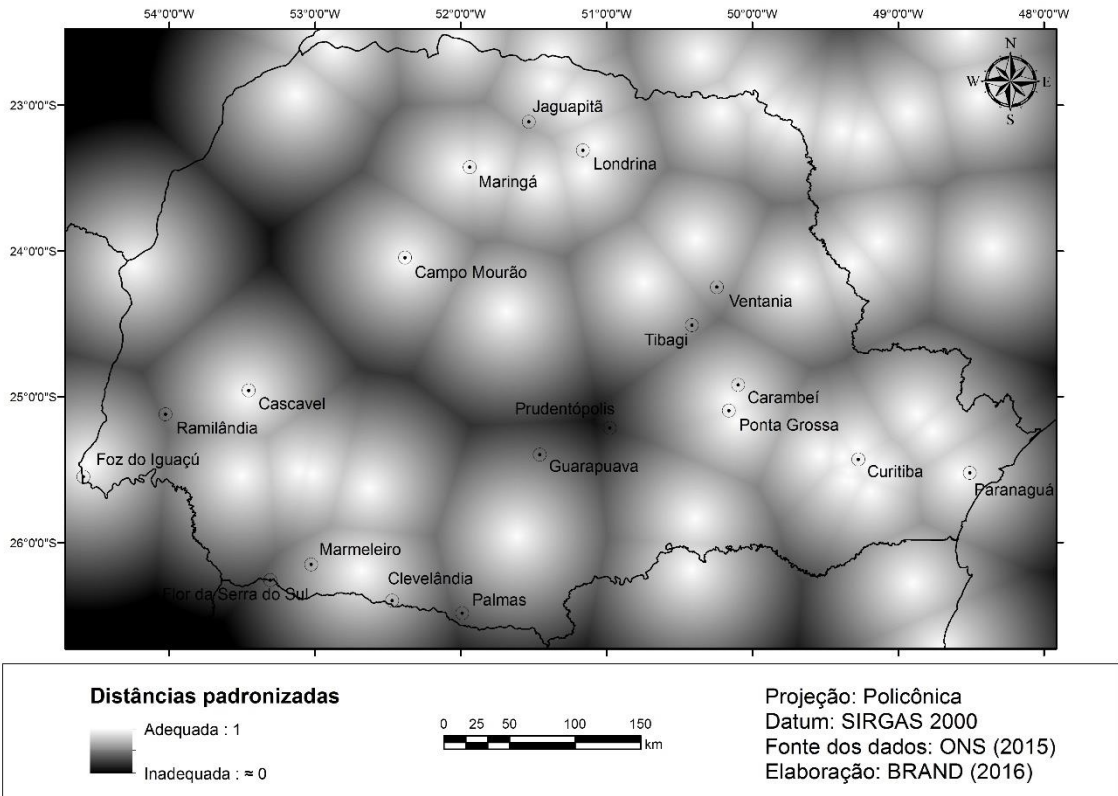


Figura 22 – Mapa de distância euclidiana padronizada (Subestações)

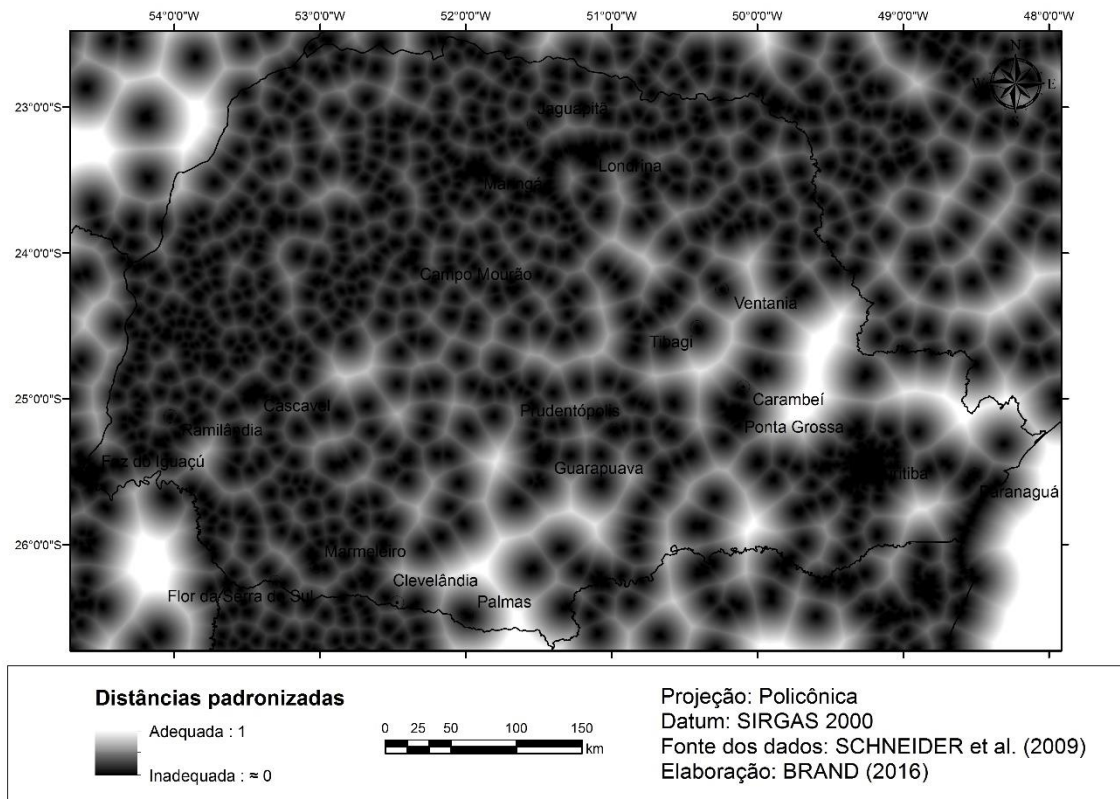


Figura 23 – Mapa de distância euclidiana padronizada (Áreas urbanizadas)

6.1.4 Fatores Restritivos

Como fatores restritivos utilizou-se a hidrografia, unidades de conservação e as áreas urbanizadas. Locais que se enquadrassem em algum dos três critérios têm valor zero de aptidão para a implantação de parques eólicos. Os resultados estão nas Figuras 23 a 25.

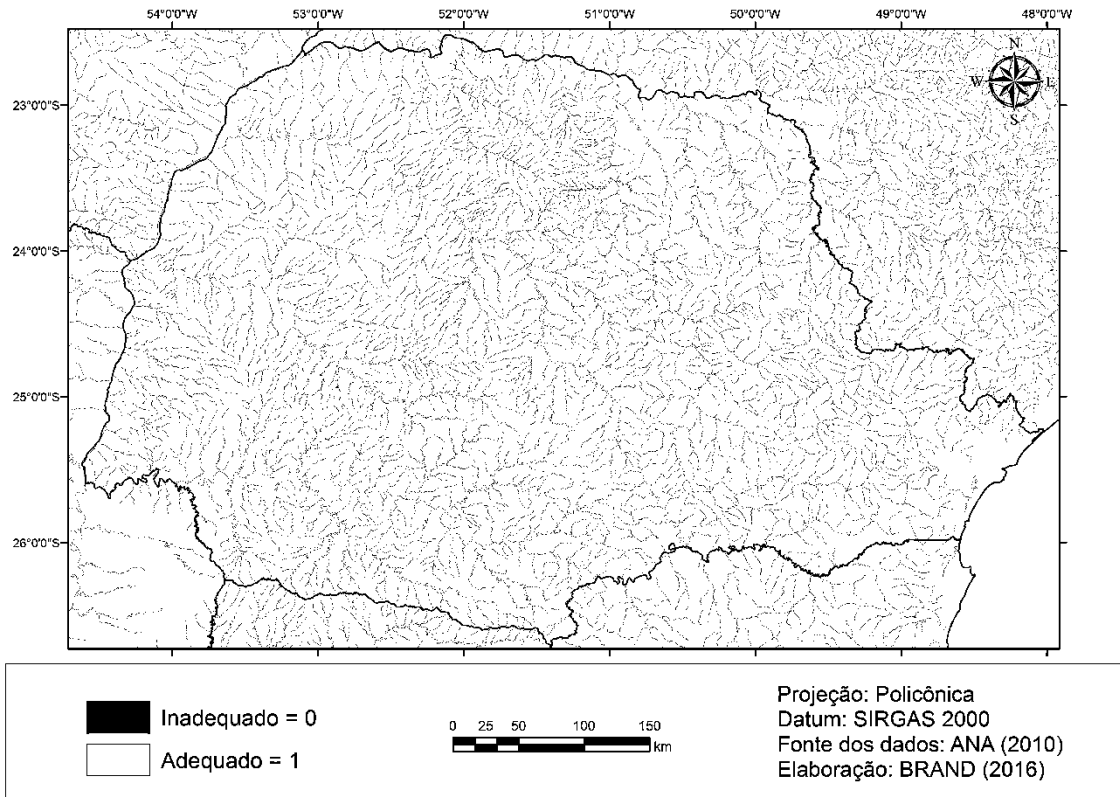


Figura 24 – Mapa dos Fatores Restritivos (Hidrografia)

