

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

**PARQUES EÓLICOS OFFSHORE NO LITORAL DO
RIO GRANDE DO SUL**

por

Paula Silva Gonçalves

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem
Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG,
como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre.
Área de concentração: Modelagem Computacional.

Rio Grande, Dezembro, 2021

Paula Silva Gonçalves

“PARQUES EÓLICOS OFFSHORE NO LITORAL DO RIO GRANDE DO SUL”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de concentração: Modelagem Computacional.

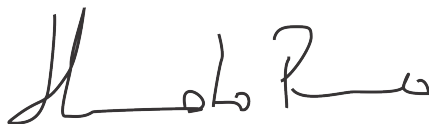
Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
 Nisia Krusche
Data: 03/12/2021 17:57:41-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profª. Dra. Nisia Krusche (Orientadora – FURG)



Prof. Dr. Humberto Pinheiro (Coorientador – UFSM)

Documento assinado digitalmente
 MICHELLE SIMOES REBOITA
Data: 06/12/2021 11:40:37-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profª. Dra. Michelle Simões Reboita (UNIFEI)

Documento assinado digitalmente
 Barbara Denicol do Amaral Rodriguez
Data: 07/12/2021 12:58:44-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profª. Dra. Bárbara Denicol do Amaral Rodriguez (FURG)

Ficha Catalográfica

G635p Gonçalves, Paula Silva.
Parques Eólicos *Offshore* no litoral do Rio Grande do Sul / Paula
Silva Gonçalves. – 2021.
57 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande –
FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional,
Rio Grande/RS, 2021.
Orientadora: Dra. Nisia Krusche.
Coorientador: Dr. Humberto Pinheiro.

1. Energia Eólico 2. Parque Eólico Offshore 3. Direção do Vento
4. Locais Offshore I. Krusche, Nisia II. Pinheiro, Humberto III. Título.

CDU 620.91

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

Dedico esta dissertação à memória dos meus avôs Dirson e Miguel,
À minha mãe, pelo exemplo de persistência e dedicação em tudo que faz.
E uma dedicação especial ao Eric, meu companheiro de vida, que contribuiu
decisivamente para que esta dissertação pudesse ser concluída,
com muito apoio e sugestões sempre pertinentes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída de Energia Elétrica (INCT-GD) e aos órgãos financiadores (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo no.23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551000051 7-1), pelo incentivo financeiro que permitiu-me a realização de uma formação acadêmica de qualidade.

Agradeço à minha orientadora, Nisia Krusche, e meu coorientador, Humberto Pinheiro, por todos os conhecimentos compartilhados ao longo desse tempo. Aos integrantes do laboratório de Física Ambiental, em especial à Camila pelo suporte e resiliência em diversos momentos.

Agradeço à banca pela disponibilidade e considerações realizadas, para que esta pesquisa fosse concluída com êxito. Também gostaria de agradecer à Flávia, da marinha, pelas informações sobre as rotas de navegação e dicas de softwares utilizados para controlar o tráfego dos navios em tempo real, que foram extremamente relevantes para a realização desta pesquisa.

Agradeço à todos que fizeram parte dessa jornada e aos amigos que tive a oportunidade de conhecer no Rio Grande do Sul. Meu agradecimento especial à família que formamos em Rio Grande (Eric, Natália, Yndhara, Alejandra, Marcelo e George), por terem compartilhado cada etapa desse processo e por tornarem essa experiência tão única e cheia de boas recordações.

RESUMO

A redução dos recursos energéticos tradicionais, bem como o aumento da demanda por energia para atender à melhoria da qualidade de vida em países em desenvolvimento como o Brasil, apontam para o uso de fontes alternativas de energia, como os recursos eólicos. O Brasil tornou-se um dos países líderes na geração de energia eólica *onshore* mundial, no entanto os estudos do potencial *offshore* brasileiro e projetos de instalação ainda estão em seus estágios iniciais. Esta pesquisa busca avaliar o potencial eólico no litoral do Rio Grande do Sul, considerando a batimetria da costa, rotas de navegação, linhas de transmissão e, sobretudo, a intensidade da velocidade do vento à 100 m de altura. Utilizando um conjunto de dados de reanálise e dados de saída de um modelo regional, realizou-se análises estatísticas e foi aplicado um método multivariado para verificar e classificar padrões de intensidade da velocidade do vento. Os resultados mostraram que magnitude da variabilidade do vento pode influenciar em mudanças nos padrões observados, no entanto não interfere no elevado potencial eólico que a área de estudo possui. As direções nordeste, leste e sudeste têm maiores taxas de ocorrência de vento na região. As velocidades médias mais elevadas ocorrem nos meses da primavera e as menores no outono. O modelo regional refinou os resultados obtidos da reanálise, possibilitando avaliar cenários futuros. Concluiu-se que a região próxima ao porto da cidade de Rio Grande atende aos requisitos analisados e nela existe a possibilidade de instalar um parque eólico *offshore* entre as profundidades de 20 m e 50 m com a fundação por tripé, que seria a mais adequada para esse local.

Palavras-chaves: Energia eólica, parque eólico *offshore*, direção do vento, locais *offshore*.

ABSTRACT

The reduction of traditional energy resources, as well as the increase in energy demand to meet the improvement of the quality of life in developing countries like Brazil, point to the use of alternative energy sources, such as wind resources. Brazil has become one of the leading countries in wind power generation onshore worldwide, however studies of the potential offshore in Brazil and installation projects are still in their initial stages. This research seeks to evaluate the wind power potential on the coast of Rio Grande do Sul, considering the bathymetry of the coast, navigation routes, transmission lines and, above all, the intensity of the wind speed at a height of 100 m. Using a reanalysis dataset and output data from a regional model, statistical analyzes were performed and a correlation method was applied to verify and classify patterns of wind speed intensity. The results show that the magnitude of wind variability can deviate in changes in the observed patterns, however, does not interfere in the high wind potential that a study area has. The directions northeast, east and southeast have higher wind occurrence rates in the region. The highest averages occur in the spring months and the smallest in the autumn. The regional model refined the results obtained from the reanalysis, enabling evaluate future scenarios. It was concluded that close to the port of the city of Rio Grande meets the necessary requirements, where there is the possibility of installing a wind farm offshore between depths of 20 m and 50 m with a tripod foundation, which would be the most suitable for that location.

Keywords: Wind energy, wind farm offshore, wind direction, locations offshore.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	7
2	REFERENCIAL TEÓRICO	10
	2.1 Parques eólicos	11
	2.2 Avaliação de adequação do local	11
	2.3 Modelagem numérica	13
	2.4 Batimetria	14
	2.5 Sistemas de transmissão	14
3	METODOLOGIA	16
	3.1 Área de estudo	17
	3.2 Dados meteorológicos	18
	3.2.1 Reanálise	18
	3.2.2 Modelo Regional	19
	3.3 Análise estatística	19
	3.4 Implementação do método de Lund	20
	3.5 Dados batimétricos	21
	3.6 Trajetória dos navios	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
	4.1 Clima Presente	23
	4.2 Cenários futuros	28
	4.3 Implementação do método de Lund	34
	4.3.1 Modo S	34
	4.3.2 Modo T	40
	4.4 Análise da batimetria	41
	4.5 Sistema de transmissão e fundação	42
	4.6 Rota de navegação	44
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	47
	APÊNDICES	52

INTRODUÇÃO

As primeiras turbinas eólicas em terra (*onshore*) já haviam sido desenvolvidas no início do século XX na Dinamarca e nos EUA. A tecnologia foi aprimorada passo a passo desde o início dos anos 1970. No final da década de 1990, a energia eólica já havia se tornado um dos mais importantes recursos de energia sustentável e o uso da sua tecnologia está se espalhando rapidamente. Em 1991, a primeira turbina eólica no mar (*offshore*) foi instalada na Dinamarca, a 250 m da costa. Desde então, muitas outras turbinas eólicas *offshore* foram instaladas ao redor do mundo.

Investir em energias renováveis no sistema de geração de eletricidade ocorre devido à necessidade de substituir os combustíveis fósseis para combater a mudança climática em escala global e também para atenuar as preocupações ambientais em escala regional ou local. Atualmente, a Dinamarca possui turbinas eólicas em praticamente todo o país, com mais de 5 mil turbinas *onshore* instaladas (Rohrig et al. 2019).

Desafios sobre a escassez de terra, potencial eólico consistentemente mais forte e casos de oposição pública de parques eólicos em *onshore*, estão fazendo com que os parques eólicos *offshore* sejam ainda mais planejados. Com isso, a geração, transmissão e integração de energia eólica *offshore* em todo o mundo tornam-se cada vez mais altas e oferecem desafios técnicos e econômicos para futuros profissionais.

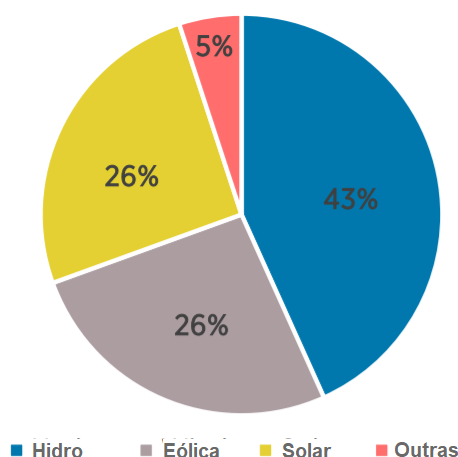


Figura 1.1: Capacidade de geração renovável por fonte de energia. Fonte: Adaptado de IRENA (2021).

Em relatório publicado no início de 2021, a Agência Internacional de Energia Renovável (*International Renewable Energy Agency*, IRENA) apresentou a capacidade de geração renovável por fonte de energia (Fig. 1.1). Os resultados mostram que no final de 2020, a capacidade global de geração renovável era de 2799 GW. A hidreletricidade representou a maior parcela

do total global, com capacidade de 1211 GW. As energias eólica e solar representaram partes iguais das restantes, com capacidades de 733 GW e 714 GW, respectivamente. Outras energias renováveis incluem 127 GW de bioenergia e 14 GW de geotérmica, além de 500 MW de energia marinha (IRENA, 2021).

A Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2021) afirma que a expansão eólica quase dobrou em 2020 (+111 GW) em comparação com 2019 (+58 GW). A China adicionou 72,4 GW de nova capacidade eólica, seguida pelos Estados Unidos que adicionou +14,2 GW. Dez outros países aumentaram sua capacidade eólica em mais de 1 GW em 2020.

A energia eólica está no aumento da segurança do fornecimento de energia em nosso sistema, porque é um combustível que não precisa ser importado de regiões politicamente instáveis do mundo. Seu custo é competitivo em relação à geração tradicional de energia e fornece emprego local e desenvolvimento econômico regional. Pode ser instalado relativamente rápido em comparação com as usinas de energia convencionais.

Há algumas questões a serem consideradas ao comparar a energia eólica *onshore* à energia eólica *offshore*. Os parques eólicos *onshore* causam impactos visuais, ruído e sombreamento em sua proximidade, podendo gerar resistência pública. Os parques eólicos *offshore* apresentam maiores velocidades do vento sobre a água e podem gerar até 50% mais eletricidade do que os parques eólicos *onshore* de mesma capacidade.

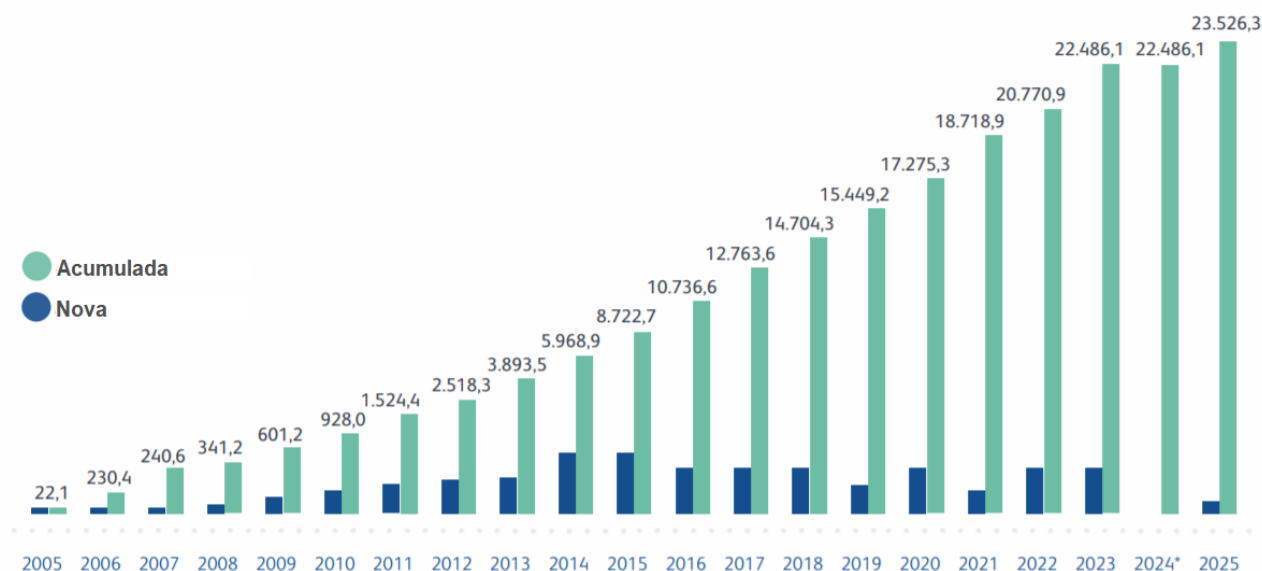


Figura 1.2: Evolução da capacidade instalada no Brasil (em MW). Fonte: Abeeólica (2019).

Em 2020, o Brasil subiu uma posição no *Ranking* Mundial do GWEC (*Global Wind Energy Council*) chegando ao sétimo lugar na geração de energia eólica global, 4º em expansão de energia (2,7 GW) e 1º em fator de capacidade (38%), onde o fator de capacidade é a potência média dividida pela capacidade máxima de potência. Atualmente, existem 695 Parques eólicos instalados no Brasil, com capacidade instalada de 20 GW e mais de 8300 turbinas eólicas. A

região Sul do Brasil possui 95 parques eólicos operacionais, dos quais 80 estão localizados no estado do Rio Grande do Sul (1,83 GW de potência instalada) (ABEEÓLICA, 2020).

A Figura 1.2 apresenta a evolução da capacidade instalada no Brasil, que se mostra em crescimento. Sua projeção até o ano de 2025 aponta que há um decréscimo na capacidade instalada nova, isso ocorre pois esses dados estão relacionados a contratos já realizados por meio de leilões e, conforme novos contratos forem efetivados, os dados serão acrescentados ao longo dos próximos anos. O Brasil tornou-se um dos países líderes na geração de energia eólica *onshore*, no entanto o potencial brasileiro *offshore* ainda está em seus estágios iniciais, com nenhum parque em operação ou sendo implementado (Azevedo et al. 2020).

Neste contexto, buscou-se determinar regiões com maior potencial eólico para construção de parques *offshore* utilizando dados de reanálise e de um modelo regional. No que compete aos objetivos específicos, procurou-se analisar climatologicamente os campos de ventos no Rio Grande do Sul; definir sistemas de transmissão mais adequados e analisar características do local, como rotas dos navios e batimetria da costa.

Esta pesquisa é composta por cinco capítulos. Inicia-se com introdução ao tema, justificativa e objetivos (Capítulo 1). Fez-se o referencial teórico e a metodologia (Capítulos 2 e 3), seguidos por resultados e discussões (Capítulo 4), finalizando com a conclusão (Capítulo 5).

REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados alguns assuntos abordados nesta pesquisa, como o método de Lund, batimetria da costa, modelagem numérica, entre outros.

2.1 Parques eólicos

Um parque eólico é um local designado para gerar energia eólica. Consiste em um conjunto de aerogeradores interligados eletricamente que variam em tamanho de 600 kW a 5 MW, dispostas ao longo do território para utilizar plenamente os recursos eólicos do local.

Em velocidades de vento muito baixas, o torque exercido pelo vento nas pás da turbina é insuficiente para fazê-las girar. No entanto, à medida que a velocidade aumenta, a turbina eólica começará a girar e gerar energia elétrica. As turbinas começam a produzir energia com velocidades entre 3 e 4 m/s, chamada de *cut-in*. Após este ponto, a potência aumenta com a velocidade do vento ao cubo até que a turbina atinja a velocidade nominal, que é quando a capacidade máxima é atingida.

A turbina mantém a produção constante para velocidades do vento acima da velocidade nominal, mas desliga se o *cut-out* for atingido para evitar danos estruturais, em cerca de 25 m/s. A potência média de uma turbina, P_T (Watts), pode ser calculada para cada ponto de uma grade numérica usando a velocidade do vento, U_i , e as curvas de potência, $P_i = f(U_i)$:

$$P_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(U_i). \quad (2.1)$$

Uma vez estimada a energia gerada em cada ponto da rede, o recurso eólico pode ser integrado espacialmente para regiões geográficas específicas:

$$P_R = \sum_{j=1}^M P_T D A_j, \quad (2.2)$$

Onde j identifica espacialmente o ponto de grade considerado e M representa o número total de pontos da área continental ou oceânica selecionada. D refere-se à densidade da turbina por km^2 . Leva-se em consideração que cada turbina ocupa uma área de superfície de $7 d \times 10 d$, onde d é o diâmetro das turbinas (Manwell et al., 2009).

2.2 Avaliação de adequação do local

A seleção do local para a instalação de um parque eólico *offshore* corresponde a uma questão multidimensional de tomada de decisão. Embora diversas aplicações em várias escalas de planejamento espacial possam ser encontradas na literatura (Vagiona e Kamilakis, 2012; Stefanakou e Nikitakos, 2016; Kim, Park e Maeng, 2016; Kim, Jang e Kim, 2018), estudos na costa do

Brasil ainda são limitados.

O desenvolvimento bem-sucedido de energia eólica *offshore* depende, em certa medida, de uma previsão precisa dos recursos eólicos. No entanto, a instalação e operação de um mastro meteorológico é caro, portanto, os locais em potencial devem ser cuidadosamente avaliados.

Livi et al. (2021) apresentaram uma abordagem para determinar a viabilidade econômica de um empreendimento eólico *offshore* desenvolvido em território brasileiro. Ferreira e Chaves (2021) avaliaram a região oceânica do estado do Rio de Janeiro para a implementação da turbina eólica de eixo horizontal. Lima et al. (2020) apresentaram uma metodologia para a avaliação da geração eólica *offshore* em quatro localidades do litoral do Ceará utilizando um modelo em microescala. Albuquerque et al. (2020) avaliaram a viabilidade da instalação de fazendas de eólicas nas localidades de plataformas que serão futuramente descomissionadas na Bacia de Campos, com o intuito de reduzir os impactos ambientais negativos da região.

Independente de projetos *onshore* ou *offshore*, deve-se também estar ciente dos impactos ambientais causados devido à construção desses parques (Azevedo et al. 2020). A distância dos parques eólicos até casas e estradas é outra questão muito importante a ser considerada em projetos *onshore*, pois é um fator que pode levar a conflitos sociais. Em projetos *offshore*, em contrapartida, não é necessário essa análise, porém algumas condições adicionais devem ser consideradas, como avaliar a batimetria da costa, tipos de fundação adequados, rotas de navegação, entre outros. A distância para conexão da rede *onshore* também é pertinente, pois irá influenciar nos custos operacionais e na acessibilidade de uma turbina em caso de falha, afetando o tempo de inatividade.

A avaliação e caracterização dos recursos de energia eólica disponíveis são fundamentais ao projetar parques eólicos. O potencial eólico de uma região pode ser analisado e previsto com mais precisão usando dados de direção e velocidade do vento de longo prazo (Fiorin et al., 2008). Parques eólicos *offshore* podem ser vantajosos quando comparados aos parques *onshore*, pois a superfície do mar apresenta rugosidade superficial muito baixa, o que reduz a turbulência e, portanto, torna-se um ambiente mais favorável ao uso de energia eólica. Além disso, o fator de capacidade para turbinas eólicas instaladas *offshore* é, geralmente, maior do que as instaladas *onshore*.

O conhecimento sobre as rotas de navegação do local podem reduzir os riscos de colisões de embarcações com as turbinas eólicas *offshore*. Vale ressaltar que essas colisões são ameaça tanto para o ser humano quanto para o meio ambiente, pois caso ocorra, partes da estrutura do navio seriam danificadas, acarretando também em vazamentos de óleo, entre outros danos (Copping et al., 2015). Caso a densidade de tráfego seja alta no local escolhido para a instalação de um parque eólico *offshore*, há a possibilidade de negociação com os órgãos que regulam a navegação, a fim de lidar com objetivos de segurança e usos concorrentes do oceano, visto que o mar é propriedade do país e da população, ele não é privado. (Douvere et al., 2007).

2.3 Modelagem numérica

Métodos de modelagem numérica são amplamente aplicados para avaliar recursos eólicos, pois usam abordagens estatísticas ou físicas para estimar a energia eólica prevista com base em previsões meteorológicas numéricas (Sørensen e Shen, 2002; Alves, 2006; Araújo et al., 2013; Rohrig et al., 2019).

Os modelos globais são comumente utilizados em aplicações de energia eólica, como para correção de longo prazo das condições do local ou como condição de contorno para modelos de mesoescala. Fornecem conjuntos de dados de medição que incluem dados de estações meteorológicas, dados de boias e navios, medições de aeronaves, sondagens e dados de sensoriamento remoto de medições baseados em satélite (Bosch, Staffell e Hawkes, 2019). Esse tipo de modelo climático possibilita uma análise do estado da atmosfera em todas as camadas da Terra e a avaliação da vida útil do projeto (Rohrig et al., 2018).

Apesar dessa resolução ser adequada para vários propósitos ela não é suficiente para fornecer informações climáticas locais que são de grande interesse para diversos setores (Nicolini et al., 2002). A resolução espacial dos modelos globais é limitada, pois requer operações complexas em seus cálculos e sua precisão pode não ser suficiente na análise de condições de vento em um local específico (Bosch, Staffell e Hawkes, 2018). Dessa forma, torna-se necessário aplicar um modelo numérico de área limitada.

A utilização dos modelos de área limitada para a previsão do clima é realizada desde os anos 90. Os conjuntos de dados de reanálise têm resolução insuficiente para avaliações rebuscadas dos recursos eólicos, isso ocorre devido à menor resolução espacial e à representação grosseira da orografia e da máscara terra-mar (Sempreviva, Barthelmie e Pryor, 2008). No entanto, eles também podem ser usados para fornecer condições de contorno para modelos de área limitada capazes de fornecer climatologias em alta resolução em escala regional. Os modelos de área limitada determinam padrões regionais de circulação e da camada limite atmosférica e podem ser aplicados sobre domínios de várias centenas de quilômetros quadrados cobertos por uma malha de grade com uma resolução de alguns quilômetros (Rohrig et al., 2019).

Os modelos regionais utilizam as técnicas semelhantes à utilizada nas previsões a curto prazo dos modelos atmosféricos de área limitada com condições iniciais e de fronteira fornecidas por reanálises. A dinâmica interna do modelo, aliada a maior resolução horizontal, pode produzir melhores previsões, principalmente, nas variáveis de temperatura próximo à superfície e precipitação (Giorgi e Bates, 1989).

Jong et al. (2019) estimaram o impacto das mudanças climáticas sobre os recursos de energia solar e eólica do Brasil, utilizando dados de três modelos climáticos globais em escala reduzida. Em seus resultados, discutiram as mudanças percentuais na radiação solar média e na velocidade do vento de 2030 e 2080 em diferentes cenários. Sivan et al. (2021) discutiram os perfis de ventos horizontais e verticais obtidos de reanálises globais atmosféricas e os ventos de saída do modelo regional de alta resolução. Seus resultados mostraram correlações mais altas em ventos zonais são encontradas durante as monções de verão, enquanto os ventos meridionais

mostram semelhança aparente durante o inverno.

2.4 Batimetria

A batimetria refere-se às informações sobre a profundidade do mar, ou seja, uma distância vertical ao mar ou em relação ao nível do mar escolhido. São representadas cartograficamente por curvas batimétricas. Suas informações são fundamentais para avaliação dos locais de instalação de um parque eólico *offshore*, pois possuem uma forte influência nas ondas e correntes, controlando a propagação e dissipação dos fluxos em condições normais e extremas (Bolaños et al., 2018).

Além disso, conhecer o fundo do oceano onde uma torre será implantada auxilia na decisão do tipo de fundação apropriado para a região (Azevedo et al., 2020). A localização de um parque eólico *offshore* é limitada pela profundidade da água, sendo as águas rasas recomendadas economicamente.

A batimetria fornece infraestrutura básica para trabalhos científicos, econômicos, educacionais, gerenciais e políticos (Sandwell, Gille e Smith, 2002). Diversos estudos utilizam dados batimétricos no planejamento e na avaliação da viabilidade de instalação de parques eólicos offshore, considerando esse fator na tomada de decisão de rotas de cabos, tubulações de comunicações e exploração de recursos (Dvorak, Archer e Jacobson, 2010; Lima et al., 2015; Bolaños et al., 2018; Pascual, García e García, 2021, entre outros)

2.5 Sistemas de transmissão

Um dos maiores desafios da instalação de um parque eólico é como integrar a quantidade variável de energia eólica que é gerada pelas turbinas com o sistema elétrico. Há também, os custos da transmissão *onshore*, que são influenciados pela distância do ponto de conexão à rede (Livi et al., 2021).

Segundo Beiter e Musial (2016), o sistema de transmissão *offshore* pode ser fragmentado em conexão de cabos submarinos, sistema de cabos submarinos de exportação e integração à rede. Eles ligam as turbinas entre si e à subestação *offshore*, a subestação *offshore* até a subestação *onshore* e ligam a subestação *onshore* ao ponto de conexão à rede, respectivamente.

Um dos maiores fatores que afetam os custos de instalação é a distância de um projeto em relação ao mar, que está diretamente relacionada à profundidade em que as turbinas eólicas são instaladas. É necessário transportar as turbinas eólicas nas fases de construção e operação e quanto maior a profundidade do local escolhido, maior será o custo das fundações (Fig. 2.1).

As instalações convencionais de energia eólica compreendem geralmente um rotor que é projetado para girar de acordo com a velocidade e direção do vento, onde o movimento rotativo é convertido em energia elétrica com a ajuda de um gerador elétrico (Stehly e Beiter, 2019). Esse processo pode ser descrito como o transporte de energia mecânica, gerada por meio das conversões das massas de ar por meio da rotação do eixo do rotor à um gerador síncrono (Gar-

vey et al., 2015). Rotores desse tipo possuem uma altura de aproximadamente 100 m (Archer e Ghaisas, 2015).

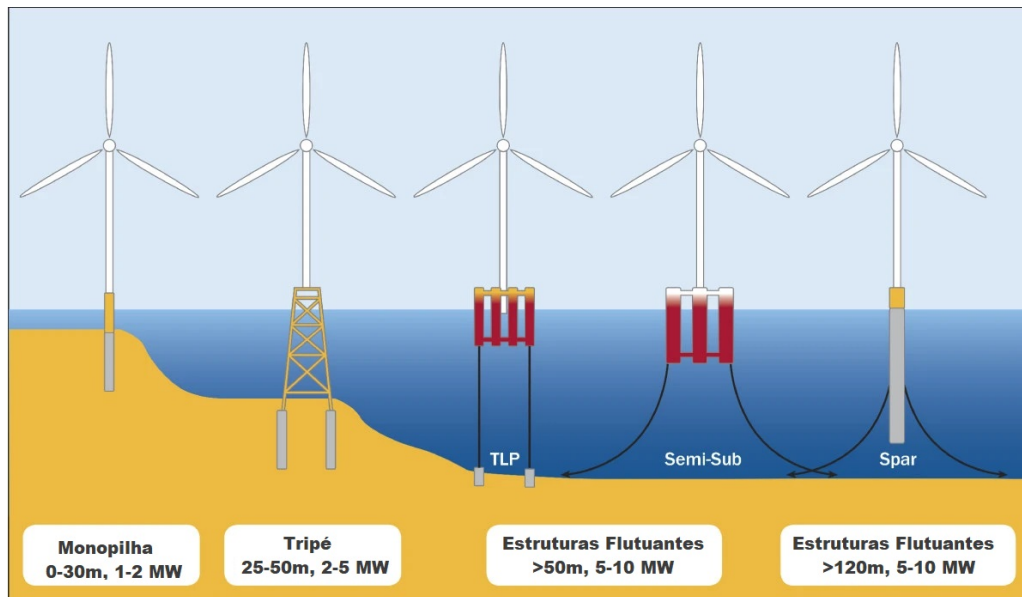


Figura 2.1: Tipos de fundações de turbinas eólicas *offshore*. As fundações de monopilhas e tripés são as mais usadas atualmente. As estruturas flutuantes usam três tipos principais de fundações, que são adaptados da indústria de petróleo e gás: Tension Leg Platform (TLP), semi-submersível (Semi-sub) e Spar Buoy (Spar). Fonte: Adaptado de Bailey et al. (2014).

Bresesti et al. (2007) mostram que o processo de integração à rede elétrica para um parque eólico *offshore* pode ser dividido no sistema de coleta *offshore* e no link de transmissão para a costa. O sistema de coleta *offshore* reúne a produção de energia das turbinas eólicas e a leva a um ponto central de coleta em uma subestação *offshore*, que então se liga à rede principal já existente (Fig. 2.2). Do ponto de coleta *offshore*, o link de transmissão para a costa pode ser Corrente Alternada de Alta Tensão (*High Voltage Alternating Current*, HVAC), Corrente Contínua de Alta Tensão (*High-voltage direct current*, HVDC) com conversores comutados pela rede (LCC) baseados em tiristores ou VSC-HVDC (Bresesti et al., 2007).

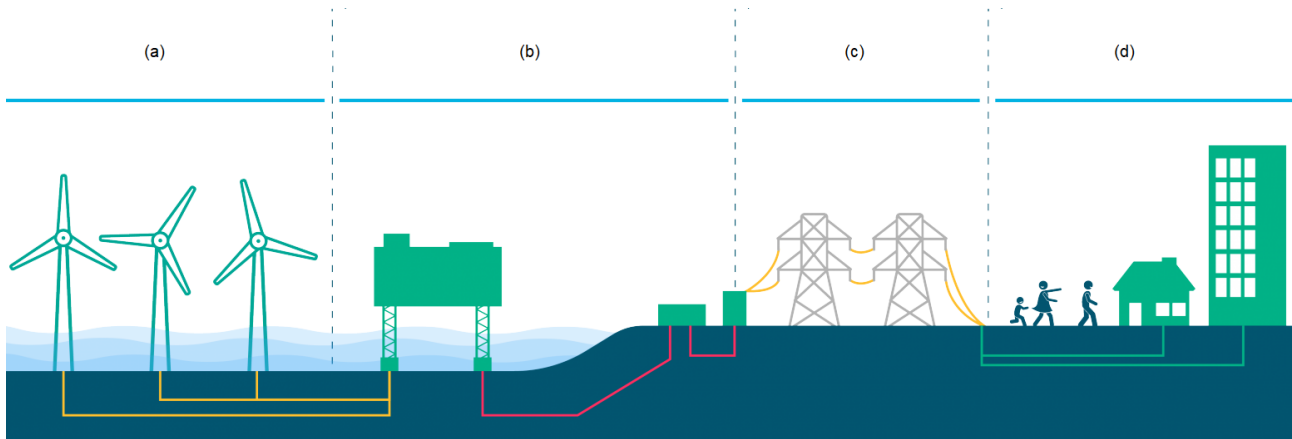


Figura 2.2: Processo de conversão do (a) parque eólico *offshore*, passando pela (b) subestação *offshore* até a (c) rede existentes, onde é distribuído para o (d) consumo de eletricidade por residências e empresas.

Chaithanya et al. (2018) afirmam que a maior parte dos parques eólicos *offshore* é integrada à transmissão de Corrente Alternada de Alta Tensão (High Voltage Alternating Current, HVAC) para a rede *onshore*. Os parques eólicos *offshore* são integrados à transmissão de Corrente Contínua de Alta Tensão (High-voltage direct current, HVDC) por longas distâncias (> 50 km) até a rede devido à corrente capacitiva do cabo em HVAC. O principal desafio da transmissão HVDC é a instalação, operação e manutenção da subestação HVDC do Conversor de tensão de origem no ambiente *offshore* (Bresesti et al., 2007).

METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa.

3.1 Área de estudo

O Estado do Rio Grande do Sul está localizado na região sul do Brasil, ocupa uma área total de 281.748 km² e sua costa é relativamente grande em comparação a outros estados do país, com extensão de mais de 600 km. A região de estudo está localizada entre as longitudes de 54°W e 49°W e latitudes 28°S e 34°S, que inclui a costa do RS e parte do continente (Fig. 3.1). Dominada por ondas abertas com micro-marés (Gruber et al., 2003), este litoral é submetido frequentemente às condições de tempestades causando a elevação do nível do mar. A costa apresenta um forte processo erosivo, principalmente durante os meses de inverno (Tozzi e Calliari, 1997).

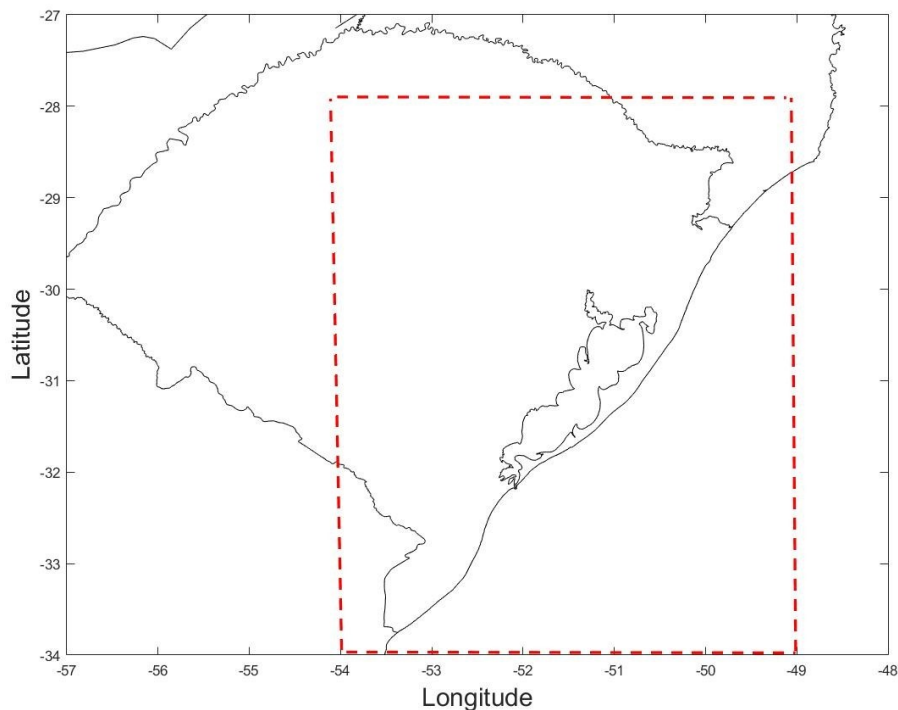


Figura 3.1: Representação gráfica do Estado do Rio Grande do Sul, onde a área de estudo está descrita pelas linhas tracejadas em vermelho.

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (SASA) exerce grande influência da circulação atmosférica sobre o Oceano Atlântico Sul e tem uma variabilidade sazonal, que está associado à variação sazonal da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) (Reboita et al., 2019). A localização geográfica deste sistema afeta as anomalias de velocidade do vento em todo o Brasil (Gilliland e Keim, 2018) e quaisquer mudanças na sua posição climatológica poderia afetar a

produção de energia eólica.