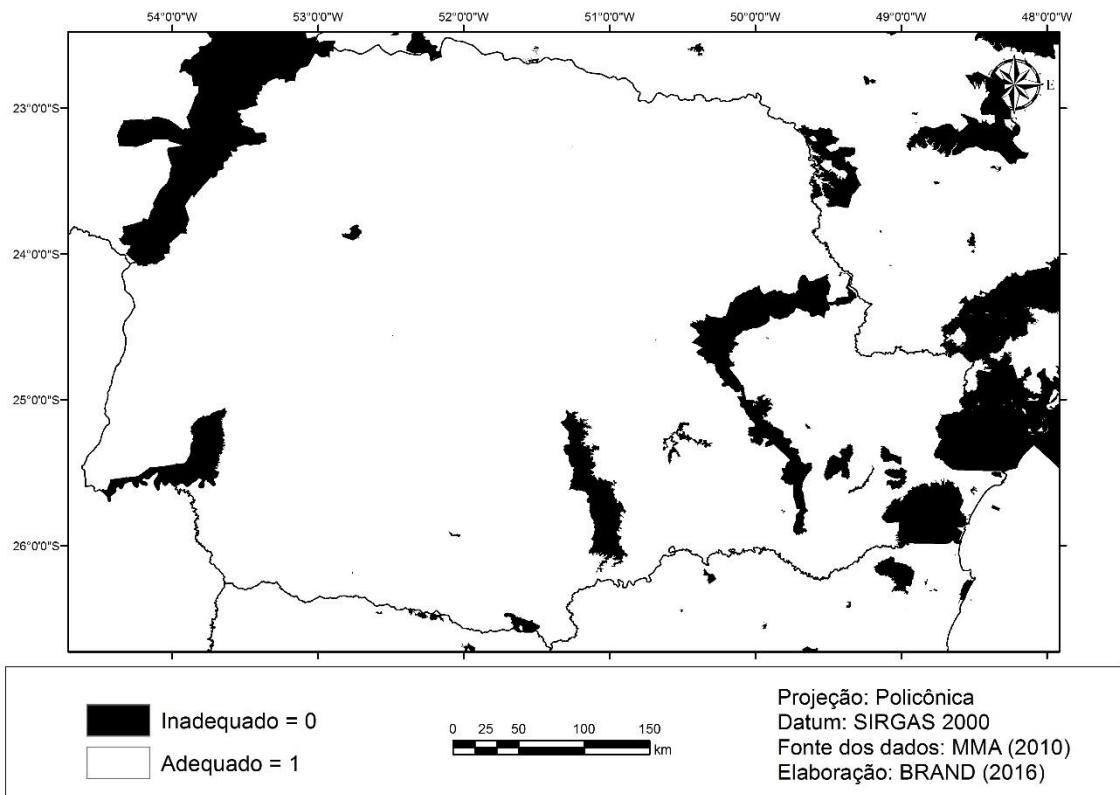


Figura 25 – Mapa dos Fatores Restritivos (Unidades de Conservação)

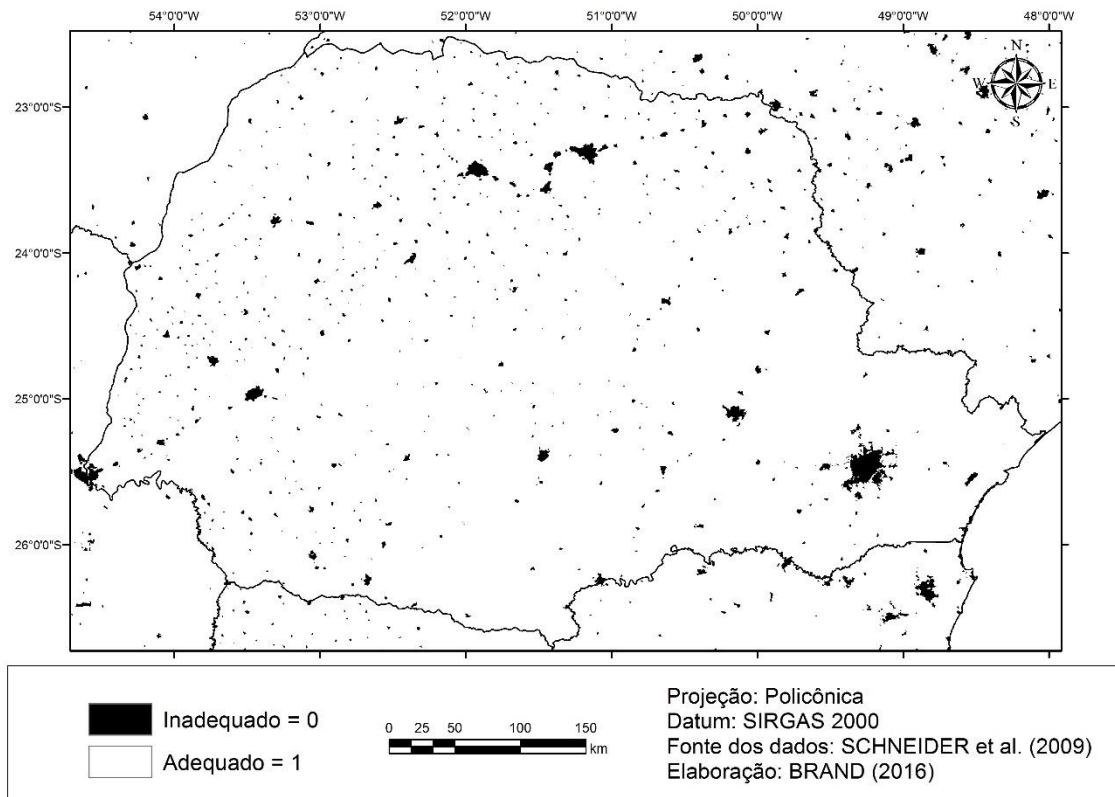


Figura 26 – Mapa dos Fatores Restritivos (Áreas Urbanizadas)

6.2 POTENCIAL PARA IMPLANTAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS EÓLICOS

Com os critérios e fatores restritivos georreferenciados preparados no banco de dados geográfico foi possível calcular o potencial para implantação de parques eólicos a partir da aplicação da análise multicritério proposta.

O mapa final pode ser visto na Figura 27. O potencial máximo alcançado pela análise foi 0,8775 e o valor médio 0,5838. Os maiores valores de potencial de instalação se encontram na região centro-sul do Paraná nos Campos de Palmas e sudoeste, principalmente em Clevelândia, Mariópolis, Marmeleiro e Flor da Serra do Sul. Na fronteira do estado com São Paulo e no norte paranaense próximo a cidade de Maringá também são áreas de elevado potencial.

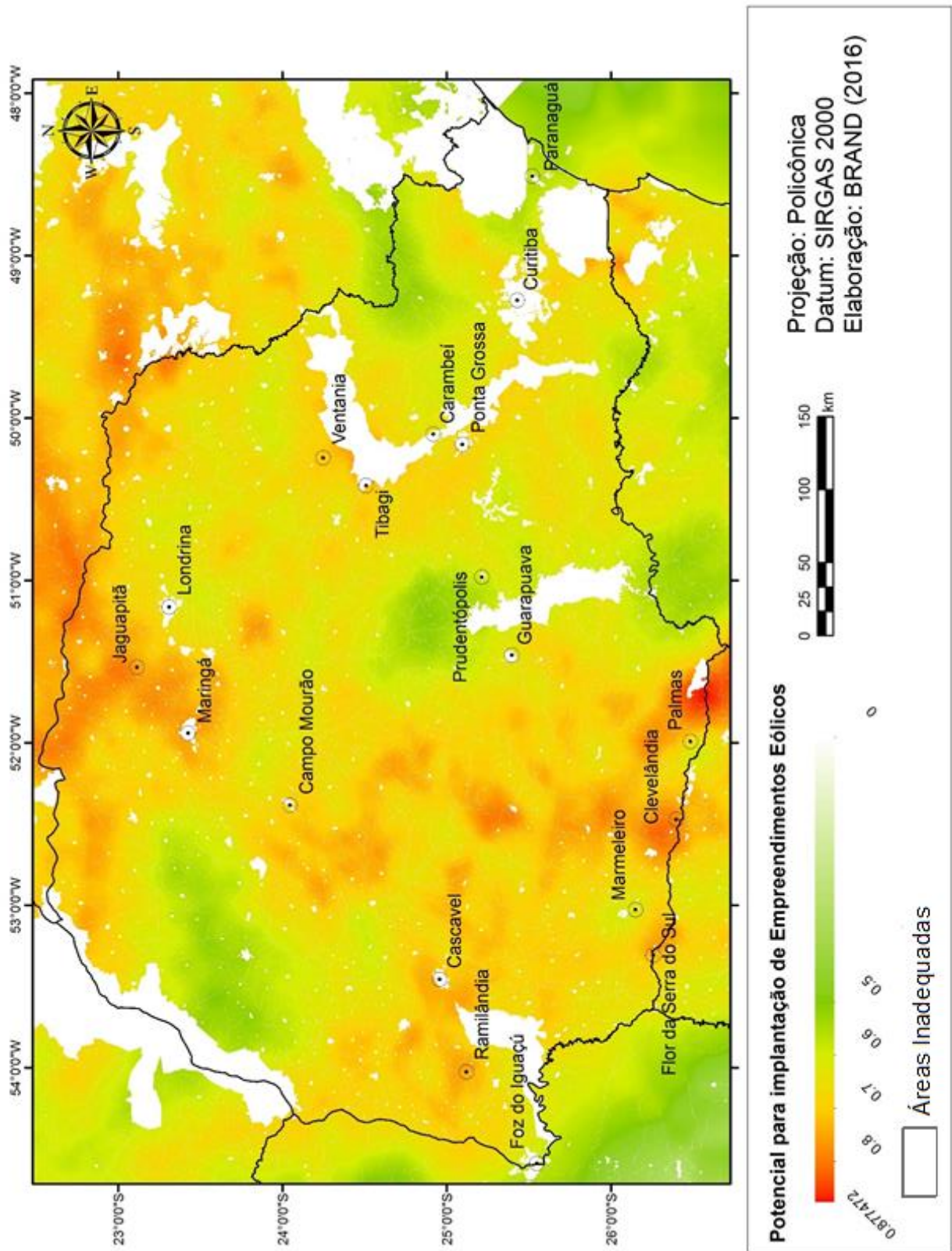


Figura 27 – Mapa temático do potencial para a instalação de empreendimentos eólicos no Estado do Paraná.

Foi feito também o cálculo das áreas para cada classe de potencial, como pode-se ver na Tabela 9. A maior parte do território paranaense (77,5%) tem potencial de instalação maior do que 0,6, e 21,66% dele tem potencial acima de 0,7.

Tabela 9 – Área e densidade de potência de diferentes classes de potencial de instalação

Classe de Potencial	Área		Densidade de Potência (W/m ²)		
	(km ²)	(%)	Mínima	Média	Máxima
0	21.481,94	12,09	53,68	245,03	727,57
0 - 0,5	21,58	0,01	65,27	163,11	259,43
0,5 - 0,6	18.467,43	10,40	53,52	195,67	383,14
0,6 - 0,7	99.187,20	55,84	55,12	248,29	514,69
0,7 - 0,8	37.849,38	21,31	197,57	390,03	669,66
0,8 - 0,9	614,33	0,35	475,83	591,45	727,58
Total	177.621,85	100	-	-	-

Nessas mesmas classes de potencial de instalação foram verificados os valores de densidade de potência (Tabela 9 e Figura 28). Observa-se que com o aumento da classe de potencial aumenta-se também a densidade de potência. Esse resultado já era esperado, pois como a densidade de potência eólica foi um dos fatores que receberam o maior peso, é possível observar que esses locais coincidem com os locais identificados com maiores densidades de potência (no item 7.1.2). A classe 0 apresentou valores de densidade de potência máxima maior do que das outras classes. Isso indica que locais com densidade de potência elevada foram eliminados por algum fator restritivo.

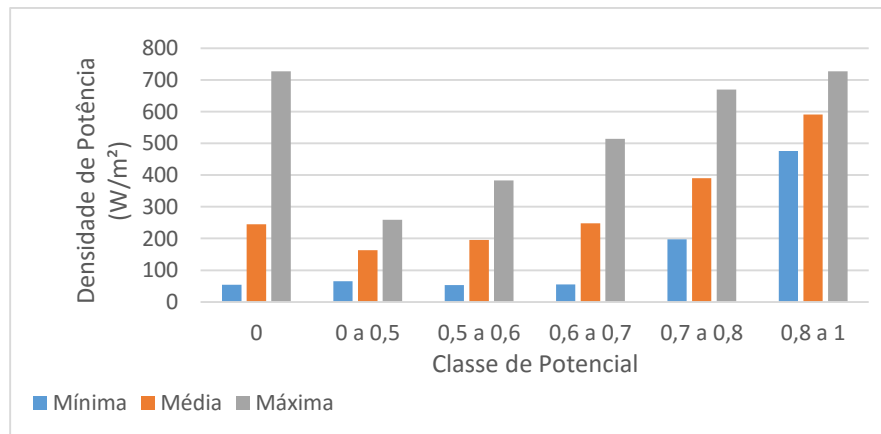


Figura 28 – Densidade de potência máxima, média e mínima nas diferentes classes de potencial calculadas

6.3 CLASSES DE OCUPAÇÃO DO SOLO E O POTENCIAL PARA IMPLANTAÇÃO

A fim de entender a relação entre a ocupação do solo e o potencial de implantação calculado, sobrepôs-se o resultado da análise multicritério no arquivo de vegetação MODIS para que o potencial médio e as áreas fossem tabuladas (Tabela 10).

As classes Agricultura e Mosaico de atividade agrícola com vegetação natural são as que apresentaram maiores potenciais médios, de aproximadamente 64%, e juntas ocupam a maior parte da área do estado. Esse é um bom indicativo, pois são classes que por definição não exigiriam grandes remoções de vegetação arbórea ou ocupações incompatíveis com a instalação de parques eólicos, apenas pequenas remoções de vegetações naturais de baixa estatura, e ainda oferecem a possibilidade de arrendamento da terra e remuneração do proprietário.

As classes Savanas e Savanas arborizadas, apesar de apresentarem potenciais médios acima de 60% e ocuparem áreas relativamente menores do que das classes já citadas, podem demandar a remoção da vegetação, já que se trata de uma vegetação que atinge alturas maiores (superior a 2 metros de altura) que poderiam afetar a rugosidade no entorno da torre eólica. Em uma primeira análise, a instalação de um empreendimento nessas áreas seria mais onerosa e agressiva ao meio ambiente.

Das cinco classes de florestas, quatro apresentam potencial médio maior que 50%. A classe Florestas perenes latifoliadas é a segunda classe com maior ocupação no estado com potencial médio de 52,5%. Ela inclui diversas UCs que, se não fossem tidas como fatores restritivos nessa análise, provavelmente elevariam ainda mais o potencial médio da classe. A construção de um parque eólico nas áreas com florestas, além de demandar mais custos para a remoção de vegetação arbórea, poderia impactar diretamente a flora e fauna presentes no local.

Tabela 10 – Potencial de implantação médio (%) para cada classe de ocupação do solo do arquivo MODIS no Estado do Paraná

<i>Ocupação do solo</i>	<i>Área (km²)</i>	<i>Potencial médio (%)</i>
<i>Florestas perenes de folhas agulhadas</i>	60,4	33,1
<i>Florestas perenes latifoliadas</i>	55.759,9	52,5
<i>Floresta decíduas agulhadas</i>	1,7	54,4
<i>Floresta latifoliada decídua</i>	1.490,0	60,1
<i>Floresta mista</i>	203,8	62,6
<i>Vegetação arbustiva densa</i>	27,7	58,6
<i>Vegetação arbustiva esparsa</i>	1,0	17,5
<i>Savanas arborizadas</i>	6.507,9	61,5
<i>Savanas</i>	16.745,4	60,8
<i>Pastagens</i>	2.409,4	51,2
<i>Agricultura</i>	31.389,0	64,0
<i>Mosaico de atividade agrícola com vegetação natural</i>	56.473,2	63,8
<i>Áreas descobertas ou esparsamente vegetadas</i>	36,5	48,2

6.4 EMPREENDIMENTOS EÓLICOS E O POTENCIAL PARA IMPLANTAÇÃO CALCULADO

O potencial de implantação dos empreendimentos foi extraído para os empreendimentos eólicos – em operação e em DRO – do Paraná. Dos 31 parques eólicos paranaenses, oito apresentaram potenciais de implantação entre 0 e 1 e 23 potencial zero, pois localizam-se em áreas de UC. O potencial desses parques foi então calculado retirando os fatores restritivos da análise multicritério e se encontram na Tabela 11 divididos em três regiões.

Podemos observar que em todos os parques eólicos o potencial é maior que 0,6. O maior potencial é de 0,8754 no Complexo eólico de Palmas e a média do potencial da região é de 0,8518, maior que nas duas outras regiões. Os parques eólicos Serra da Esperança e Água Santa também apresentaram valores de potencial de implantação altos, todos localizados nos Campos de Palmas. A média geral do potencial de todos os parques foi de 0,7407. Considerando que o potencial máximo alcançado na análise foi

0,8775 (ver Figura 27), os valores de potencial da maioria dos empreendimentos eólicos estão próximos desse valor, indicando que os empreendimentos se localizam realmente nas áreas com maior potencial de implantação no Estado do Paraná.