Com efeito, uma série de fenômenos atmosféricos exercem influência sobre a costa sul brasileira, como o deslocamento da massa de ar e a baixa pressão no nordeste da Argentina. Isto decorre do fato de ter uma localização que favorece a ocorrência de eventos extremos (Grimm, 2009; Nunes e Pereira, 2017; Lara et al., 2019).

De modo geral, na costa do Rio Grande do Sul, o clima é subtropical úmido com baixas temperaturas durante o inverno e a vegetação varia de manguezais a restinga (Villwock e Tomazelli, 2007). O solo da superfície é constituído principalmente por sedimentos arenosos. O relevo possui baixa declividade e contornos batimétricos seguindo a linha costeira (De Pinho et al., 2016). As ondas que atingem esta região podem ser classificadas em ondulação, vagas e ondas de tempestade, podendo ocorrer processos erosivos e transporte de sedimentos (Villwock e Tomazelli, 2007). O Estado possui pouca variabilidade mensal de precipitação e com as quatro estações são bem definidas.

3.2 Dados meteorológicos

Analizou-se estatisticamente as componentes zonal (u), meridional (v) e a intensidade do vento a 100 m de altura para 2 conjuntos de dados, ERA5 e RegCM. A altura de 100 m foi escolhida por ser de interesse para a instalação de aerogeradores. O período estudado foi de 1981-2015, utilizou-se dados do modelo regional RegCM com médias mensais e dados de reanálise do ERA5 com médias mensais e 4 horários diários. Também foram analisados os cenários futuros RCP26 e RCP85 do RegCM no período de 2021-2055 para médias mensais.

A direção do vento é definida pela direção de sua origem e, para determinar a direção predominante na costa do Rio Grande do Sul, avaliou-se a variação sazonal no período de cada ensemble.

3.2.1 Reanálise

Os conjuntos de dados de reanálise são produzidos aplicando-se um modelo de ponta a conjuntos de dados que fornecem uma série temporal homogênea a longo prazo. Vários dados de reanálise têm sido desenvolvidos. O primeiro conjunto de dados utilizado é o Reanalysis v5 (ERA5), disponibilizado pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECWMF). O ERA5 é uma reanálise de observações meteorológicas de 1979 até 5 dias do tempo real com resolução horizontal significativamente melhorada, quando comparado com outras reanálises, de 30 km e 137 níveis na vertical, até 80 km de altura (Copernicus, 2019). Atualmente, o ERA5 disponibiliza também, um conjunto de dados preliminar de 1950 a 1978. A resolução temporal e espacial aprimorada permite também uma evolução detalhada dos sistemas meteorológicos.

Para esta pesquisa, foi realizada uma análise do clima presente (1981-2015) as componentes zonal (u ; oeste-leste) e meridional (v ; sul-norte) do vento à 100 m de altura foram utilizadas para analisar o perfil do vento na costa do Rio Grande do Sul. Utilizou-se dados de média mensal e

dados horários diários, sendo eles 0UTC, 06UTC, 12UTC e 18UTC, que correspondem às 21h do dia anterior, 3h, 9h e 15h do horário local.

3.2.2 Modelo Regional

Foi utilizado o Modelo Climático Regional (Climate Models, RegCM) versão 4, integrados pelo Projeto Cordex (Coordinated Regional Climate Downscaling Experimente). O RegCM4, é atualmente mantido pelo Centro Internacional de Física Teórica (*International Centre for Theoretical Physics*, ICTP). O RegCM é um modelo dinâmico, compressível, em diferenças finitas, hidrostático, ele possui um algoritmo para reduzir a difusão horizontal na presença de intensos gradientes de topografia (Giorgi et al., 1989). Todos os dados de saída do modelo regional foram disponibilizados gratuitamente pelo CORDEX, cujo objetivo é avançar e coordenar a ciência e a aplicação do modelo de clima regional por meio de parcerias globais.

Para entender como o clima pode mudar no futuro, utilizou-se o modelo sob as Vias de concentração representativa (*Representative Concentration Pathway*, RCP) RCP 2.6 e RCP 8.5, que descrevem os diferentes níveis de emissão dos gases que provocam o efeito estufa, representando os cenários otimista e pessimista, respectivamente. Na análise do clima presente, foi selecionado o mesmo período dos dados de reanálise, de 1981 a 2015. Para a análise dos cenários futuros, escolheu-se o período de 2021 a 2055.

3.3 Análise estatística

Para calcular a intensidade da velocidade do vento (V_0) para cada ponto da grade, foram usados u e v , conforme descrito na equação:

$$V_0 = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (3.1)$$

onde u é a componente zonal e v é a componente meridional do vento à 100 m de altura.

A velocidade média da intensidade do vento é obtida a partir da equação (3.2).

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_0, \quad (3.2)$$

onde n é o número de amostras durante um determinado intervalo de tempo.

Os valores de máximos também foram calculados e considerados para tais análises. Assim como a correlação, que terá seu cálculo descrito na próxima seção ao implementar o método de Lund.

A direção média da velocidade do vento foi determinada através de cálculos vetoriais aplicados às normais climatológicas provisórias das componentes zonal e meridional.

3.4 Implementação do método de Lund

Para investigar a relação entre os padrões de vento e locais na região de estudo, utilizou-se técnicas de classificação para a intensidade do vento, adotando a metodologia aplicada por Lund (1963) que consiste em uma análise multivariada baseada em correlações.

Lund (1963) analisou valores de pressão ao nível do mar de 22 estações do nordeste dos Estados Unidos, comparando correlações padrão a padrão e encontrando padrões-chave. Por fim, o autor classificou esses padrões de pressão ao nível do mar que reaparecem com mais frequência do que esperado. Existem alguns métodos semelhantes ao método de Lund na literatura, porém não apresentados com a mesma nomenclatura.

Malvadini et al. (2017) analisam a correlação espacial e temporal da geração de energia eólica em vários países da União Europeia para compreender o comportamento do perfil do vento pela Europa. Zhu et al. (2018) propõem um modelo para prever a velocidade do vento para vários locais simultaneamente, combinando técnicas de correlação espaço-temporal com inteligência artificial.

Richardson (2019) afirma que métodos baseados em correlação são capazes de produzir uma separação adequada entre os padrões climáticos resultantes, ele apresenta técnicas de correlação aplicados à padrões climáticos, identificam o campo com mais correlações, dado um limite, com os outros campos e remove, subsequentemente, esses campos do conjunto de dados. Este procedimento é repetido até que todos os dias sejam classificados.

Jardim et al. (2021) determinam a sazonalidade meteorológica com análise estatística multivariada, onde foram utilizadas técnicas de agrupamentos e análise de componentes principais, para identificar componentes mais afetados nos padrões climáticos. Utilizou-se, alinhado ao método de Lund, decomposições nos modos T e S (Fig. 3.2) na matriz de dados na análise de clima presente, de janeiro de 1981 à dezembro de 2015 e na análise de cenários futuros, de janeiro de 2021 à dezembro de 2055.

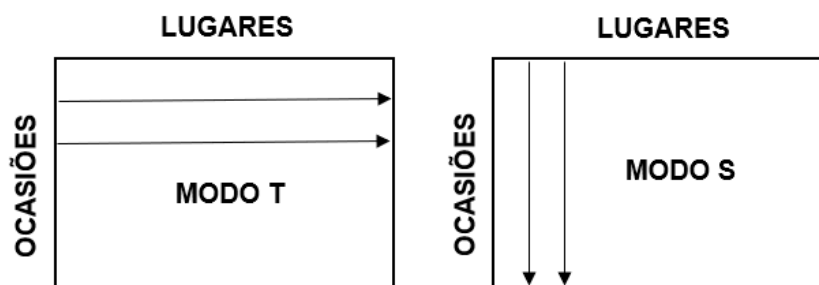


Figura 3.2: Decomposição em modo T (à esquerda), correlação entre os campos e Decomposição em modo S (à direita), correlação entre séries temporais.

Em geral, muitas aplicações em meteorologia envolvem estudos no tempo-espaço, fazendo-se necessário escolher se os dados serão expressos em modo T ou no modo S (Compagnucci e

Richman, 2008). A seleção do modo S trata as séries temporais (m vezes) em cada um dos n pontos de grade (ou estações) como variáveis na análise, ou seja, o domínio é a área geográfica. Por outro lado, a seleção em modo T trata o campo espacial, definido por todos os n pontos de grade (ou estações), em cada um dos m tempos como variáveis, isto é, o domínio é o tempo

A fórmula do coeficiente de correlação linear simples utilizada é descrita por:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}}, \quad (3.3)$$

O processo de classificação utilizando o método de Lund ocorreu em cinco etapas. Primeiro, a equação (3.3) foi aplicada para calcular todos os coeficientes de correlação (r) entre os locais, para o modo S, e entre os tempos para o modo T. A partir da segunda etapa, o processo foi o mesmo para ambas as decomposições. Nessa etapa, foram selecionados as colunas com coeficientes de correlação maiores ou iguais a 0.7, limiar definido a priori baseado na bibliografia, e verificada a coluna com maior quantidade desses valores. Posteriormente, removeu-se todas as linhas e colunas correspondentes à seleção da etapa anterior e denominou-a como classe A. A quarta etapa se resume à selecionar os valores restantes e voltar para a segunda etapa, denominando o próximo grupo como classe B, após remover todos os casos da classe A. Repetiu-se todo o processo acima até não restarem mais casos de coeficientes de correlação maiores ou iguais a 0.7.

3.5 Dados batimétricos

Utilizou-se os conjuntos de dados batimétricos em grade da Carta Batimétrica Geral dos Oceanos (*General Bathymetric Chart of the Oceans*, GEBCO). A grade GEBCO 2020 é um modelo global contínuo de topografia e batimetria global com resolução espacial de 15 segundos de arco, ele inclui conjuntos de dados de uma série de repositórios de dados nacionais e internacionais e iniciativas de mapeamento regional. Os dados são de domínio público e pode ser usada gratuitamente, selecionando apenas a área correspondente à região de estudo ou, caso necessário, são disponibilizados os dados de todo o globo.

A grade GEBCO é acompanhada por uma grade de identificador de tipo (*Type Identifier*, TID). Este conjunto de dados identifica o tipo de dados de origem nos quais as células de grade correspondentes na Grade GEBCO são baseadas. Os valores dos dados são registrados no centro do pixel, ou seja, referem-se a elevações, em metros, no centro das células da grade. Os arquivos são fornecidos no formato NetCDF 4 e armazenados como uma matriz bidimensional de valores inteiros de 2 bytes de elevação em metros, com valores negativos para profundidades batimétricas e valores positivos para alturas topográficas.

3.6 Trajetória dos navios

Considerando que as rotas de navegação devem ser avaliadas previamente, utilizou-se a versão gratuita do software *Marine Traffic*, que é uma ferramenta que disponibiliza dados de rotas marítimas de navios cargueiros e cruzeiros, onde é possível observar rotas do mundo inteiro. Esse software utiliza dados de um sistema de identificação de navios (AIS - *Automatic Identification System*), na qual é possível verificar a densidade de tráfego onde é mais intenso no mundo.

O *Marine Traffic* é recomendado por uma Organização não governamental que regulamenta normas e publicações internacionais, auxiliando a navegação de todo o globo, essa organização chama-se Associação Internacional de Autoridades do Farol (*International Association of Lighthouse Authorities*, IALA).

Na sequência serão descritos os resultados obtidos através da utilização dos dados e métodos descritos neste capítulo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as variações climatológicas da intensidade do vento, considerando seus valores médios e máximos para a região costeira. Serão realizadas também, análises das séries temporais e dos padrões mais frequentes de vento.

4.1 Clima Presente

Foram avaliadas as componentes zonais e componentes meridionais da velocidade do vento e a intensidade do vento a 100 m de altura, de janeiro de 1981 a dezembro de 2015. Dados horários diários e dados de médias mensais foram obtidos do Reanalysis v5 (ERA5). Para os dados horários, optou-se por analisar apenas os dados em quatro horários sinóticos, sendo eles 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC e 18 UTC.

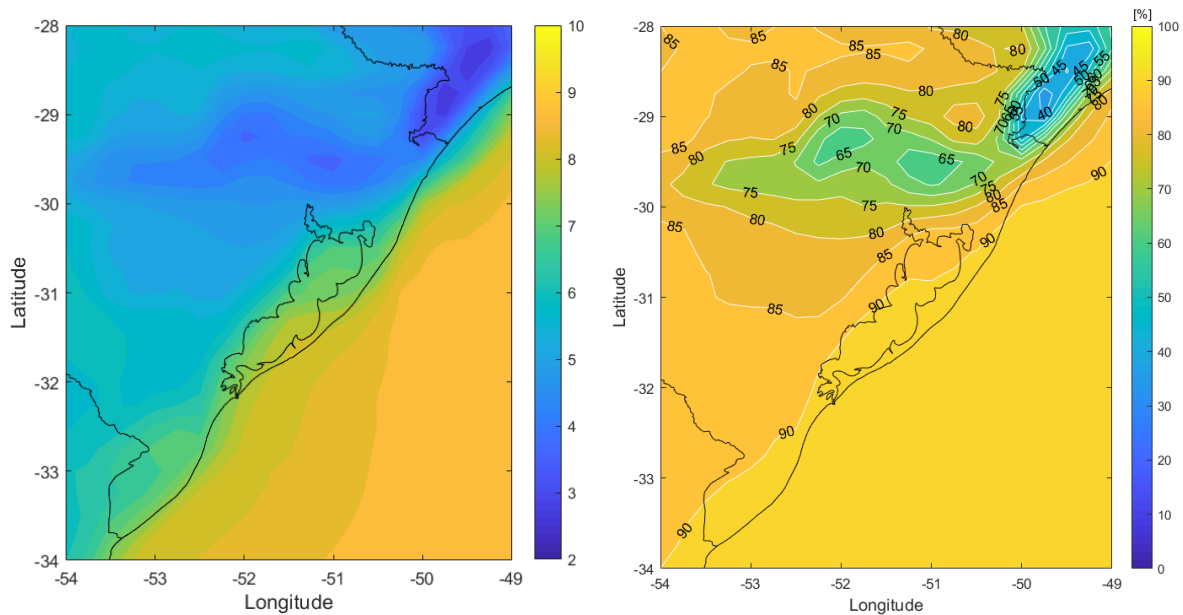


Figura 4.1: Dados horários diários do ERA5 no período de 1981-2015, referente à (a) média da intensidade do vento e (b) frequência de ocorrência considerando cut-in e cut-out para a velocidade do vento.

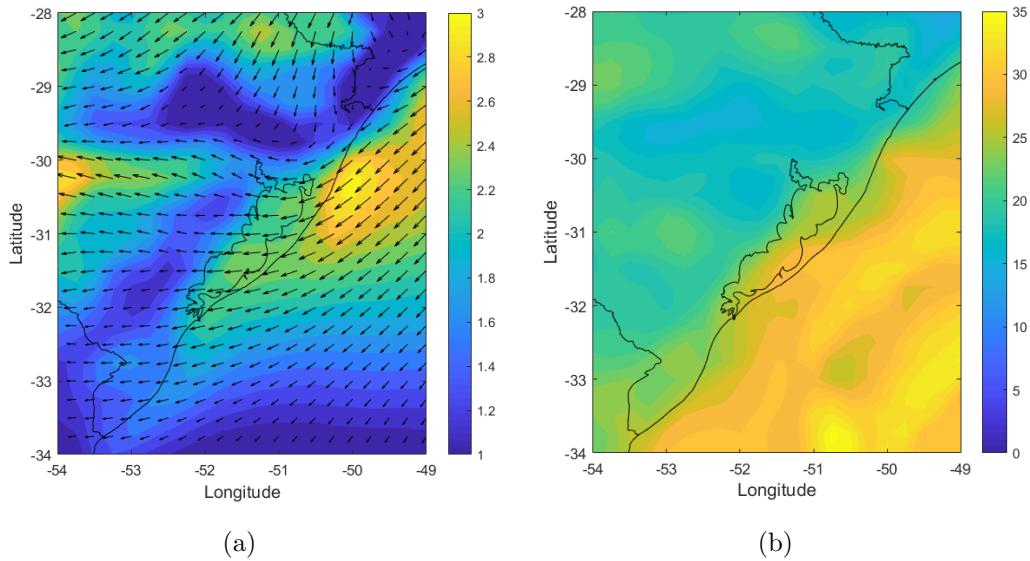


Figura 4.2: (a) Intensidade e direção do vento média e (b) máximos dos dados horários diários do ERA5 referente ao período de 1981-2015.

A média da intensidade do vento a 100 m de altura é apresentada na Figura 4.2 (a). O perfil de vento na Serra do Mar, localizada ao norte do Rio Grande do Sul, é influenciado pela sazonalidade da atmosfera, favorecendo a formação do sistema brisa vale-montanha descrito por Carneiro (2012). Outros estudos, como Gille et al. (2005), Oke (1987) e Stull (1988), discutem esses padrões de circulação, e indicam que os resultados obtidos nesta região são coerentes com variações médias menores.

A Figura 4.2(b) mostra os valores de máximos para os dados do ERA5, onde a intensidade do vento alcançou valores de até 35 m/s na costa e cerca de 30 m/s no continente, durante o período analisado. Nota-se máximos mais elevados na costa, conforme é descrito também por Li et al. (2020) em um estudo comparativo das características do vento *onshore* e *offshore* na região costeira do sudeste da China. Uma comparação semelhante também pode ser vista em Krishnamoorthy et al. (2020), onde são avaliadas as características eólicas de locais *onshore*, *offshore* e *nearshore* da Índia.

Foram selecionados os mesmos parâmetros para dados de médias mensais do ERA5 e do RegCM4. A Figura 4.4 mostra a intensidade do vento média a 100 m de altura para 35 anos, de 1981 a 2015.

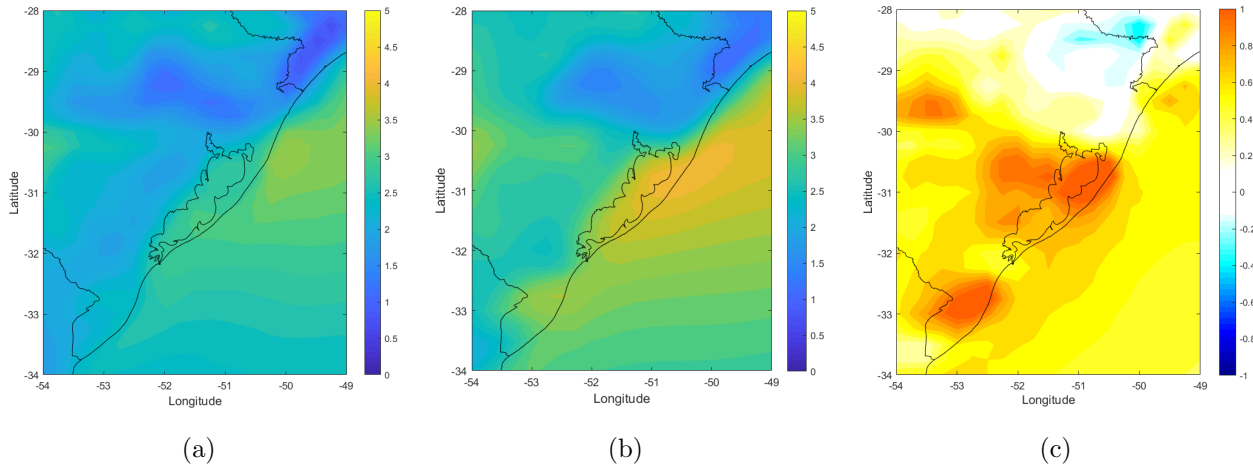


Figura 4.3: Médias da intensidade da velocidade do vento utilizando os dados do (a) ERA5, (b) do RegCM4 e a (c) diferença entre o RegCM4 e a reanálise ERA5 no período de 1981 à 2015.

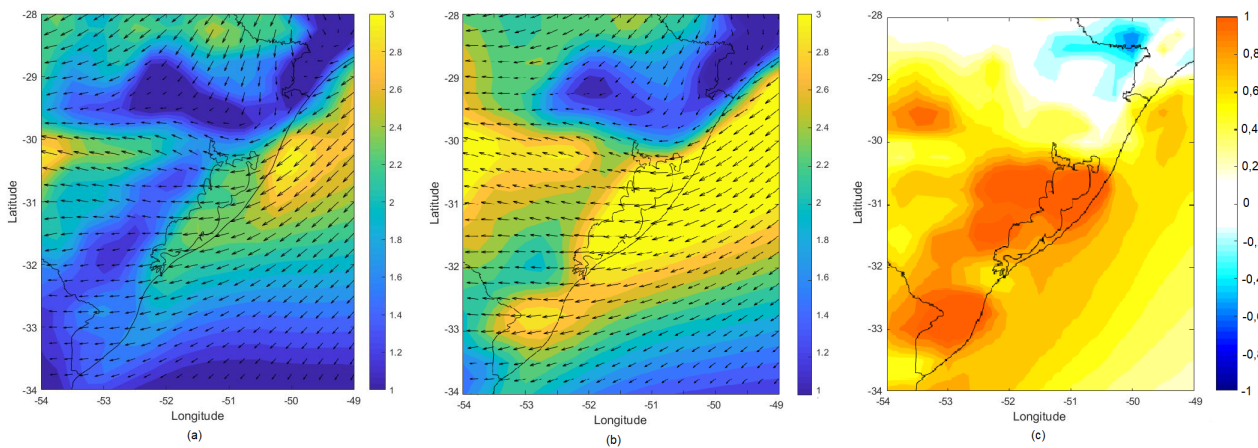


Figura 4.4: Intensidade média da velocidade do vento utilizando os dados do (a) ERA5, (b) RegCM e (c) a diferença entre o RegCM e ERA5, referente ao período de 1981 à 2015.

As médias das intensidades do vento obtidas pelos dados de reanálises do ERA5, Fig. 4.4(a), são menores do que as médias obtidas com o RegCM4, Fig. 4.4(b). O tratamento dos dados na reanálise ERA5 tende a suavizar suas informações por meio da interpolação e subestimar a intensidade do vento das regiões de transição de terrenos, como na região da costa. A diferença entre o modelo e a reanálise, Fig. 4.4 (c), também foi avaliada, mostrando que as maiores diferenças entre eles ocorrem na costa, próximo à Laguna dos Patos, e no centro-leste da região de estudo. Ambos os conjuntos representam bem o padrão espacial dos ventos, porém os dados RegCM4 indicam resultados mais detalhados em comparação com os dados do ERA5.

Uma análise sazonal dos campos de vento foi realizada, identificando os períodos com maiores variações ao longo do ano. Diversos estudos discutem a variabilidade sazonal do vento ao avaliar o potencial eólico, entre eles pode-se destacar Benazzouz et al. (2020), que estuda uma região de Marrocos e são utilizados dados de satélite. Aboobacker et al. (2021) além de

avaliar as tendências e a variabilidade sazonal também utilizaram dados extraídos do ERA5 em um período ainda mais longo que esta pesquisa, foram analisados 40 anos (1979-2018), divergindo em alguns pontos como a forma de abordar a direção do vento e a região de estudo, pois refere-se ao Catar.

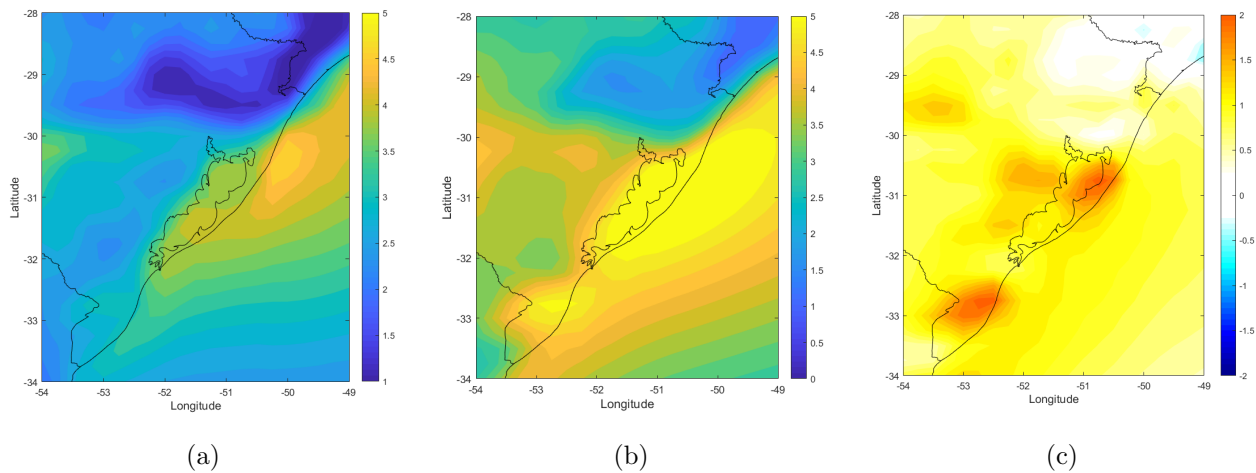


Figura 4.5: Análises sazonais das médias da intensidade do vento, referente aos meses de outubro, novembro e dezembro (primavera) utilizando os dados do (a) ERA5, (b) do RegCM4 e a (c) diferença entre o RegCM4 e a reanálise ERA5 no período de 1981 à 2015.

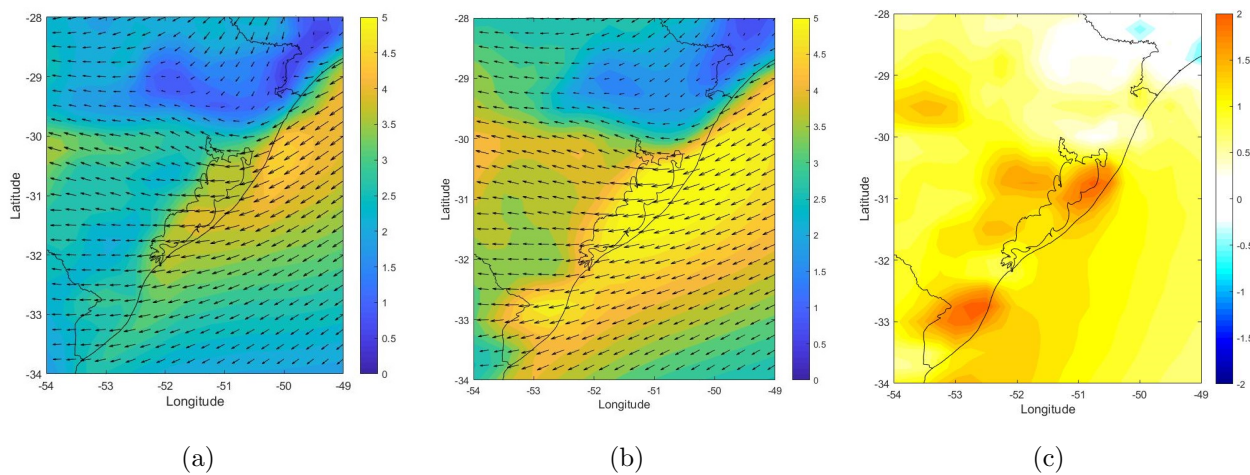


Figura 4.6: Análises sazonais da intensidade média da velocidade do vento, referente aos meses de outubro, novembro e dezembro (primavera) utilizando os dados do (a) ERA5, (b) do RegCM4 e a (c) diferença entre o RegCM4 e a reanálise ERA5 no período de 1981 à 2015.

A intensidade do vento *offshore* na costa do Rio Grande do Sul é mais alta durante a primavera (Fig. 4.6) o que contrasta com a observada no outono (Fig. 4.8). Isso se deve, principalmente, à transição do Anticiclone do Atlântico Sul para o norte no verão e para o sul no inverno.

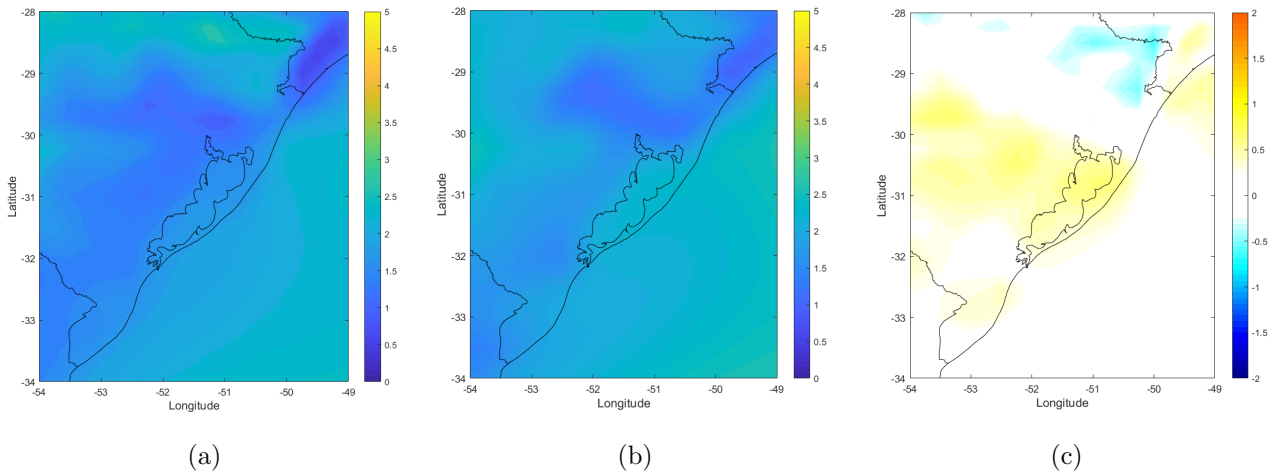


Figura 4.7: Análises sazonais das médias das intensidades do vento, referente aos meses de abril, maio e junho (outono) utilizando dados do (a) ERA5, (b) do RegCM4 e a (c) diferença entre o RegCM4 e a reanálise ERA5 No período de 1981 à 2015.

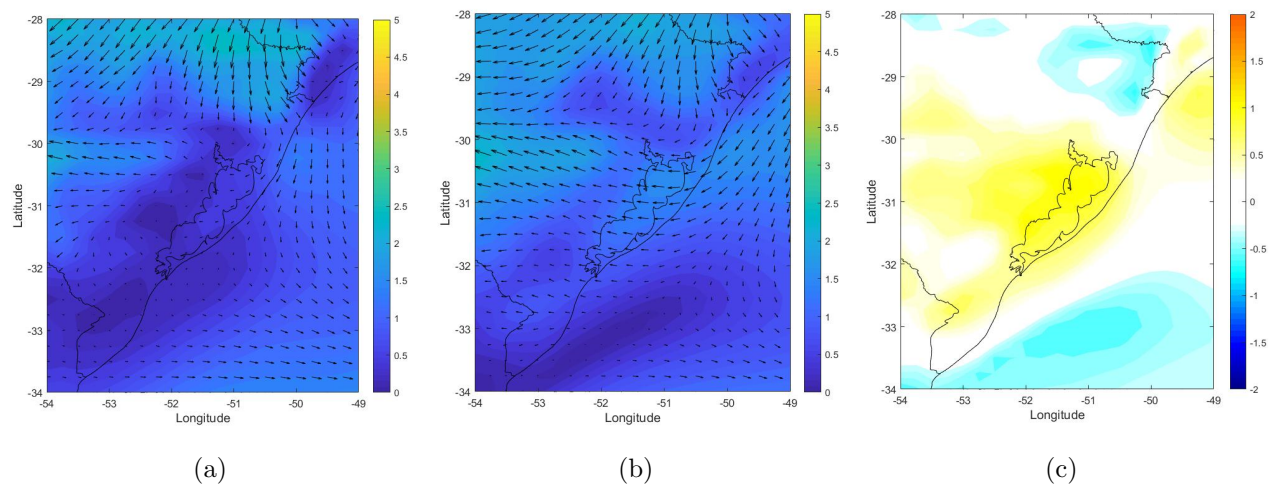


Figura 4.8: Análises sazonais das intensidades médias da velocidade do vento, referente aos meses de abril, maio e junho (outono) utilizando dados do (a) ERA5, (b) do RegCM4 e a (c) diferença entre o RegCM4 e a reanálise ERA5 no período de 1981 à 2015.

Identificou-se o vento proveniente da direção nordeste (NE) como sendo a predominante no perfil de ventos na costa. Esse padrão pode ser atribuído a variação de posição e intensidade do sistema de alta pressão subtropical do Atlântico Sul (Satyamurty et al., 1998). As direções leste (E) e sudeste (SE) também apresentaram altas taxas de ocorrência de vento, pois sistemas meteorológicos transitórios de larga escala e de escala sinótica, como as frentes frias e ciclones e anticiclones extratropicais também contribuem para a variação da direção do vento nestas latitudes.

4.2 Cenários futuros

Foram analisados dois cenários, RCP 2.6 e RCP 8.5, de emissão de gases de efeito estufa para dados de média mensal e análise sazonal do clima futuro, 2021-2055, proveniente do modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES. Tais resultados serão apresentados em comparação com aqueles do no período histórico de 1981 a 2015, definido anteriormente como clima presente.

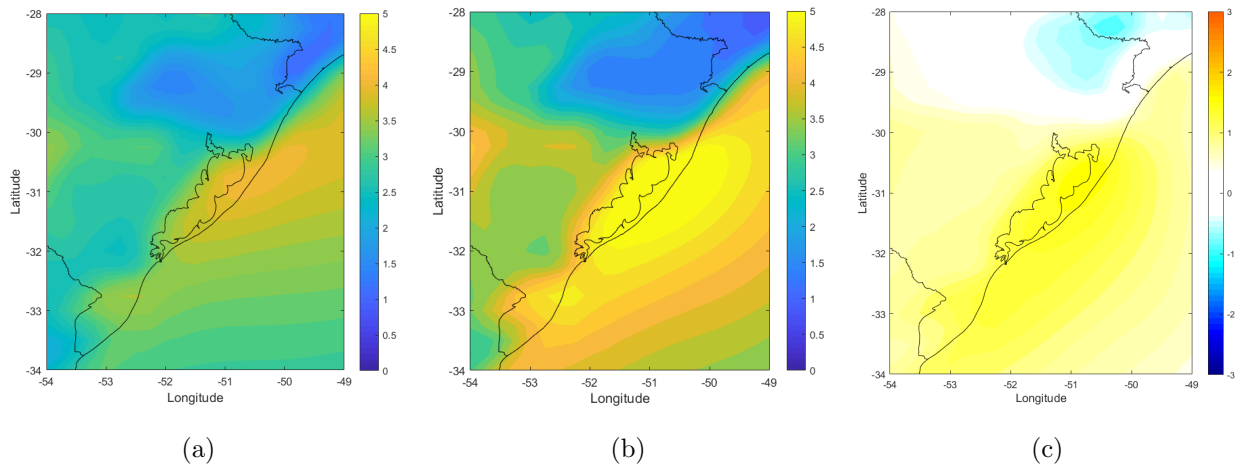


Figura 4.9: Média da intensidade do vento utilizando os dados do (a) RegCM no período de 1981 à 2015, (b) do RCP 2.6 no período de 2021 à 2055 e a (c) diferença entre o RCP 2.6 e do RegCM.