Tabela 11 – Potencial de implantação calculado para os empreendimentos eólicos no Paraná

<i>Região</i>	<i>Nome</i>	<i>Potencial de implantação</i>	<i>Potencial médio</i>
<i>Campos de Palmas</i>	Água Santa I	0,8636	0,8518
	Água Santa II	0,8329	
	Água Santa III	0,8019	
	de Palmas*	0,8754	
	Serra da Esperança I	0,8666	
	Serra da Esperança II	0,8705	
<i>Campos Gerais</i>	Campos Gerais I	0,6876	0,7106
	Campos Gerais II	0,7037	
	Campos Gerais III	0,7115	
	Campos Gerais IV	0,7206	
	Campos Gerais V	0,7274	
	Campos Gerais VI	0,7329	
	Campos Gerais VII	0,7365	
	Campos Gerais VIII	0,7149	
	Campos Gerais IX	0,7130	
	Campos Gerais X	0,7159	
	Campos Gerais XI	0,7185	
	Campos Gerais XII	0,7304	
	Campos Gerais XIII	0,7604	
	Campos Gerais XV	0,7345	
	Frísia I	0,6815	
	Frísia II	0,6544	
	Ventos do Paraná I	0,7118	
	Ventos do Paraná II	0,7071	
	Ventos do Paraná III	0,7094	
	Ventos do Paraná IV	0,6869	
Ventos do Paraná V	0,6876		
Ventos do Paraná VI	0,6859		
<i>Marmeleiro</i>	Rosa dos Ventos I	0,7534	0,7394
	Rosa dos Ventos III	0,7443	
	Rosa dos Ventos II	0,7204	

* Em operação

Na Figura 29 apenas as áreas com potencial de implantação maior do que 0,7 foram mostradas. Observa-se que os empreendimentos eólicos que se concentram nas regiões dos Campos de Palmas e Marmeleiro se localizam nas regiões com os maiores potenciais para implantação calculados. Já os parques eólicos localizados nos Campos Gerais não estão nas regiões que apresentaram maior potencial de implantação, já que estes se encontram em uma Unidade de Conservação.

As regiões no Norte do Paraná e fronteira com São Paulo nas margens do Rio Paranapanema apresentaram potencial elevado ainda não explorado, assim como nas regiões próximas de Cascavel e Laranjeiras do Sul centro-oeste do estado. Essas áreas aptas para a instalação de parques eólicos não estão localizadas em UCs e poderiam perfeitamente ser estudadas para o planejamento de usinas eólicas. Talvez uma das causas pelas quais ainda não foram planejados parques eólicos nessas regiões é por causa da proximidade dessas regiões com áreas urbanizadas.

A Resolução CONAMA nº462/2014 que institui procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos eólicos, estabelece que deve-se caracterizar os índices de ruídos, na área de influência direta do empreendimento, em atendimentos as normas da ABNT e realizar prognósticos incluindo a análise de conforto acústico das comunidades locais e a preservação da saúde no que tange ao sombreamento e ao efeito estroboscópico dos aerogeradores, que consiste no efeito que ocorre quando a luz ilumina um objeto em movimento. Estabelece ainda que para os empreendimentos, cujo limite do parque esteja a menos de 400 m de distância de residências isoladas ou comunidades, apresentar este estudo de forma a caracterizar os índices de ruídos e o efeito estroboscópico visando o conforto acústico e a preservação da saúde da comunidade.

Nas seções anteriores foi mostrada a capacidade da análise multicritério de identificar as áreas com maior potencial para a implantação de empreendimentos eólicos. Nos tópicos 7.4.1 a 7.4.3 serão discutidos alguns detalhes de projeto e medidas mitigadoras apresentadas no Estudo de Impacto Ambiental dos parques eólicos que se concentram nas regiões de Campos de Palmas, Campos Gerais e Marmeleiro.

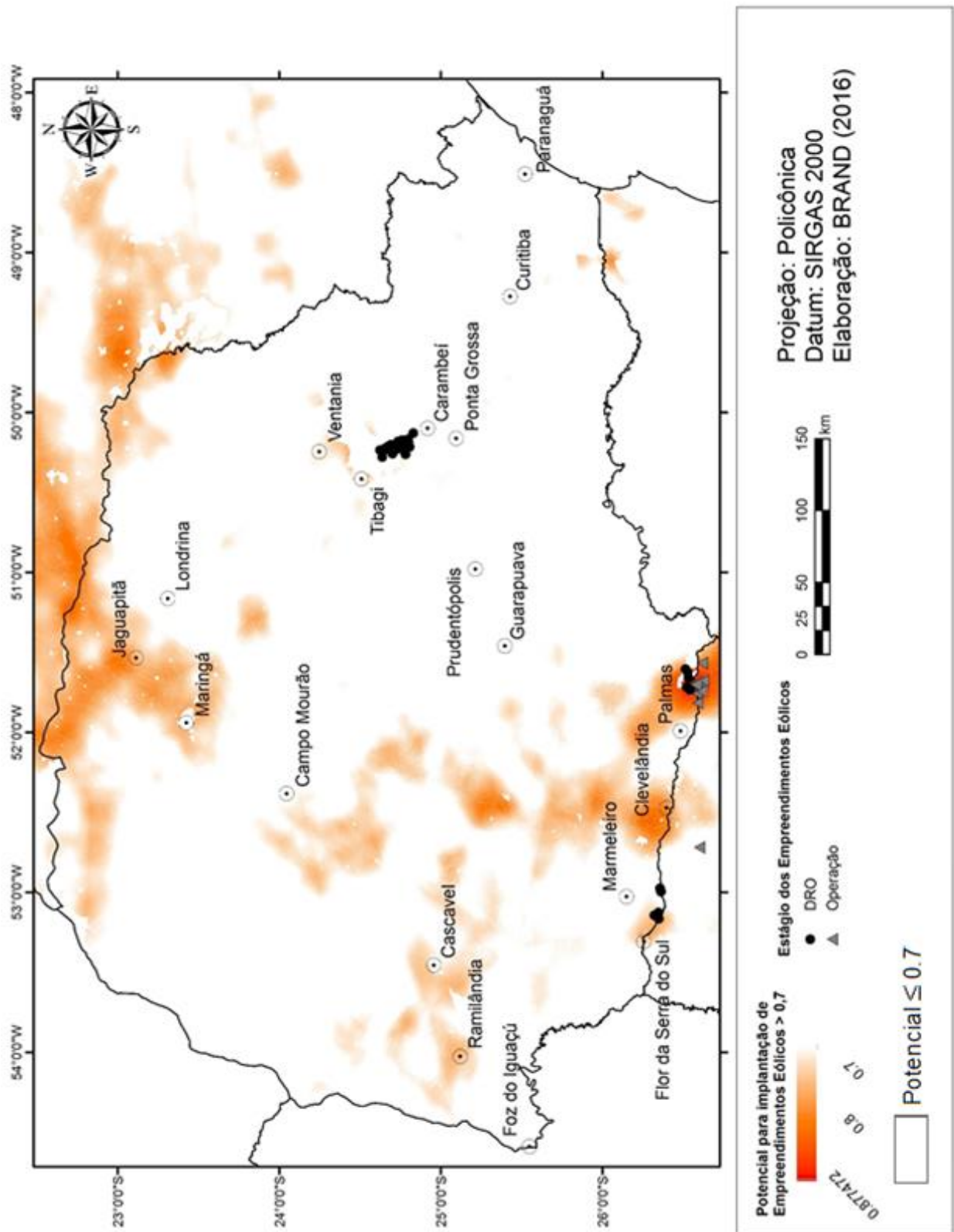


Figura 29 - Mapa temático do potencial para implantação de empreendimentos eólicos no Estado do Paraná maior que 0,7

6.4.1 Campos de Palmas

Só nos municípios de Palmas (PR) e Água Doce (SC) existem 14 empreendimentos eólicos, 9 destes em operação e 5 em DRO (Figura 30). Podemos observar também que SC soube aproveitar melhor a disponibilidade de potencial eólico da região, pois detém 8 empreendimentos dos 9 em operação, apesar de que a Central Eólica de Palmas – PR foi inaugurada em 1999 e é a primeira central eólica do sul do país. Só a partir de 2011 que o Paraná retomou o planejamento eólico na região.

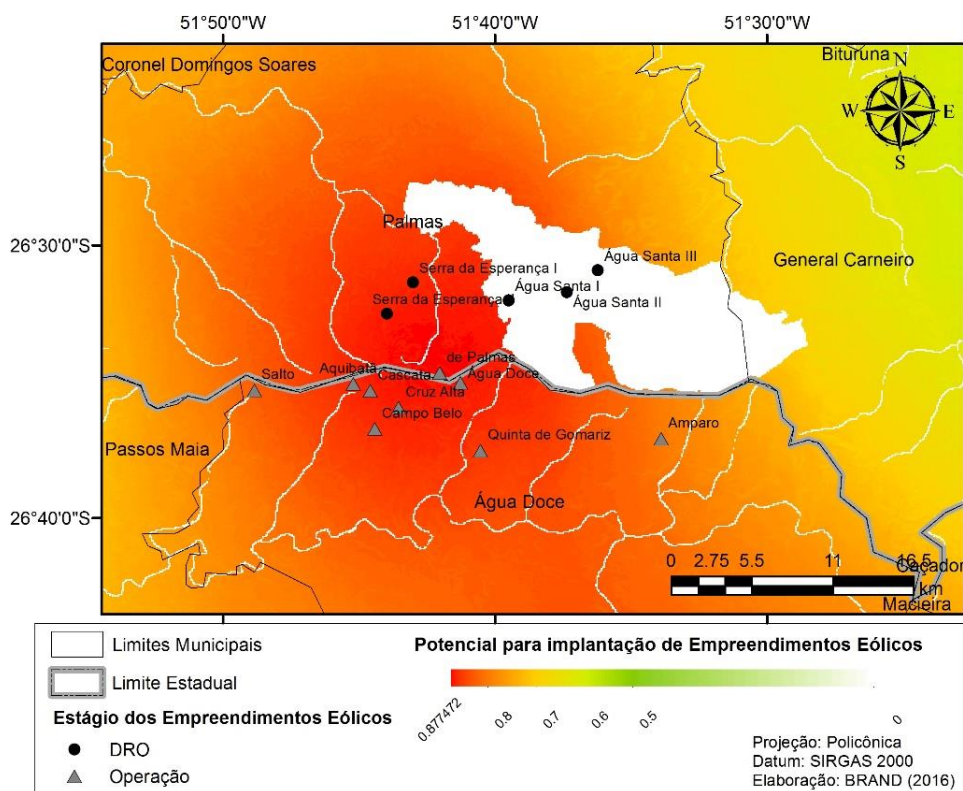


Figura 30 – Mapa temático do potencial para implantação de empreendimentos eólicos nos Campos de Palmas

Uma questão controversa é o planejamento das usinas eólicas Água Santa I, II e III em uma UC. A área em questão é uma unidade de proteção integral do grupo Refúgio

de Vida Silvestre (REVIS) dos Campos de Palmas situado nos municípios de Palmas e General Carneiro (PR), criado através do Decreto Federal de 03 de abril de 2006, abrangendo uma área de 16.582 hectares. O objetivo da UC é proteger os ambientes naturais necessários para a persistência da flora e fauna residente ou migratória, especialmente os remanescentes de campos naturais, as áreas de campos úmidos e várzeas, bem como realizar pesquisas científicas e o desenvolvimento monitorado de atividades de educação ambiental e turismo ecológico.

A Lei 9.985/2000 Art. 13 § 1º determina que os refúgios de vida silvestre podem ser constituídos por áreas particulares, desde que haja compatibilidade entre o uso das propriedades privadas e os objetivos da Unidade. Essa é a lacuna que o Estudo Prévio de Impacto Ambiental (EPIA) das Eólicas Sul (2012) utiliza para justificar a localização da usina dentro da UC, já que, existe a possibilidade de interferência, uma vez que geração e transmissão de energia é interpretada como de utilidade pública. No EPIA propõe-se diversas medidas mitigadoras, inclusive a proteção dos remanescentes de fragmentos de Floresta Ombrófila Mista e de campos naturais, visando preservar a fauna terrestre e a instalação dos aerogeradores em locais distantes de fragmentos de mata nativa, brejos, banhados, plantios de árvores exóticas e construções humanas.

6.4.2 Campos Gerais

Vinte dois empreendimentos eólicos na região dos Campos Gerais nos municípios de Carambeí, Tibagi e Castro próximos a cidade de Ponta Grossa, estão em DRO, como mostra a Figura 31.

O Complexo Eólico Frísia, tem como objetivo gerar mais renda aos cooperados da empresa e fomentar o turismo da região, oferecendo energia limpa para o Sistema Interligado Nacional (SIN). O projeto prevê a instalação de 30 aerogeradores com capacidade instalada de 60 MW, divididos em dois complexos – Frísia I e II. A área de influência direta (ADA) está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) da Escarpa Devoniana, uma UC de uso sustentável, que tem como premissa compatibilizar a

conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos seus recursos naturais (Lei 9.985/2000).

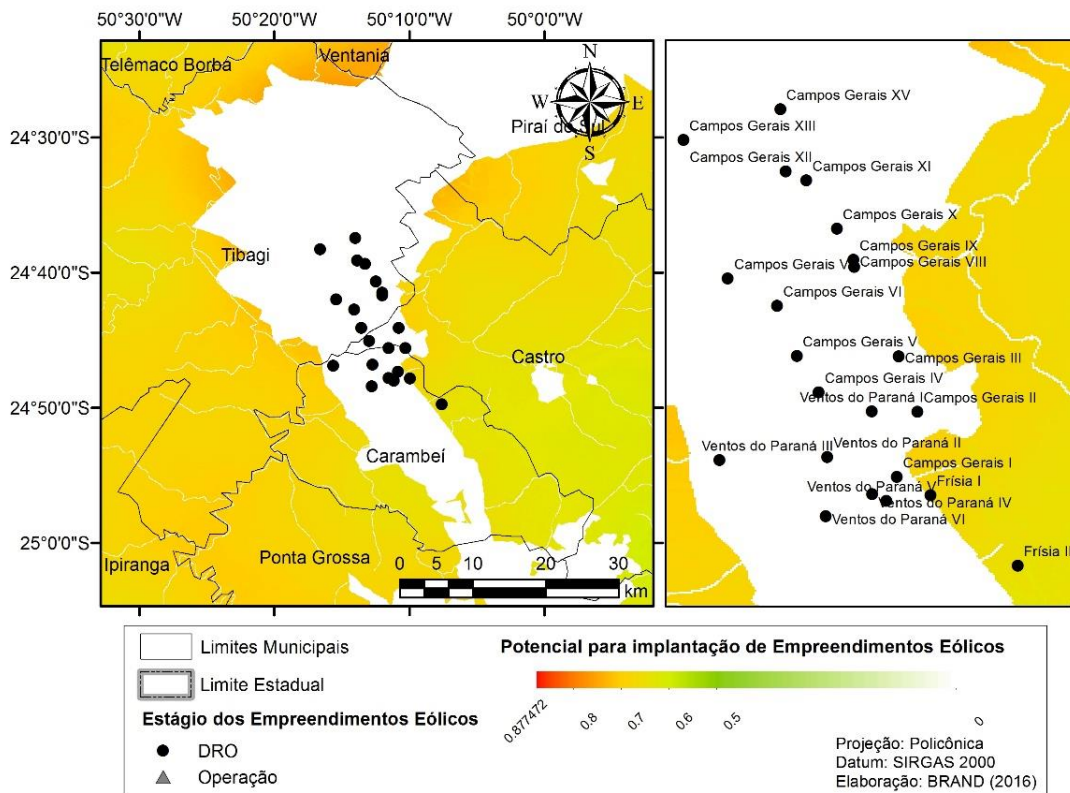


Figura 31 – Mapa temático do potencial para implantação de empreendimentos eólicos nos Campos Gerais

A Lei 9.985/2000 Art. 15 define a APA como uma área em geral extensa que tem como objetivos básicos proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais. A princípio o estudo de impacto ambiental (EIA) do Complexo Eólico Frísia (2015) não prevê a supressão de mata nativa, já que a instalação dos aerogeradores será nas áreas mais altas do terreno, no entorno de acesso municipal já existente. Contudo, existe a possibilidade de melhoramento/alargamento das vias de acesso. Para isso, propõe-se evitar a supressão de vegetação arbórea nativa e veta a supressão ou alteração das formações de bambuzais, as quais abrigam endemismos e espécies ameaçadas da avifauna. Havendo a necessidade de supressão deverá ser feito, nas próximas fases do licenciamento, um inventário da vegetação que venha ser suprimida.

Nessa mesma região estão em DRO o Complexo eólico-elétrico de Campos Gerais que prevê a instalação de mais 388 MW de potência com 194 aerogeradores. O empreendimento estará localizado na divisa dos municípios de Castro, Carambeí e Tibagi, no Estado do Paraná, ocupando uma área aproximada de 12.850 hectares (LACTEC, 2014).

O EIA do Complexo eólico-elétrico de Campos Gerais (LACTEC, 2014) prevê a minimização dos impactos sobre a flora e áreas protegidas desde a fase de planejamento, na definição da localização das estruturas como: aerogeradores, vias de acesso, linhas de distribuição subterrâneas, casa de força, subestação, linha de transmissão e outras estruturas necessárias ao funcionamento do complexo. A instalação das estruturas deverá ser em áreas já antropizadas (com atividades agrossilvipastoris) e a utilização dos acessos já disponíveis. Essa medida além de minimizar o impacto sobre a flora, também visa à manutenção de áreas naturais junto ao empreendimento, para que haja a incursão natural da fauna afetada para esses locais.