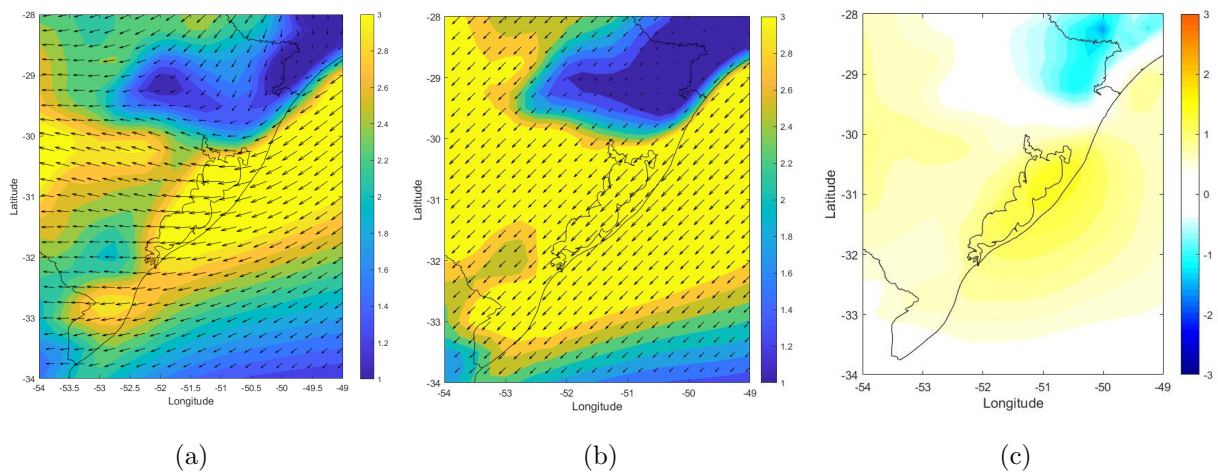


Figura 4.10: Intensidade média da velocidade do vento utilizando os dados do (a) RegCM no período de 1981 à 2015, (b) do RCP 2.6 no período de 2021 à 2055 e a (c) diferença entre o RCP 2.6 e do RegCM.

As Figuras 4.10 e 4.12 apresentam as alterações das médias das intensidades do vento em relação ao período de 1981 a 2015, projetadas pelo RCP 2.6 e RCP 8.5 para o período de 2021 a 2055.

A Figura 4.10 (a) apresenta o clima presente. Pode-se notar na Fig. 4.10 (b) algumas

mudanças na velocidade do vento ao considerar o cenário RCP 2.6 (otimista). Neste caso, há um aumento significativo na intensidade do vento no litoral (Fig. 4.10 (c)). Observou-se que na Serra do Mar o perfil de ventos permanece menos intenso do que no restante do Estado, mas como o intuito desta pesquisa é avaliar as condições *offshore*, este local foi considerado apenas na avaliação preliminar dos dados de reanálise.

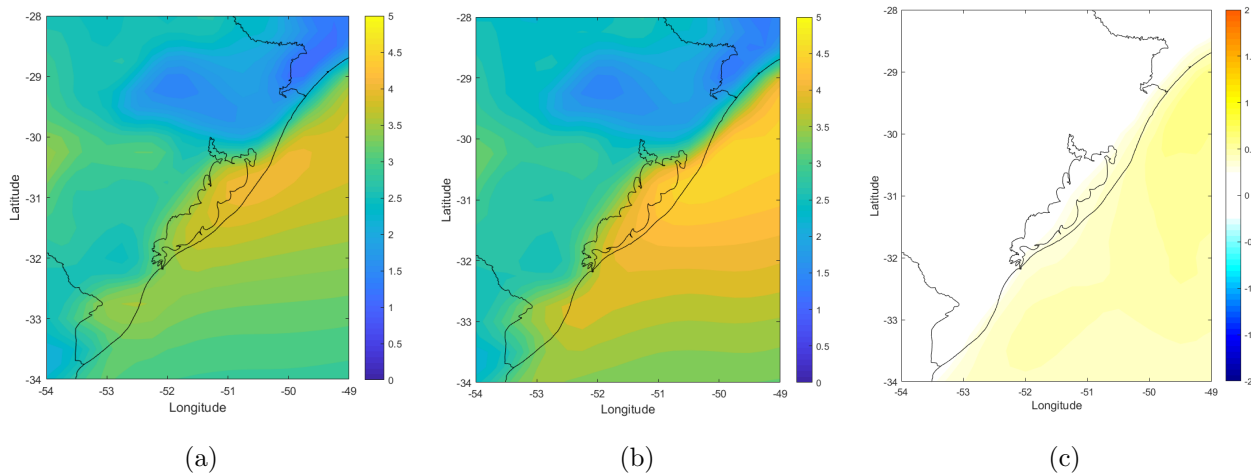


Figura 4.11: Média da intensidade do vento utilizando os dados do (a) RegCM no período de 1981 à 2015, (b) do RCP 8.5 no período de 2021 à 2055 e a (c) diferença entre o RCP 8.5 e do RegCM.

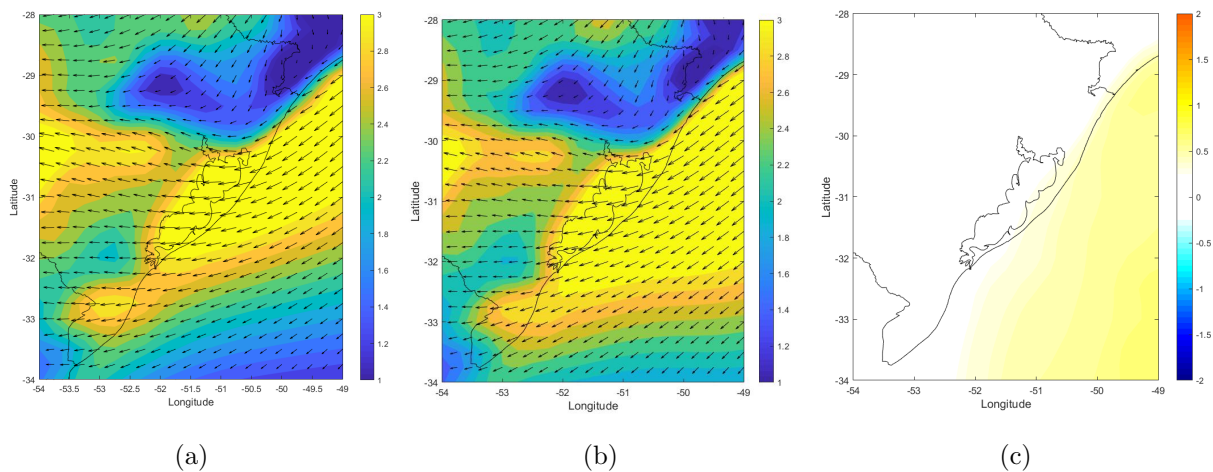


Figura 4.12: Intensidade média da velocidade do vento utilizando os dados do (a) RegCM no período de 1981 à 2015, (b) do RCP 8.5 no período de 2021 à 2055 e a (c) diferença entre o RCP 8.5 e do RegCM.

Ao considerar o RCP 8.5 (Fig. 4.12 (b)), entende-se que há um aumento da temperatura média anual do planeta em até $4,5^\circ$ (Anjos et al., 2018), isso significa maiores impactos climáticos e aumento do custo de vida. Pode-se notar que há uma diferença na média intensidade do vento do cenário RCP 8.5, em todo o período de estudo ao compará-lo com as análises de clima presente do RegCM4 (Fig. 4.12 (c)).

Investigou-se, também, a variabilidade sazonal para os cenários futuros, considerando os mesmos parâmetros, altura e período citados ao longo desta pesquisa.

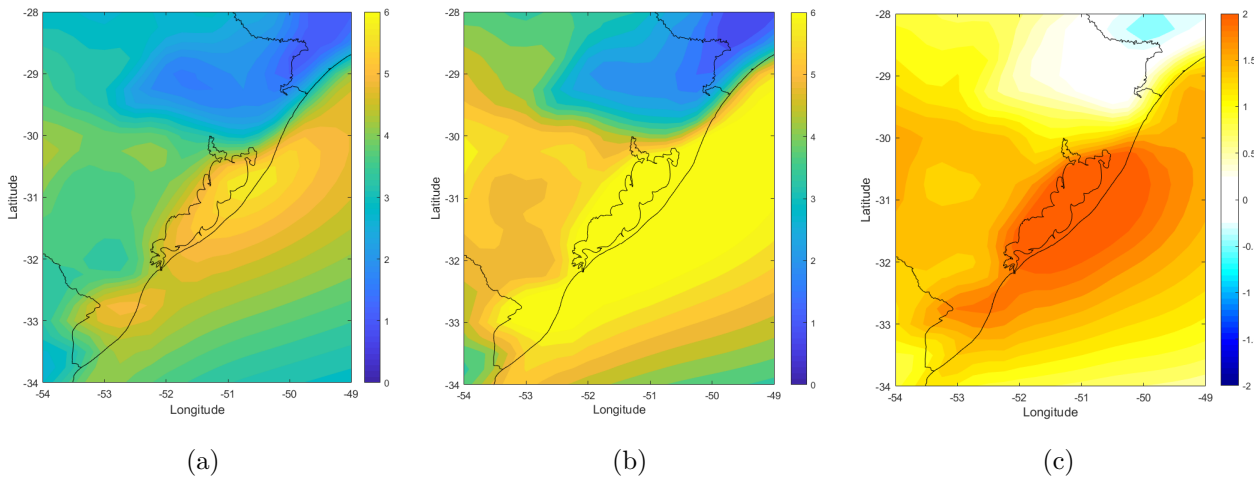


Figura 4.13: Análise sazonal da média da intensidade do vento, referente aos meses de outubro, novembro e dezembro (primavera) utilizando os dados do (a) RegCM4 no período de 1981 à 2015, (b) RCP 2.6 no período de 2021 a 2055 e a (c) diferença entre o RCP 2.6 e RegCM4 .

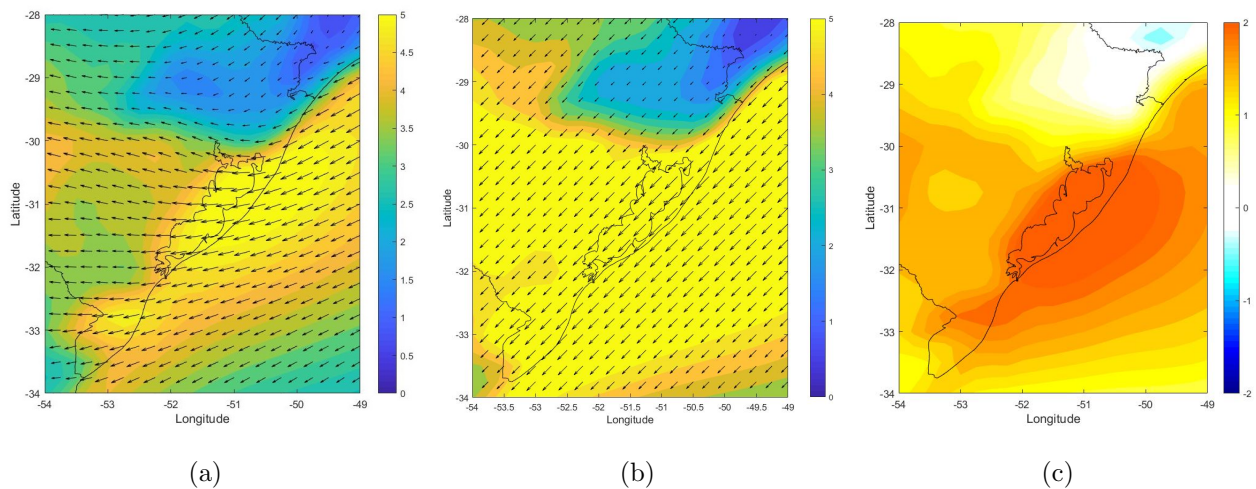


Figura 4.14: Média sazonal da intensidade da velocidade do vento, referente aos meses de outubro, novembro e dezembro (primavera) utilizando os dados do (a) RegCM4 no período de 1981 à 2015, (b) RCP 2.6 no período de 2021 a 2055 e a (c) diferença entre o RCP 2.6 e RegCM4 .

A Figura 4.14(b) mostra a intensidade do vento para o cenário RCP 2.6 durante a primavera. A diferença desse cenário para o RegCM4 (Fig. 4.14 (a)) pode ser visto na Figura 4.16 (c), onde pode-se notar o aumento da intensidade do vento em toda a costa e em grande parte do continente. Já a Figura 4.16 (c), no mesmo cenário, mostra a redução da intensidade do vento na serra e também no sul do Estado durante o outono.

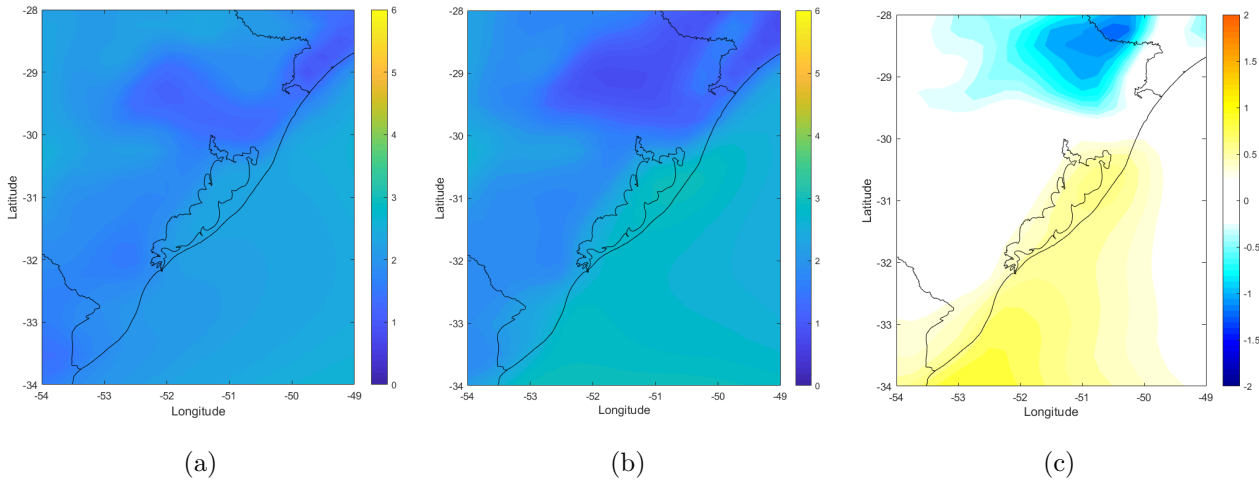


Figura 4.15: Análise sazonal da média da intensidade do vento, referente aos meses de abril, maio e junho (outono) utilizando os dados do (a) RegCM4 no período de 1981 à 2015, (b) RCP 2.6 no período de 2021 a 2055 e a (c) diferença entre o RCP 2.6 e RegCM4.

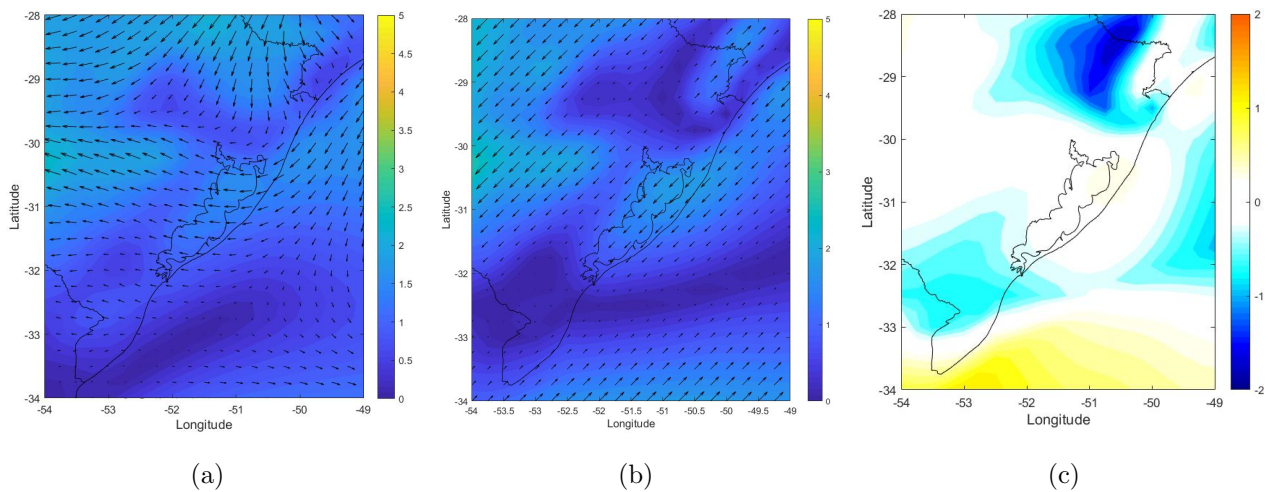


Figura 4.16: Média sazonal da intensidade da velocidade do vento, referente aos meses de abril, maio e junho (outono) utilizando os dados do (a) RegCM4 no período de 1981 à 2015, (b) RCP 2.6 no período de 2021 a 2055 e a (c) diferença entre o RCP 2.6 e RegCM4.

No cenário RCP 8.5, a Figura 4.18 (b) apresenta aumento na intensidade do vento no litoral do Rio Grande do Sul durante a primavera, porém menos representativo do que o cenário RCP 2.6. Isto é, a diferença entre o cenário futuro e o clima presente será positiva na costa (Fig. 4.18 (c)).