Se houver necessidade de supressão de vegetação nativa, está previsto o Programa de Minimização de Impactos sobre a Cobertura Vegetal Nativa. Este programa está dividido em dois subprogramas visando primeiramente reduzir a necessidade de corte da vegetação e depois realizar a reposição florestal acompanhada da execução de um programa de resgate de fauna.

Após as obras de instalação, deverão ser aplicadas as ações do Programa de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) nas áreas afetadas pelo empreendimento, visando a recomposição vegetal destas áreas, minimizando impactos e harmonizando as estruturas do empreendimento à paisagem. Deve ser evitado o uso de espécies exóticas na recuperação de áreas degradadas e paisagismo. As ações do PRAD demandarão a execução do Programa de Manejo, Resgate e Aproveitamento Científico da Flora, visando a manutenção e preservação das populações de flora na região afetada. Além disso, como medida compensatória será realizado o Programa de Compensação Ambiental, atendendo o disposto na Lei Federal nº 9.985/2000 e na Resolução CONAMA nº 371/2006.

6.4.3 Marmeleiro

No município de Campo Erê (SC) existem mais dois parques em DRO e três em Marmeleiro (PR) (Figura 32). Em SC, o arranjo proposto do Parque Eólico Kumo está dividido em Kumo I e Kumo II, sendo que cada projeto planeja 14 aerogeradores com potência instalada unitária de 2,1 MW, chegando a 29,4 MW de potência instalada para cada parque (IMPACTO, 2013).

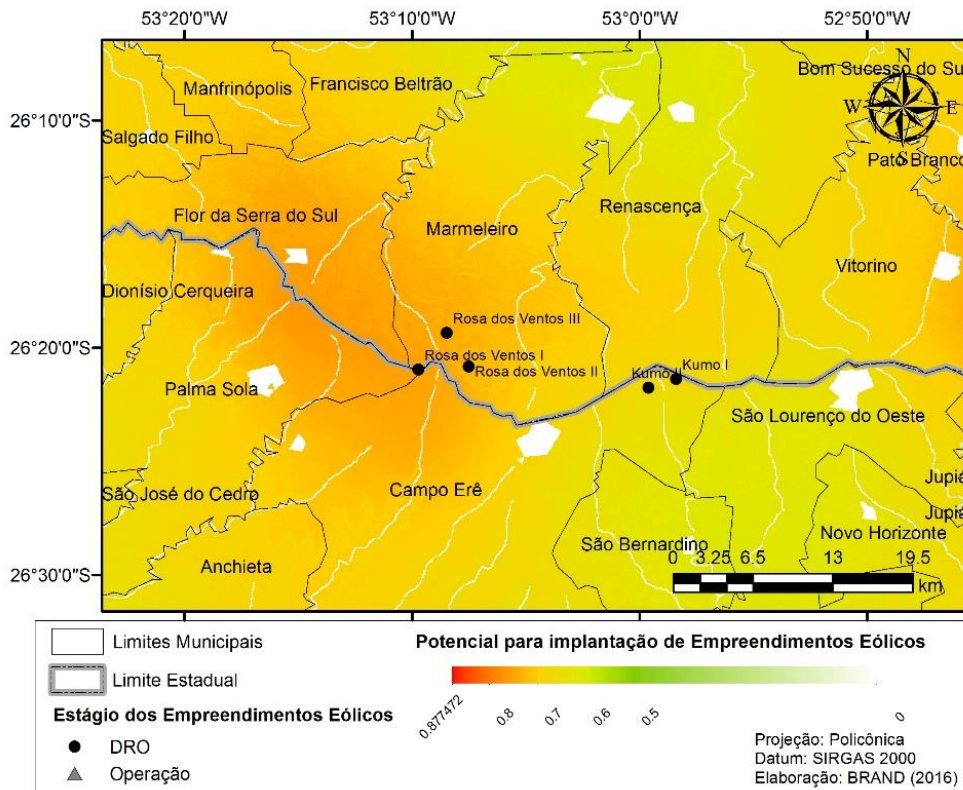


Figura 32 – Mapa temático do potencial para implantação de empreendimentos eólicos em Marmeleiro

No município de Marmeleiro (PR) planeja-se o Parque Eólico Rosa dos Ventos, dividido em Rosa dos Ventos I, II e III, sendo que nos parques I e II serão instalados 11 aerogeradores cuja potência instalada será de 29,7 MW em cada parque e no Parque III

serão instalados 10 aerogeradores gerando 27,0 MW de potência, totalizando 86,4 MW para todo o complexo (IMPACTO, 2015).

O uso do solo no entorno da área de influência direta do Parque Eólico Rosa dos Ventos está atrelado ao uso deliberado de terras para a agricultura e pecuária restando poucas áreas de vegetação nativa. Para a instalação do Parque será necessária a supressão floresta de 8,52 hectares de vegetação nativa secundária do bioma da Mata Atlântica. A supressão florestal de remanescentes florestais deverá ser compensada pela aquisição e proteção de uma área equivalente a desmatada, conforme determina o Art. 17 da Lei nº 11.428/2006. Prevê também um PRAD para a recuperação das áreas adjacentes às torres e dos acessos que não serão mais utilizados após as obras.

6.4 ESTIMATIVA DE ENERGIA PRODUZIDA POR UM AEROGERADOR

Para validar a análise multicritério calculada, foram escolhidas duas áreas, uma com potencial elevado e outra com potencial baixo para implantação de empreendimentos eólicos, para o cálculo da energia produzida por um aerogerador. Os locais escolhidos se encontram na Tabela 12.

Tabela 12 – Locais escolhidos para o cálculo da estimativa de energia produzida

<i>Município</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Potencial</i>
<i>Jaguapitã</i>	-23,035°	-51,524°	0,8041
<i>Prudentópolis</i>	-24,839°	-51,311°	0,5141

Os resultados dos ajustes das distribuições de *Weibull* para as duas alturas dos aerogeradores (125 e 138 m) e para as duas localidades foram satisfatórios com coeficientes de correlações acima de 0,98 em todos os casos. Um resumo com as informações calculadas está na Tabela 13. Pode-se observar que em Jaguapitã a produção de energia foi 177 vezes superior com o modelo da ENERCON e 361 vezes maior com o modelo da GAMESA.

Tabela 13 – Coeficientes da Distribuição de Weibull e Produção anual de energia estimada

<i>Modelo</i>	<i>Jaguapitã</i>		<i>Prudentópolis</i>	
	<i>ENERCON E-82 2,3 MW</i>	<i>GAMESA G114 2,0 MW</i>	<i>ENERCON E-82 2,3 MW</i>	<i>GAMESA G114 2,0 MW</i>
<i>Altura do cubo (m)</i>	138	125	138	125
<i>k</i>	2,2581	2,2581	2,5345	2,5345
<i>c</i>	5,7366	5,6354	1,819	1,7977
<i>coeficiente de determinação (R²)</i>	0,9866	0,9867	0,9811	0,981
<i>Produção anual de energia (MWh)</i>	2.903,30	4.588,54	16,41	12,71

A produção da região de Jaguapitã deve ser ainda maior, pois como os dados de velocidade do vento usados no cálculo dos parâmetros não foram estimados a partir de dados medidos no local e nas alturas da torre do aerogerador e possuem uma resolução de 50 km, a incerteza contida nessas manipulações é alta. Infelizmente não há estações meteorológicas nesses locais para que o cálculo fosse mais preciso.

Avaliou-se também os locais quanto aos critérios utilizados no cálculo do potencial para implantação e os resultados estão na Tabela 14. No ponto do município de Jaguapitã as distâncias foram bem menores para a Linha de Transmissão, Subestação e Malha viária mais próxima do que as do ponto em Prudentópolis. A densidade de potência foi bem maior em Jaguapitã e a declividade bem menor, justificando o potencial para implantação superior nesse local. O único critério que não favoreceu o ponto em Jaguapitã foi a distância até uma área urbanizada mais próxima.

Tabela 14 – Avaliação dos locais quanto aos critérios utilizados no cálculo do potencial

<i>Município</i>	<i>Jaguapitã</i>	<i>Prudentópolis</i>
<i>Potencial para implantação</i>	0,8041	0,5141
<i>Densidade de Potência (W/m²)</i>	499,78	157,26
<i>Linha de Transmissão mais próxima (km)</i>	1,76	63,11
<i>Subestação mais próxima (km)</i>	24,5	60,34
<i>Área urbanizada mais próxima (km)</i>	8,37	30,15
<i>Malha viária mais próxima (km)</i>	0,71	12,91
<i>Declividade (graus)</i>	3,57	7,06

Com esses resultados foi possível então validar o método usado na Análise multicritério para o mapeamento das áreas com maior potencial de implantação de empreendimentos eólicos.

7. CONCLUSÕES

A análise multicritério se mostrou eficaz na identificação das áreas com maior potencial para implantação de empreendimentos eólicos. Potencial maior que 0,7 foi encontrado em cerca de 22% do território paranaense. Isso se deve ao fato de que os locais com maior potencial de geração energética apresentaram aptidão para a instalação de parques, considerando os fatores avaliados.