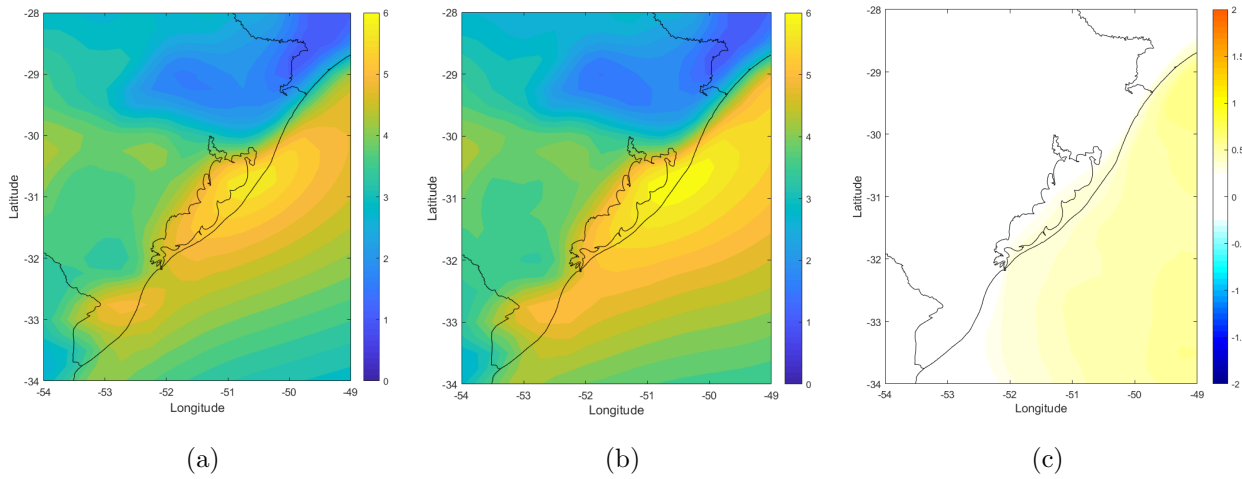


Figura 4.17: Análise sazonal da média da intensidade do vento, referente aos meses de outubro, novembro e dezembro (primavera) utilizando os dados do (a) RegCM4 no período de 1981 à 2015, (b) RCP 8.5 no período de 2021 a 2055 e a diferença entre o RCP 8.5 e RegCM4 (c).

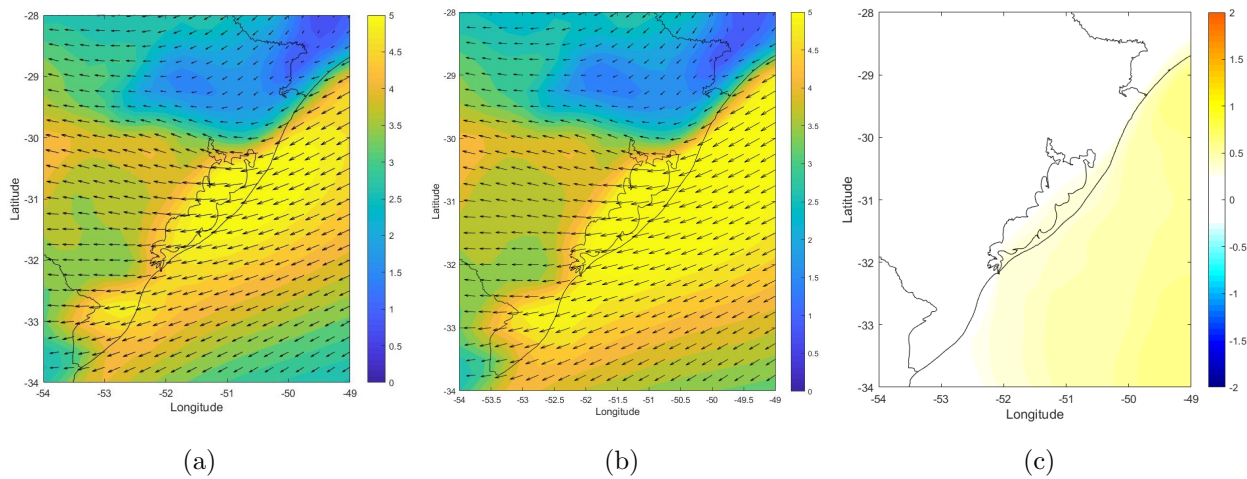


Figura 4.18: Média sazonal da intensidade da velocidade do vento, referente aos meses de outubro, novembro e dezembro (primavera) utilizando os dados do (a) RegCM4 no período de 1981 à 2015, (b) RCP 8.5 no período de 2021 a 2055 e a diferença entre o RCP 8.5 e RegCM4 (c).

As médias do outono para o cenário RCP 8.5, ilustrado na Figura 4.20 (b), mostram uma redução da intensidade do vento no centro-oeste do Estado, mantendo um leve aumento da intensidade do vento no litoral, o que pode ser visto de forma mais clara na Figura 4.20 (c).

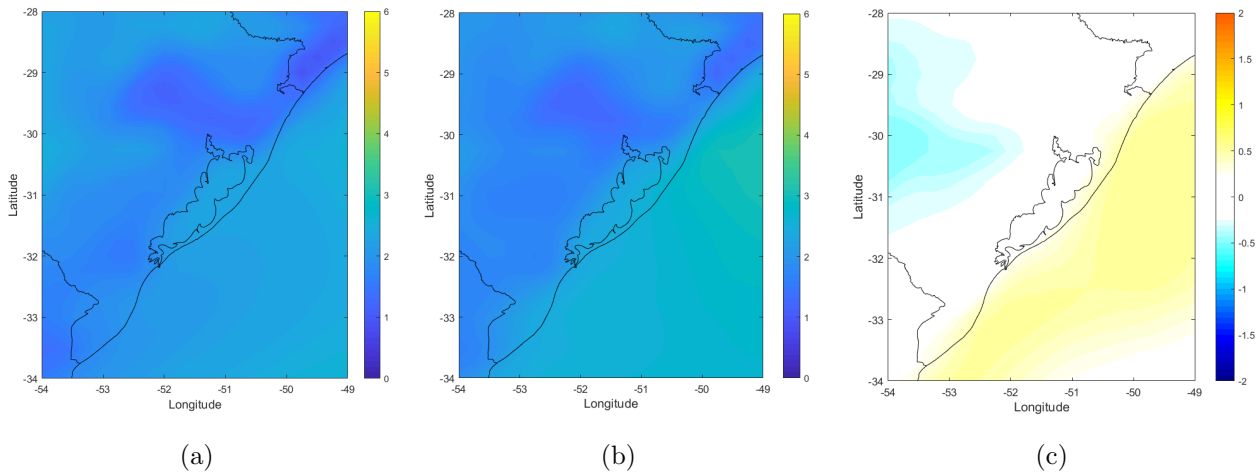


Figura 4.19: Análise sazonal da média da intensidade da velocidade do vento, referente aos meses de abril, maio e junho (outono) utilizando os dados do (a) RegCM4 no período de 1981 à 2015, (b) RCP 8.5 no período de 2021 a 2055 e a (c) diferença entre o RCP 8.5 e RegCM4.

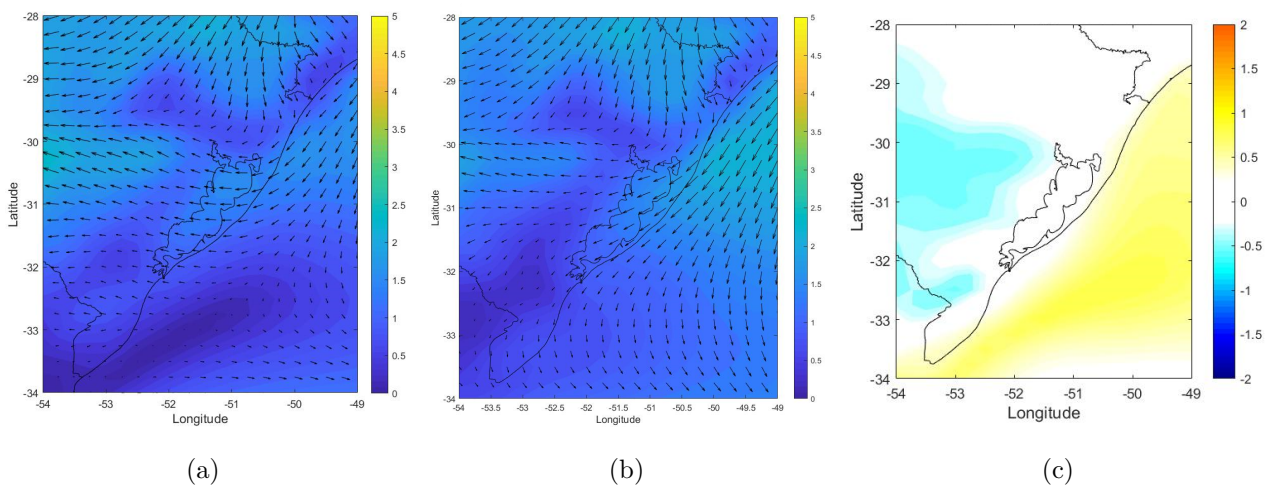


Figura 4.20: Média sazonal da intensidade da velocidade do vento, referente aos meses de abril, maio e junho (outono) utilizando os dados do (a) RegCM4 no período de 1981 à 2015, (b) RCP 8.5 no período de 2021 a 2055 e a (c) diferença entre o RCP 8.5 e RegCM4.

As projeções indicam aumento na intensidade do vento em ambos os RCPs ao compará-los com as análises de clima presente. Portanto, conforme ressaltado por Reboita, Amaro e Souza (2018), o aumento dos gases de efeito estufa na atmosfera contribui para o aumento da temperatura média do planeta, afetando gradientes horizontais de pressão e, consequentemente, padrões de circulação dos ventos.

Os modelos reproduzem algumas características comuns às análises de clima presente, onde mostram maior intensidade do vento sobre os oceanos e, relativamente maior, sobre as planícies em comparação com as regiões serranas (Kulkarni e Huang, 2014). A primavera continuou sendo a estação do ano com maior incidência de intensidade do vento (Figs. 4.14 e 4.18), assim como o outono é a estação com ventos menos intensos (Figs. 4.16 e 4.20), tanto para o

cenário otimista quanto para o cenário pessimista. As direções predominantes observadas para os cenários futuros são nordeste (NE) e sudeste (SE), comportamento semelhante ao observado para diversas análises de clima presente como Galvani et al. (1999) para cidade de Maringá, Silva et al. (1997) para a cidade de Pelotas e Krusche, Saraiva e Reboita (2002) para a cidade de Rio Grande.

4.3 Implementação do método de Lund

Identificou-se os locais com maior correlação de intensidade do vento e comportamentos temporais médios no período de 1981 à 2015 para todos os conjuntos de dados estudados anteriormente, ERA5, RegCM4, RCP 2.6 e RCP 8.5. O método de Lund foi aplicado nos modos S T, tais modos de análise mostram como abordagens distintas podem ser relevantes para na identificação dos padrões de vento.

4.3.1 Modo S

O modo S, aplicado aos dados do ERA5 e RegCM4 na análise de clima presente (1981-2015) e aos cenários RCP 2.6 e RCP 8.5 na análise do clima futuro (2021-2055), buscou-se encontrar áreas nas quais ocorre uma estrutura temporal semelhante.

Tabela 1: Quatro primeiros grupos do método de Lund decomposto no modo S para o ERA5 de médias mensais no período de 1981 à 2015. Na segunda coluna apresenta-se o número de elementos totais de cada grupo. A porcentagem corresponde à porcentagem acumulada do número de elementos em relação ao número total. Os máximos, mínimos e médias correspondem à intensidade da velocidade do vento.

Grupo	Total de Elementos	Porcentagem	V_{Max}	V_{Min}	V_{Md}
1	275	52,38 %	7,26 m/s	0,67 m/s	2,70 m/s
2	108	72,95 %	5,22 m/s	0,54 m/s	2,18 m/s
3	50	82,48 %	4,26 m/s	0,60 m/s	2,27 m/s
4	49	91,81 %	4,15 m/s	0,55 m/s	1,89 m/s

A tabela 1 mostra os quatro primeiros grupos resultantes da aplicação deste método para os dados do ERA5 no período especificado. Esses grupos representam aproximadamente 92% de todo o conjunto em questão, ou seja, corresponde à uma amostra suficientemente satisfatória para identificar os locais cujo comportamento temporal médio é semelhante.

Tabela 2: Quatro primeiros grupos do método de Lund decomposto no modo S para os dados do RegCM4 de médias mensais no período de 1981 à 2015. Na segunda coluna apresenta-se o número de elementos totais de cada grupo. A porcentagem corresponde à porcentagem acumulada do número de elementos em relação ao número total. Os máximos, mínimos e médias correspondem à intensidade da velocidade do vento.

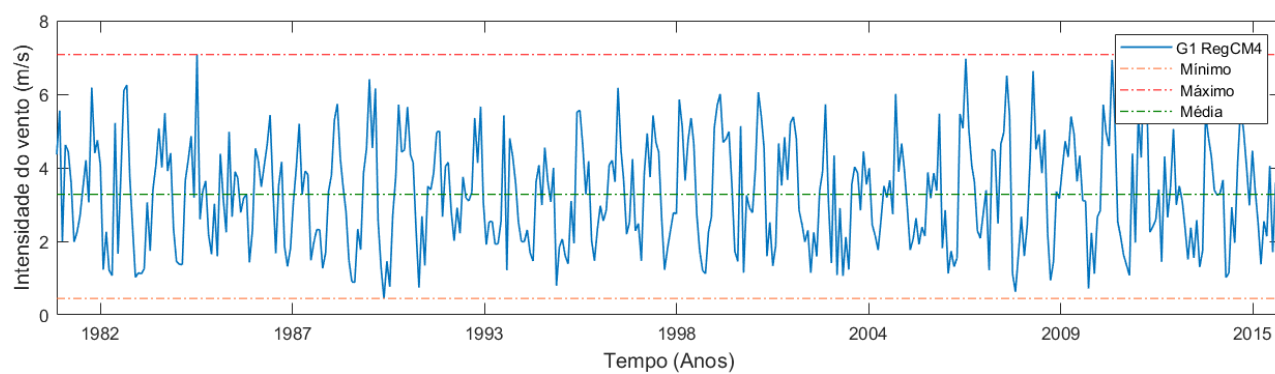
Grupo	Total de Elementos	Porcentagem	V_{Max}	V_{Min}	V_{Md}
1	272	51,81 %	7,08 m/s	0,44 m/s	3,28 m/s
2	156	81,52 %	6,45 m/s	0,63 m/s	2,70 m/s
3	44	89,90 %	4,44 m/s	0,66 m/s	2,22 m/s
4	19	93,52 %	4,06 m/s	0,35 m/s	1,58 m/s

De forma análoga, a tabela 2 traz as discussões para o conjunto de dados do RegCM4 do clima presente. Essas tabelas mostram informações de máximos, mínimos, médias e a quantidade de elementos em cada grupo. Observa-se que a quantidade de elementos por grupo sofre maiores alterações a partir do segundo grupo ao comparar os resultados dos dados do ERA5 (Tab.1) com os dados do RegCM (Tab. 2) no período de 1981 à 2015.

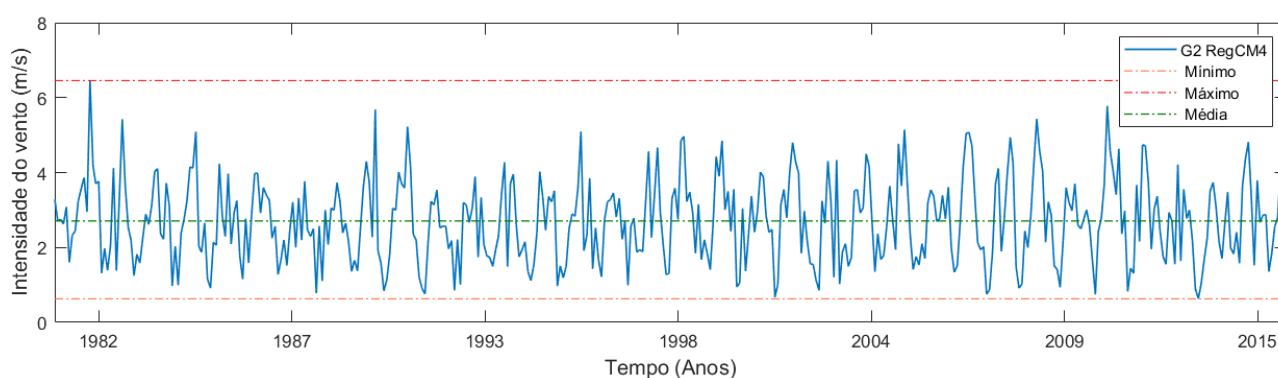
O grupo 1 apresenta resultados semelhantes no que se refere à porcentagem correspondente e aos valores de máximo. A predominância do grupo 1 indica bons indícios para a continuidade do estudo nesta região, a fim de determinar, posteriormente, se tal correlação pode estar associada à elevadas taxas de intensidade do vento em regiões *offshore* e também por estar sujeita a menos restrições.

Na Figura 4.21, pode-se visualizar aspectos da amplitude citados nas tabelas 2. O comportamento temporal médio para o grupo 1, Fig. 4.21 (a), mostrou-se satisfatório, utilizando os dados do RegCM de clima presente, o que também pode ser verificado na Figura 7.1 para os dados do ERA5 (Apêndice 1).

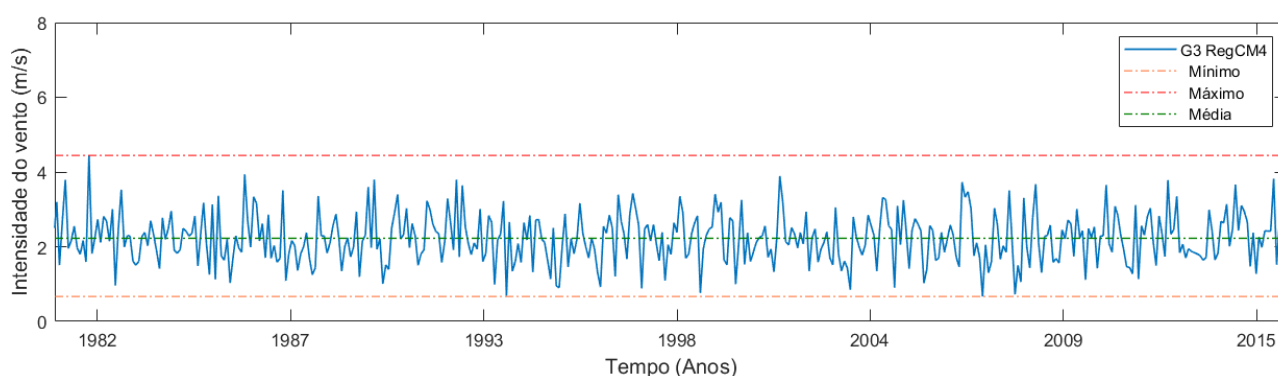
As análises dos cenários futuros mostraram que há maior variação entre os resultados devido às incertezas e particularidades na previsão das emissões de dióxido de carbono desses RCPs.