O estudo conseguiu identificar áreas com elevado potencial para implantação que ainda não foram consideradas nos projetos em planejamento de empreendimentos eólicos. Os empreendimentos eólicos nos Campos Gerais e alguns nos Campos de Palmas apresentaram potencial zero por estarem localizados em UCs. A análise mostrou que existem diversas outras regiões com potencial maior do que o desses empreendimentos que poderiam ser exploradas ao invés de impactar as UCs existentes nessas regiões.

A análise serviu para identificar as áreas com maior potencial para implantação de empreendimentos eólicos, mas não dispensa um estudo minucioso da área de instalação. A metodologia utilizada nesse trabalho poderia ainda ser usada em uma escala menor e outros fatores incluídos na análise como, áreas de preservação permanente, áreas estratégicas para a conservação e a recuperação da Biodiversidade, densidade populacional, recursos históricos/culturais, comunidades indígenas, entre outros fatores que devem ser considerados no estudo de impacto ambiental exigido no licenciamento ambiental do empreendimento eólico estabelecidos na Resolução CONAMA nº462/2014.

O resultado poderia ter sido bem melhor se a resolução dos dados de entrada fossem maiores, principalmente os de densidade de potencial eólico, com resolução de 10 km. Outro fator importante a ser mencionado é que os dados de densidade de potencial eólico são de 50 m de altura e atualmente os aerogeradores atingem alturas maiores que 100 m. Se uma altura maior for considerada na análise, maior também será a densidade de potência, como mostra o Atlas do Potencial Eólico do Paraná e assim a

análise poderia identificar outras áreas com elevados potenciais para implantação de parques eólicos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3 ed. Brasília, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. (2016) **BIG - Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 14 abr. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. **Hidroweb**. 2010.

ARBEITSGRUPPE ERNEUERBARE ENERGIEN – AGEE. **Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland 1990 – 2014**. 2015. Disponível em: <<http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2014-excel.html>>. Acesso em: 05 Out 2015.

ARBORE ENGENHARIA & ARBORE FLORESTAS LTDA. **Estudo Prévio de Impacto Ambiental. Complexo Eólico - Eólicas Sul**. (2012). Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2014_EIA_RIMA/Palmas/1_EIA_EOLICAS_SUL_FINAL_MAI_2014_compressed.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2016.

AYDIN, N. Y., KENTEL, E., & DUZGUN, S. (2010). GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 14(1), 364-373.

BABAN, S. M., & PARRY, T. (2001). Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. **Renewable energy**, 24(1), 59-71.

BIOMETRIA CONSULTORIA E PROJETOS. **EIA-RIMA Parque Eólico Batavo**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2015_EIA_RIMA/EIA_Parque_Eolico_Batavo.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2016.

BRAND, V. S., UZÊDA, T. R., BATISTA, L. F. A. Estimativa de áreas de risco de alagamento na Bacia do Ribeirão Lindóia no Paraná (PR). **Anais do IV Workshop**

Internacional de Planejamento e Desenvolvimento Sustentável em Bacias – UNESP. 2013 – ISSN 2236-7985.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** 2 ed. Brasília, DF: ANEEL, 2005. Disponível em: < [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf) >. Acesso em: 8 set. 2015.

BRASIL. **Decreto de 3 de Abril de 2006.** Cria o Refúgio de Vida Silvestre dos Campos de Palmas, no Estado do Paraná, e dá outras providências. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília.

BRASIL. **LEI N 9.985, DE 18 DE JULHO DE 2000.** Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. **RESOLUÇÃO nº 371, de 5 de abril de 2006.** Estabelece diretrizes aos órgãos ambientais para o cálculo, cobrança, aplicação, aprovação e controle de gastos de recursos advindos de compensação ambiental, conforme a Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza-SNUC e dá outras providências.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. **RESOLUÇÃO nº 462, de 24 de julho de 2014.** Estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica em superfície terrestre, altera o art. 1º da Resolução CONAMA nº 279, de 27 de julho de 2001, e dá outras providências.

CÂMARA, G. Representações computacionais do espaço geográfico. In: CASANOVA, M.; CÂMARA, G.; DAVIS, C.; VINHAS, L.; RIBEIRO, G. (org). **Bancos de Dados Geográficos.** São José dos Campos: MundoGEO, 2005. p. 1-44.

CÂMARA, G. Introdução. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais.** São José dos Campos: INPE, 1998. p. 1-30.

CÂMARA, G.; BARBOSA, C.; DE FREITAS, U. M. Operações de Análise Geográfica. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais**. São José dos Campos: INPE, 1998. p. 1-30.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V.M. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2001. São José do Campo. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html>>. Acesso em: 10 out. 2015.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Conceitos Básicos em Ciência da Informação. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V.M. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2001. São José do Campo. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html>>. Acesso em: 10 out. 2015.

CÂMARA, G.; ORTIZ, M. **Sistema de Informações Geográficas para aplicações ambientais e cadastrais: uma visão geral**. 1998. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/geopro/trabalhos/analise.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2015.

CAPUCIM, M. N. et al. (2015). South America Land Use and Land Cover Assessment and Preliminary Analysis of Their Impacts on Regional Atmospheric Modeling Studies. **Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, IEEE Journal of, 8(3), 1185-1198.

CASANOVA, M.; CÂMARA, G.; DAVIS, C.; VINHAS, L.; RIBEIRO, G. (org). **Bancos de Dados Geográficos**. São José dos Campos, MundoGEO, 2005.

CENTRO DE PESQUISA EM ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). **Brazil Wind Data (10km)**. Rio de Janeiro, 2008.

CHANG, N. B., PARVATHINATHAN, G., & BREEDEN, J. B. (2008). Combining GIS with *fuzzy* multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. **Journal of environmental management**, 87(1), 139-153.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA – COPEL. **Anuário Estatístico do Estado do Paraná**. 2013. Disponível em: <http://www.ipardes.pr.gov.br/anuario_2013/index.html>. Acesso em: 19 out. 2015.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICO SÉRGIO BRITO – CRESEB. **História da Energia Eólica e suas utilizações**. 2015. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=201>. Acesso em: 19 out. 2015.

DO AMARANTE, O. A. C., BROWER, M., ZACK, J., **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. 2001. MME/ELETOBRÁS/CEPEL. Disponível em: <<http://www.portaldobrasil.net/>>. Acesso em: 17 set. 2015.

DO AMARANTE, O. **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná**. 2007. COPEL/LACTEC/CAMARGO-SCHUBERT ENGENHARIA EÓLICA. Disponível em: <[http://www.copel.com/download/mapa_eolico/Atlas_do_Potencial_Eolico_do_Estado_d_o_Parana.pdf](http://www.copel.com/download/mapa_eolico/Atlas_do_Potencial_Eolico_do_Estado_do_Parana.pdf)>. Acesso em: 17 set. 2015.

DONHA, A. G., SOUZA, L. D. P., & SUGAMOSTO, M. L. (2006). Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, 10(1), 175-181.

DOS SANTOS, R. P. **Introdução ao ArcGIS: Conceitos e comandos**. 2009. Disponível em: <<http://www.ctec.ufal.br/professor/crfj/Extensao/ArcGIS/Apostila+Renato+Prado+Vol+2.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2015.

ELETOBRAS. **Proinfra**. 2015. Disponível em: <<http://www.eletobras.com/elb/Proinfra/data/Pages/LUMISABB61D26PTBRIE.htm>>. Acesso em: 17 out. 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos** (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **EPE habilita 802 projetos para leilão de energia com entrega em 2021**. (2016). Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20A-5%202016/Leilao%20A-5%202016.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Sistema de acompanhamento de empreendimentos geradores de energia elétrica – AEGE** (2014). Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%B5es%202014/EPE-DEE-RE-028_R0_Manual%20Emp.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2016.

ENERCON. **ENERCON product overview**. (2015). Disponível em: <http://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/broschueren/pdf/en/ENERCON_Produkt_en_06_2015.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2016.

ENERGY SAVING TRUST FIELD – ESTF. **Generate your own Energy**. Acesso em: <<http://www.energysavingtrust.org.uk/Generate-your-own-energy/Energy-Saving-Trust-field-trial-of-domesticwind-turbines>>; 2009 Acesso em: 24 out. 2015.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Eólica**. Ed1, Ed. Manole, 282p., São Paulo, 2011.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo - SP: Oficina de Textos, 2008. p. 160

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND ENERGIESYSTEMTECHNIK – IWES. **Windenergie report Deutschland 2014**. 2015. Disponível em: <http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/Windenergie_Report_2014.pdf>. Acesso em: 05 out. 2015.

FRIEDL, M. A. et al. MODIS collection 5 global land cover: Algorithms refinements and characterization of new datasets. **Remote Sens. Environ.**, vol. 114, pp. 168–182, 2010.

FURTADO, André Tosi. **Energia, economia e mercado**. 2004. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/2004/12/16.shtml>>. Acesso em: 8 set. 2015.

GAMESA. **Gamesa G114-2.0MW (Turbine)**. (2016). Disponível em: <<http://en.wind-turbine-models.com/turbines/428-gamesa-g114-2.0mw>>. Acesso em: 16 mai. 2016.

GARBE, E. A., MELLO, R. D., & TOMASELLI, I. (2011). Projeto conceitual e análise de viabilidade econômica de unidade de geração de energia elétrica eólica na Lagoa dos Patos–RS. **Economia & Energia**, 83, 24-48.

GWEC. **2014 marked a record year for global wind power.** 2015. Disponível em: < <http://www.gwec.net/global-figures/wind-energy-global-status/>>. Acesso em: 15 out. 2015.

GWEC. **Global Wind Report: Annual market update 2014.** (2015). Disponível em: < http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2014_Report_LR.pdf >. Acesso em: 3 dez. 2015.

GWEC. **Global Wind Statistics 2015.** (2016). Disponível em: < http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-PRstats-2015_LR_corrected.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2016.

GWEC, GREENPEACE. **Wind Force 12.** 2005. Disponível em: < https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/greenpeace_studie_windforce_12_1.pdf>. Acesso em: 17 out. 2015.

HAKLAY, Mordechai; WEBER, Patrick. **Openstreetmap:** User-generated street maps. Pervasive Computing, IEEE, 2008, 7. Jg., Nr. 4, S. 12-18.

HANSEN, H. S.; GIS-based Multi-Criteria Analysis of Wind Farm Development. In: SCANGIS 2005: **PROCEEDINGS OF THE 10TH SCANDINAVIAN RESEARCH CONFERENCE ON GEOGRAPHICAL INFORMATION SCIENCE**, 10, 2005, Estocolmo. Anais. Estocolmo: H Hauska & H Tveite, 2005, p. 75-87.

IMPACTO ASSESSORIA AMBIENTAL LTDA. **Estudo de Impacto Ambiental. Parque Eólico Rosa dos Ventos I, II e III.** (2015) Disponível em: < http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2015_EIA_RIMA/EIA_RIMA_Rosa_dos_Ventos_I_II_III/EIA_Rosa_dos_Ventos_I_II_III_Volume_I_Relatorio.pdf >. Acesso em: 12 mai. 2016.

IMPACTO ASSESSORIA AMBIENTAL LTDA. **Relatório de Impacto Ambiental Parque Eólico Kumo I e II.** (2013). Disponível em: < <http://www.fatma.sc.gov.br/ckfinder/userfiles/arquivos/Rimas/RIMA%20KUMO%20I%20e%20II.rar>>. Acesso em: 12 mai. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Estados@Paraná.** 2010. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?lang=&sigla=pr>>. Acesso em: 18 out. 2015.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO – LACTEC. **Estudo de Impacto Ambiental. Complexo Eólico-elétrico (CEE) Campos Gerais.** (2014). Disponível em: <
http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2014_EIA_RIMA/Palmas/1_EIA_EOLICAS_SUL_FINAL_MAI_2014_compressed.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Global Energy-related Emissions of Carbon Dioxide Stalled in 2014.** 2015. Disponível em: <
<http://www.iea.org/newsroomandevents/news/2015/march/global-energy-related-emissions-of-carbon-dioxide-stalled-in-2014.html>>. Acesso em: 15 out. 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Technology Roadmap. Wind Energy.** (2013) Disponível em: <
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2016.

JANKE, J. R.; Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. **Renewable Energy**, v. 35, p. 2228-2234, 2010.

JARVIS A., H.I. REUTER, A. NELSON, E. GUEVARA, 2008, Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), Disponível em: <http://srtm.csi.cgiar.org>.

JUSTICE, C. O. et al. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, vol. 36, no. 4, pp. 1228–1249, Jul. 1998.

KUBISZEWSKI, I.; CLEVELAND, C. J.; ENDRES, P. K. Meta-analysis of net energy return for wind power systems. **Renewable energy**, v. 35, n. 1, p. 218-225, 2010.

LP DAAC – *Land Processes Distributed Active Archive Center*. NASA. Disponível em: <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>. Acesso em: 10 out. 2015.

MARTINS, F.R.; GUARNIERI, R.A.; PEREIRA, E.B. O aproveitamento da energia eólica. **Rev. Bras. Ensino Fís.** 2008, vol.30, n.1, pp. 1304.1-1304.13. ISSN 1806-9126

MINEROPAR. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**. Escala Base, 2006, 1. Jg., Nr. 250.000.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Download de dados geográficos**. 2010. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 19 out. 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Ofício nº064/2016-SE-MME**. (2016). Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_geracao/documentos/Anexo%2016%20-%200Of%C3%ADcio%20064-2016-SE-MME.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Portaria nº 382, de 12 de Agosto de 2015**. (2015) Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20A-5%202016/Portaria%202015-382%20\(A-5%202016\).pdf](http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20A-5%202016/Portaria%202015-382%20(A-5%202016).pdf)>. Acesso em: 23 mai. 2016.

MOREIRA, F. R. et al. Inferência Geográfica e suporte à decisão. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V.M. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2001. São José do Campo. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html>>. Acesso em: 10 out. 2015.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologia de Aplicação**. São José dos Campos, 2001. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 208p.

NASCIMENTO, M. V. G. do et al. **Energia Eólica**. In: TOLMASQUIM, M. T. (org.) Fontes renováveis de energia no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência: CENERGIA, 2003.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **PLANO ANUAL DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA – PEN 2011 VOL. I – RELATÓRIO EXECUTIVO**. 2011. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/planejamento_eletrico/mensal/RE-3-0166-2014_PEN%202014_SumarioExecutivo.pdf>. Acesso em: 19 out. 2015.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. (2015) **SINDAT - Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN**. Disponível em: <<http://betasindat.ons.org.br/SINDAT/>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

OLIVEIRA, W.C.F. de. **Determinação de risco ambiental na drenagem fluvial da bacia do Rio Verde-PR através do uso de sistemas de informação geográfica.** 184 f. 2010. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-graduação em Análise Ambiental, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2007, 4. Jg., Nr. 2, S. 439-473.

PORTAL ACTION. **Distribuição de Weibull.** Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/confiabilidade/412-distribuicao-de-weibull>>. Acesso em: 23 de mai. 2016.

PORTAL BRASIL. **Brasil terá 218 usinas eólicas financiadas pelo PAC até 2017.** Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2015/03/brasil-tera-218-usinas-eolicas-financiadas-pelo-pac-ate-2017>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

RAMACHANDRA, T. V., & SHRUTHI, B. V. (2005). Wind energy potential mapping in Karnataka, India, using GIS. **Energy Conversion and Management**, 46(9), 1561-1578.

REN21. **Renewables 2015: Global Status Report.** França: REN21, 2015.

ROCHA, P. A. C. et al. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. *Applied Energy*, 2012, 89. Jg., Nr. 1, S. 395-400.

SAIDUR, R., RAHIM, N. A., ISLAM, M. R., & SOLANGI, K. H. (2011). Environmental impact of wind energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15(5), 2423-2430.

SCHNEIDER, A.; FRIEDL, M. A.; POTERE, D. A new map of global urban extent from MODIS data. **Environ. Res. Lett.**, vol. 4, pp. 1–11, 2009.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEORREFERENCIADAS DO SETOR ELÉTRICO - SIGEL. (2016). Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>>. Acesso em: 14 mai 2016.

SOLOMON, Susan (Ed.). **Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC**. Cambridge University Press, 2007.

SUISSE ÉOLE. **Weibullverteilung**. 2015. Disponível em: < <http://wind-data.ch/tools/weibull.php?lng=enChromeHTML\Shell\Open\Command>>. Acesso em: 22 agosto 2015.

THE EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION – EWEA. **Wind in power: 2014 European statistics**. 2015. Disponível em: < http://www.apren.pt/fotos/editor2/ewea_annual_statistics_2014.pdf>. Acesso em: 15 out. 2015.

TREMEAC, B.; MEUNIER, F. Life cycle analysis of 4.5 MW and 250W wind turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 8, p. 2104-2110, 2009.

Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho. São Paulo, FAPESP InterAcademy Council. Academia Brasileira de Ciências, 2010. p.5-6.

VAN HAAREN, R.; FTHENAKIS, V.; Gis-bases wind farm site selection using spatial multicriteria analysis (SMCA): Evaluating the case for New York State. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 3332-3340, 2011.

VICARI, M. B. **Uso de SIG e Análise Multicritério para Levantamento do Potencial de Implantação de Usinas Eólica e Solar no Rio Grande do Sul**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul. 2012.

WANG, G., QIN, L., LI, G., & CHEN, L. (2009). Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: a case study in Beijing, China. **Journal of environmental management**, 90(8), 2414-2421.

WORLD COMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our Common Future. (Relatório Brundland)** Oxford: Oxford University Press. 1987.

YING, X. et al. (2007). Combining AHP with GIS in synthetic evaluation of eco-environment quality—a case study of Hunan Province, China. **Ecological Modelling**, 209(2), 97-109