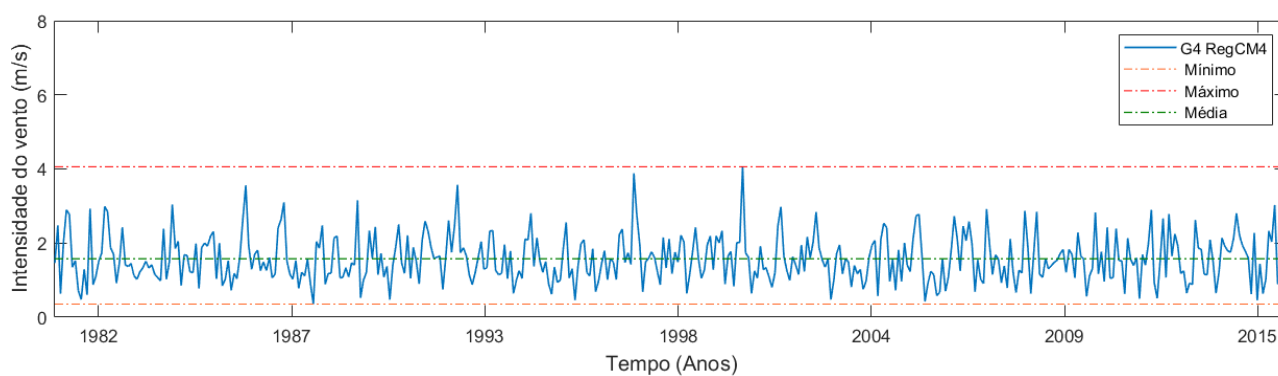
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.21: Séries temporais da intensidade do vento do RegCM4 decomposto em modo S de 1981 à 2015 para os grupos (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4. A linha azul indica a intensidade do vento (m/s). A linha verde indica a média da intensidade do vento. Já as linhas vermelha e laranja indicam os valores de máximo e mínimo, respectivamente.

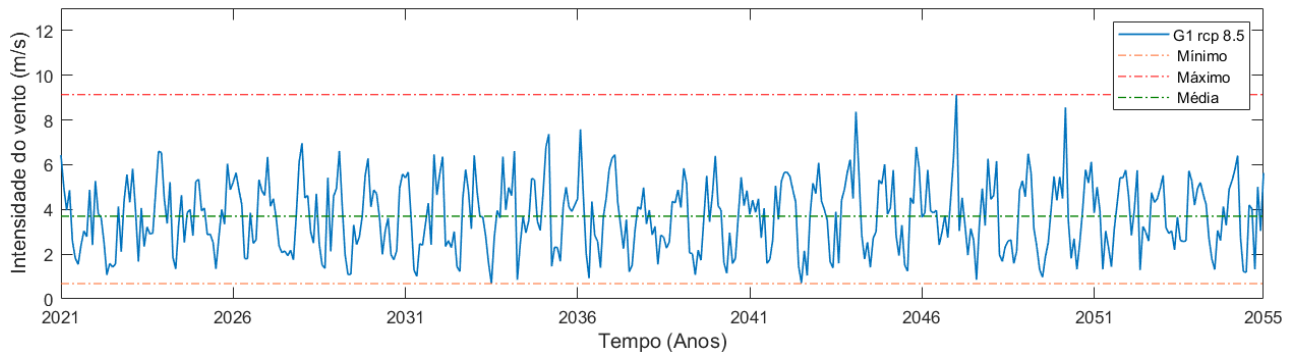
Tabela 3: Quatro primeiros grupos do método de Lund decomposto no modo S para os dados do RCP 2.6 de médias mensais no período de 2021 à 2055. Na segunda coluna apresenta-se o número de elementos totais de cada grupo. A porcentagem corresponde à porcentagem acumulada do número de elementos em relação ao número total. Os máximos, mínimos e médias correspondem à intensidade da velocidade do vento.

Grupo	Total de Elementos	Porcentagem	V_{Max}	V_{Min}	V_{Md}
1	378	72 %	9,23 m/s	0,41 m/s	4,03 m/s
2	83	87,81 %	5,55 m/s	0,28 m/s	2,51 m/s
3	34	94,29 %	12,69 m/s	0,19 m/s	3,86 m/s
4	21	98,29 %	4,21 m/s	0,21 m/s	1,32 m/s

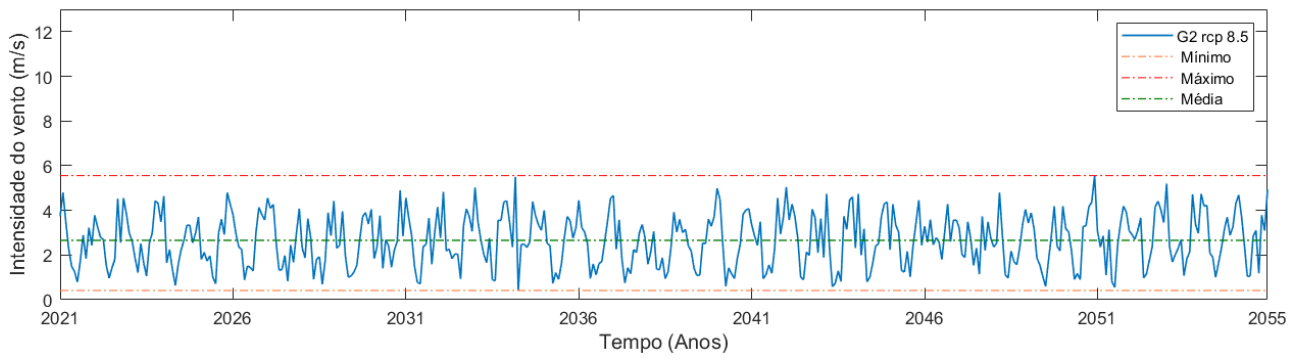
O cenário RCP 8.5 (Tab. 4) apresentou valores mais próximos das análises de clima presente no que se refere aos valores de máximos, quantidade de elementos em cada grupo e porcentagem equivalente. Em contrapartida, o grupo 1 do RCP 2.6 (Tab. 3) não só mostrou maiores incidências de correlações nessa região ao longo do tempo, como apresentou tais resultados com, aproximadamente, 19% a mais de elementos pertencentes a este grupo quando comparado ao RCP 8.5.

Tabela 4: Quatro primeiros grupos do método de Lund decomposto no modo S para os dados do RCP 8.5 de médias mensais no período de 2021 à 2055. Na segunda coluna apresenta-se o número de elementos totais de cada grupo. A porcentagem corresponde à porcentagem acumulada do número de elementos em relação ao número total. Os máximos, mínimos e médias correspondem à intensidade da velocidade do vento.

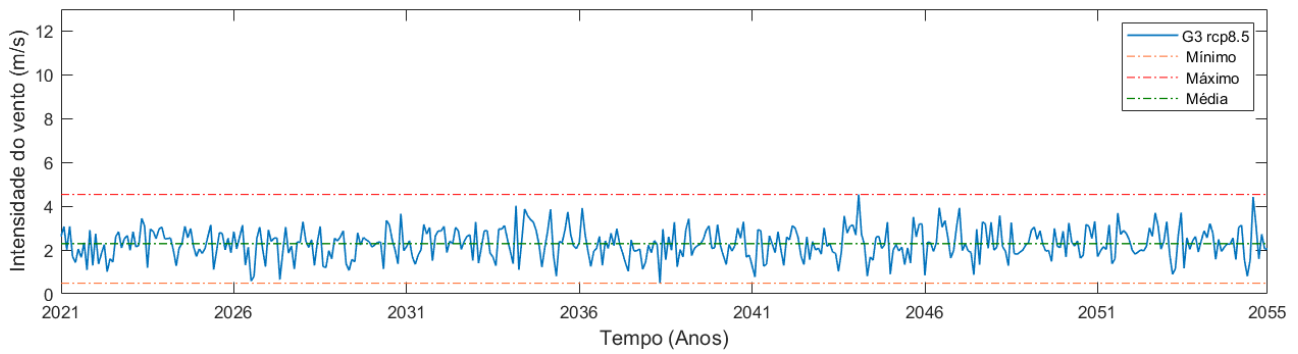
Grupo	Total de Elementos	Porcentagem	V_{Max}	V_{Min}	V_{Md}
1	278	52,95 %	9,13 m/s	0,68 m/s	3,70 m/s
2	142	80 %	5,56 m/s	0,41 m/s	2,66 m/s
3	45	88,57 %	4,53 m/s	0,48 m/s	2,29 m/s
4	22	92,76 %	3,65 m/s	0,47 m/s	1,77 m/s



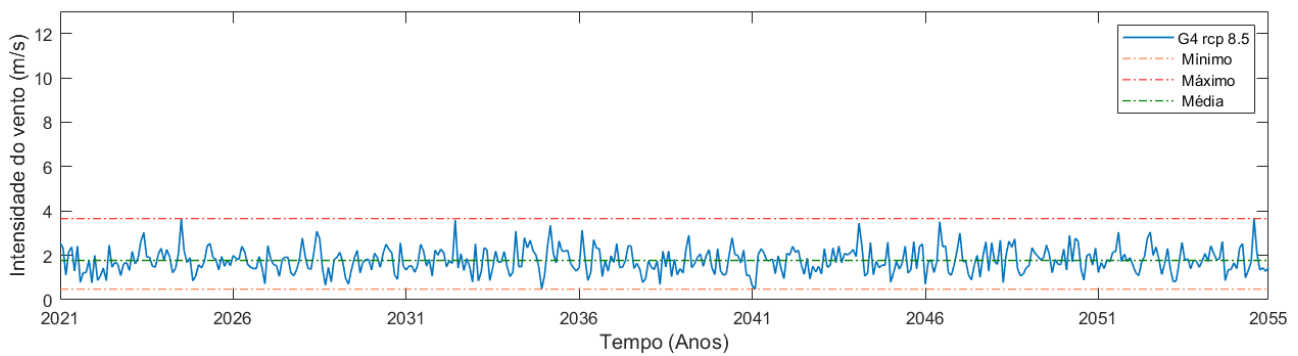
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.22: Séries temporais da intensidade do vento do RCP 8.5 decomposto em modo S de 2021 à 2055 para os grupos (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4. A linha azul indica a intensidade do vento (m/s). A linha verde indica a média da intensidade do vento. Já as linhas vermelha e laranja indicam os valores de máximo e mínimo, respectivamente.

4.3.2 Modo T

Para a decomposição em modo T do método de Lund, desejou-se verificar a variabilidade espacial do vento na costa do Rio Grande do Sul.

Com esses agrupamentos temporais, foi possível estabelecer as relações entre a intensidade do vento e características de circulação atmosférica.

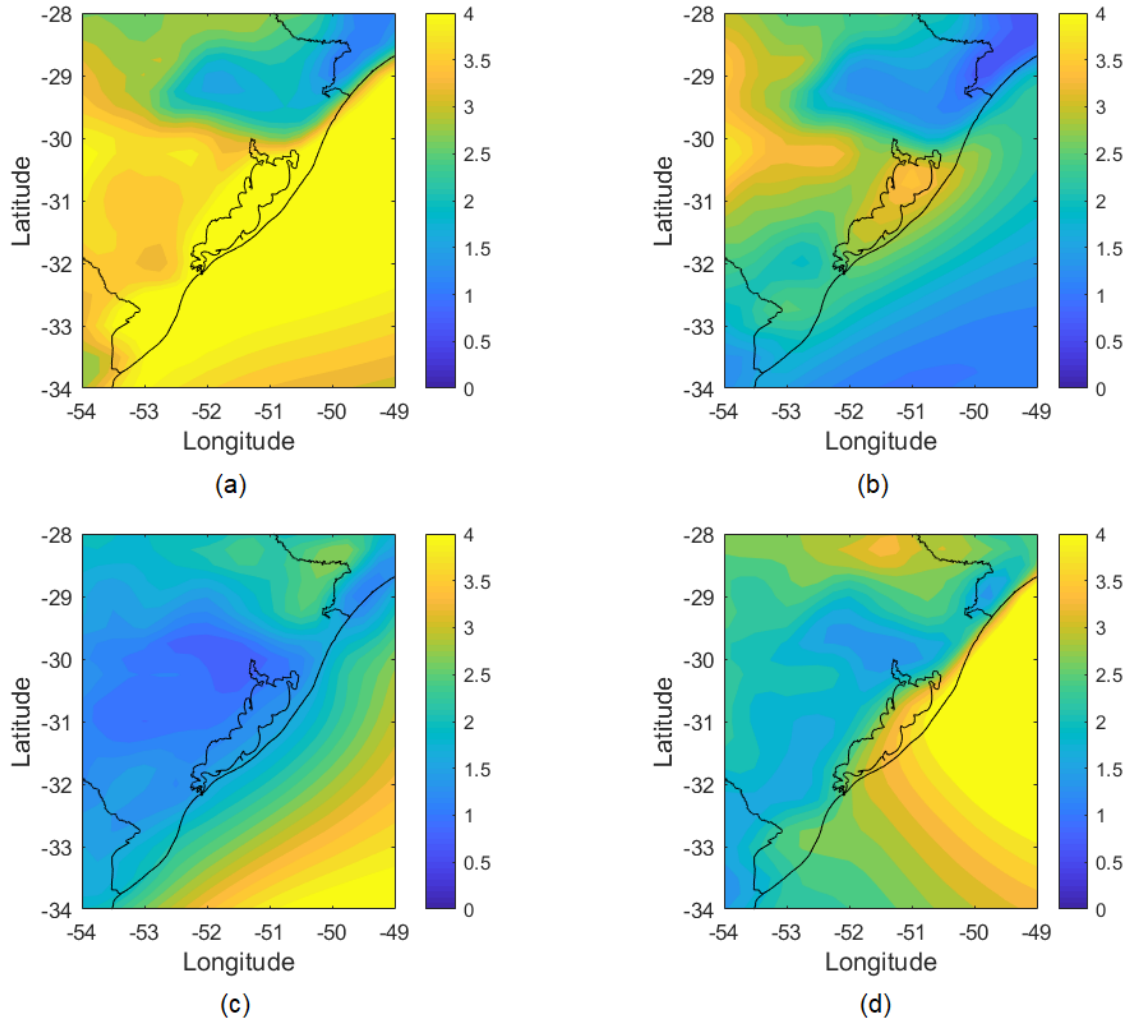


Figura 4.23: Padrão mais frequente da velocidade do vento para os grupos (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4, utilizando o método de Lund decomposto em modo T para os dados do RegCM4.

A Figura 4.23 mostram o resultado do método de Lund decomposto no modo T para os dados do RegCM de clima presente e a Figura 4.24 mostram os resultados para o cenário futuro RCP 8.5. Ambos mostraram que o primeiro grupo apresentou padrões mais frequentes de intensidade do vento na costa do Rio Grande do Sul, que corresponde à região de interesse desta pesquisa. Essa região também apresenta maiores valores de intensidade do vento, conforme pôde ser observado nos mapas climatológicos de média e máximos apresentados nas seções anteriores.

Todos os conjuntos de dados apresentaram padrões semelhantes de vento na costa. Isso pode ser visto nos resultados do grupo 1 para os dados do Era 5 no período de 1981 à 2015

(Apêndice 3) e para os dados do RCP 2.6 no período de 2021 à 2055 (Apêndice 4).

Utilizar o método de Lund, decomposto, tanto em modo T como em modo S, para analisar o potencial eólico de determinada região é desafiador devido à escassez de trabalhos científicos abrangendo o tema, principalmente quando envolvem os cenários futuros. No entanto, há diversas pesquisas atuais que citam outros métodos, também baseados em correlações temporais e espaciais, para avaliar o potencial eólico e previsão do vento de diversas regiões, como Zhu et al. (2019); Kapica, Canales e Jurasz (2021); Potisomporn e Vogel (2021).

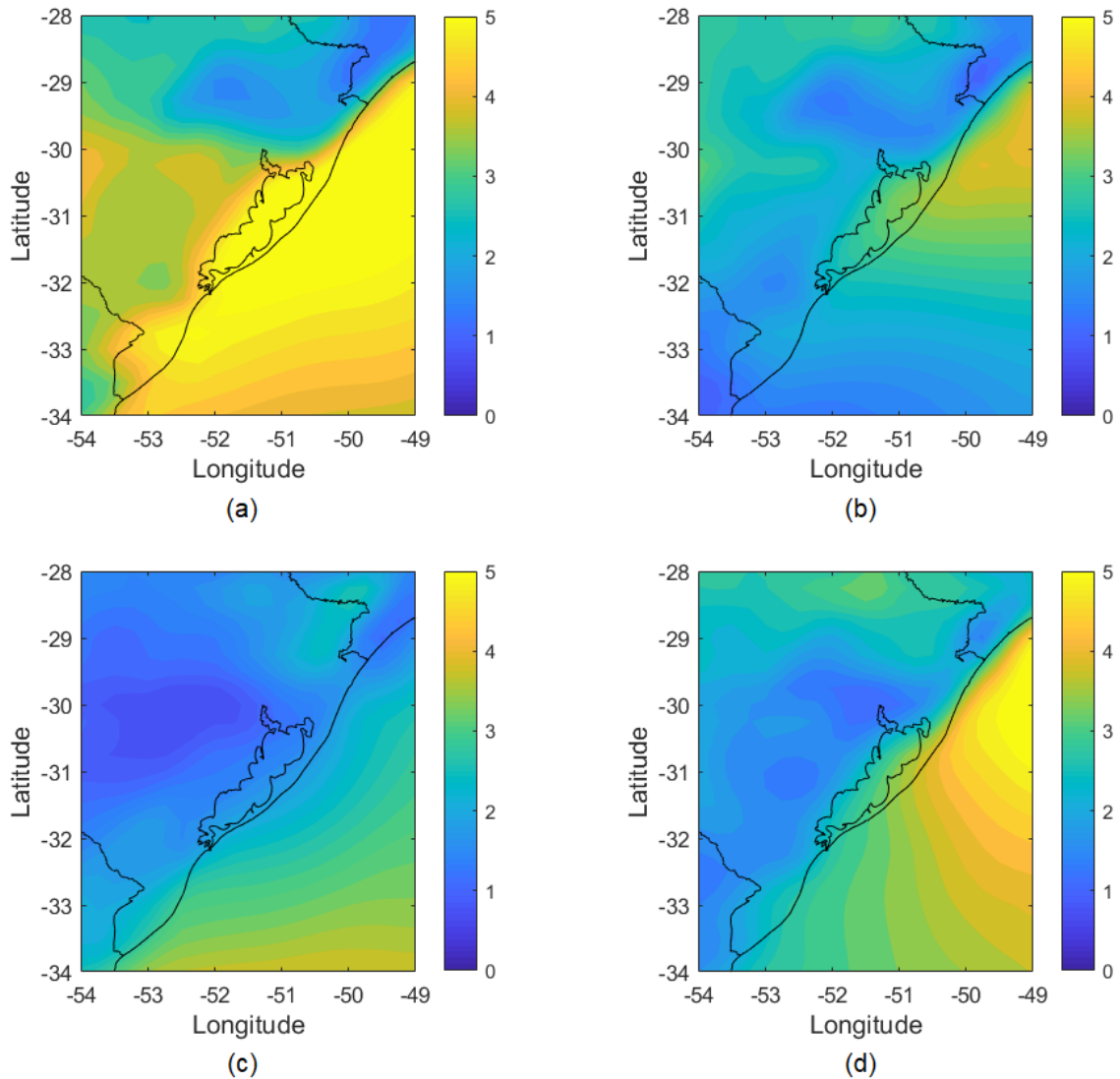


Figura 4.24: Padrão mais frequente da velocidade do vento para os grupos (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4, utilizando o método de Lund decomposto em modo T para os dados do RCP 8.5.

4.4 Análise da batimetria

A batimetria foi utilizada para avaliar as profundidades da região costeira, representada cartograficamente pelas curvas batimétricas. As informações obtidas com a batimetria da costa foram fundamentais para avaliação do local de instalação de um parque eólico *offshore*, pois é

necessário conhecer o fundo do oceano onde uma torre será construída para avaliar a fundação e tipo de instalação mais adequados na região de interesse.

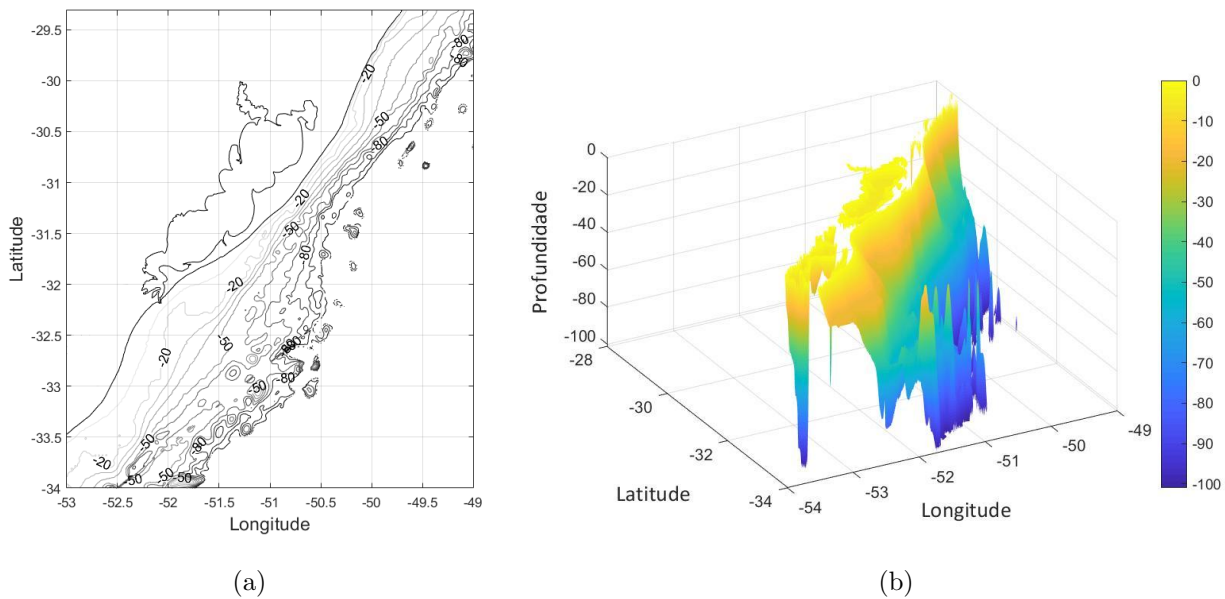


Figura 4.25: Representação bidimensional (a) e tridimensional (b) dos contornos batimétricos da área selecionada. Fonte: Gerado pela autora

Os dados foram analisados com base nos dados dos Centros Nacionais de Informações Ambientais da NOAA (NOAA *National Centers for Environmental Information*, NCEI). Visualizações bidimensional (Fig. 4.25 (a)) e tridimensional (Fig. 4.25 (b)) da batimetria na região de interesse desta pesquisa foram geradas, a fim de avaliar a profundidade do mar, pois compreender a profundidade da água em qualquer local de desenvolvimento de vento *offshore* potencial é fundamental para determinar a tecnologia de base apropriada a ser usada, bem como para avaliar com precisão o custo de instalação (Azevedo et al. 2020; Gnandji et al., 2021)

Na Figura 4.25 (a), nota-se que esta região possui uma plataforma continental externa levemente inclinada, o que permite com que tecnologias eólicas *offshore* de águas rasas, disponíveis atualmente, sejam implementadas para, posteriormente, avaliar, desenvolver, testar e instalar parques eólicos em águas profundas de acordo com que essas tecnologias se tornam disponíveis no mercado, assim como ocorreu na Dinamarca, pioneira em energia eólica *offshore*.

Portanto, as faixas de frequência entre 20 m e 50 m foram selecionadas como promissoras à instalação de um parque eólico por estarem próximas o suficiente da costa. Essa profundidade pode otimizar os link de transmissão de subestações terrestres e a manutenção de aerogeradores *offshore*.

4.5 Sistema de transmissão e fundação

Ao analisar a proximidade das linhas de transmissão e subestações existentes (Fig. 4.26), alguns locais podem ser excluídos e/ou restringidos. O litoral norte e litoral sul, por exemplo,

possuem acessos existentes e são, portanto, locais adequados para a instalação de parques eólicos *offshore*.

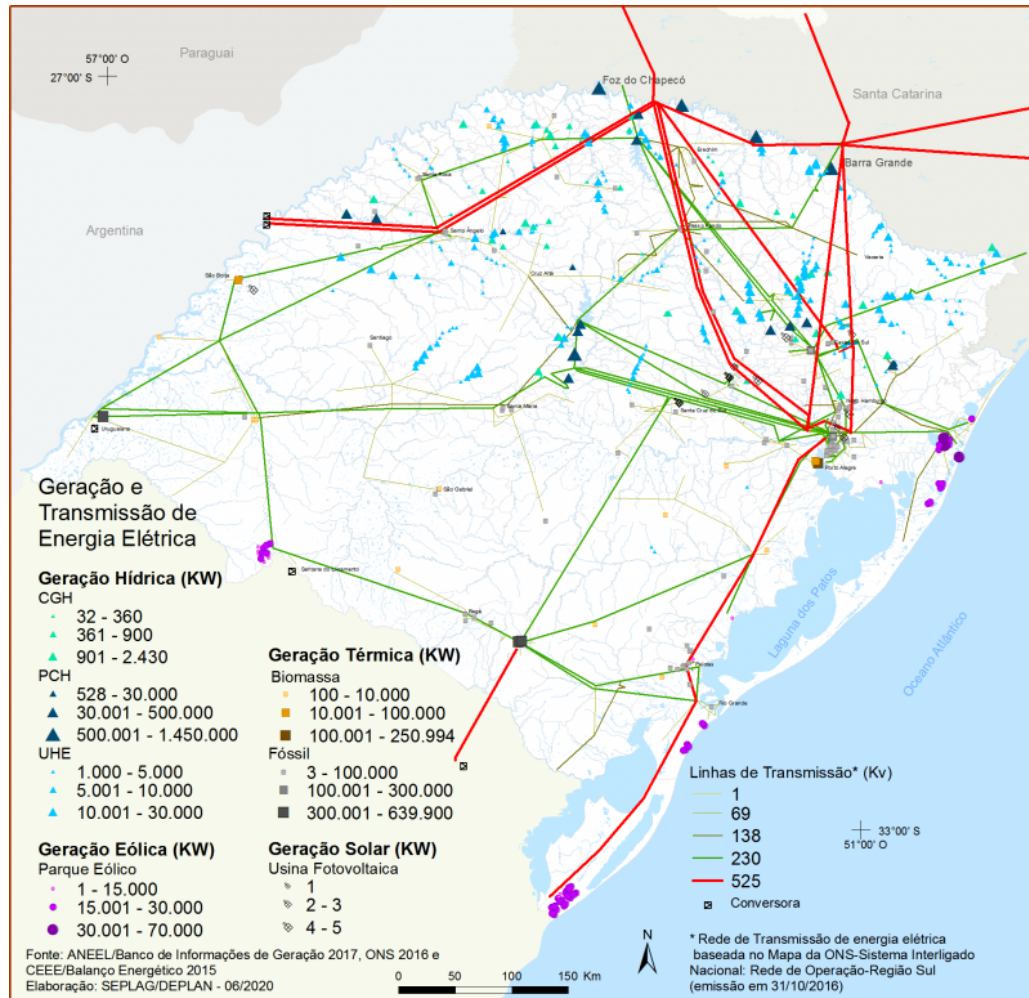


Figura 4.26: Sistema de transmissão de energia elétrica existente, com parques eólicos *onshore* como pontos magenta. Fonte: Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2020).

Nessa etapa do processo e com base nos resultados anteriores, é possível inferir alguns locais e tipo de fundação adequados como o litoral sul do Estado do Rio Grande do Sul.

A costa nas proximidades das cidades de Rio Grande e Santa Vitória do Palmar podem ser consideradas promissoras para a instalação de parques eólicos *offshore*, que além de linhas de transmissão existentes, possuem subestações *onshore* e cabeamento de 525 kV. Por outro lado, todo o litoral próximo à Lagoa dos Patos foi desconsiderado nesta pesquisa por falta de acesso existente.

Do mesmo modo, ao avaliar as profundidades apontadas anteriormente, recomenda-se que seja utilizada a fundação por tripé (Fig. 4.27) para esse tipo de instalação.



Figura 4.27: Projeto fundação por tripé de turbina eólica *offshore*. Fonte: CATWELL, 2021.

Esse tipo de fundação pode ser instalado em profundidades de transição, ou seja, entre 25 e 50 m (Bailey et al., 2014). A fundação por tripé pode ser construída por três tubos de aço tubular, que estendem-se até o fundo do mar. Uma peça de transição é colocada sobre eles, onde também é conectada à turbina. A largura da base e a profundidade de penetração da estaca podem ser ajustadas para se adequar às reais condições ambientais e do solo (Yeter et al., 2016).

4.6 Rota de navegação

Após a avaliação dos dados AIS, foi realizada uma análise qualitativa para definir o local recomendado por esta pesquisa para a instalação de um parque eólico offshore. Para esta análise, foi possível selecionar a área de estudo e identificar locais em que não seria apropriado a instalação de um parque eólico *offshore*, devido à grande densidade de tráfego dos navios.

A costa de Rio Grande atingiu todos os requisitos analisados para a construção do parque eólico *offshore*. Vale ressaltar que Rio Grande possui um porto, ou seja, o tráfego de embarcações é intenso na região, mas existem áreas com menor densidade de tráfego que podem ser consideradas (Fig. 4.28).

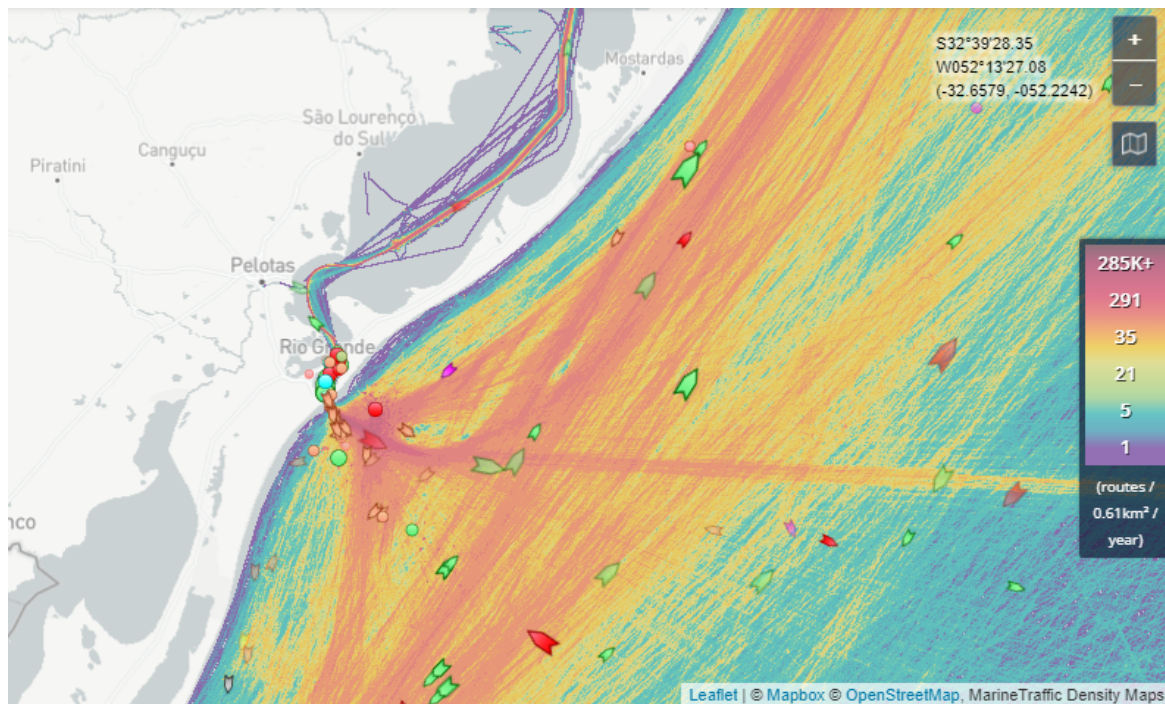


Figura 4.28: Densidade de tráfego dos navios no litoral do Rio Grande do Sul. Fonte: *Marine Traffic*.

CONCLUSÃO

Esta pesquisa analisou a viabilidade da energia eólica *offshore* na costa do Rio Grande do Sul e métodos para determinar regiões favoráveis para a construção de parques eólicos *offshore*. Dados horários diários e dados mensais de Reanalysis v5 e do Modelo Climático Regional versão 4 foram utilizados para analisar climatologicamente a intensidade e direção do vento na costa do Rio Grande do Sul no período de 1981 a 2015, para o clima presente e de 2021 a 2055, para o clima futuro. Também foram utilizadas as simulações regionais do CORDEX sob as Vias de Concentração Representativas 2.6 e 8.5 para avaliar cenários futuros.

Os cenários foram avaliados em relação aos dados históricos. As mudanças projetadas pelo modelo para o clima futuro mostram que, de modo geral, o aumento da emissão de gases poluentes afetam a circulação atmosférica e, conseqüentemente, a intensidade do vento na região. Vale ressaltar que essas análises de clima futuro podem variar ao longo dos anos, devido ao grande nível de incerteza no que se refere às emissões de gases poluentes, por esse motivo, considerou-se os cenários otimista e pessimista. A redução nos níveis de dióxido de carbono resultou em ventos mais intensos no período analisado.

O modelo regional apresentou resultados mais concisos do que os dados de reanálise, possibilitando o refinamento do estudo de clima presente. Os resultados das análises estatísticas mostram que os ventos *offshore* são mais intensos e consistentes do que *onshore*, alcançando até 35 m/s. As ocorrências de ventos mais intensos foram nos meses de outubro, novembro e dezembro (primavera). No entanto, abril, maio e junho (outono) foram os meses que apresentaram menores valores para a intensidade do vento na costa. Através das análises das componentes zonais e meridionais, verificou-se que a predominância dos ventos foram nas direções nordeste, leste e sudeste.

Utilizar o método de Lund para analisar o potencial eólico de determinada região é desafiador devido à escassez de trabalhos científicos abrangendo o tema, principalmente quando envolvem os cenários futuros. Esse método apresentou uma limitação para definir o limiar, pois é necessário escolhê-lo subjetivamente. No entanto, tal limitação não prejudicou os resultados desta pesquisa, devido aos métodos aplicados posteriormente. O método de Lund foi selecionado como uma metodologia inicial pela facilidade de aplicação e interpretação dos seus resultados, também possibilitou a identificação de locais com maior correlação de intensidade do vento e de padrões nos comportamentos temporais médios.

Também foram aplicados alguns critérios para a seleção do local de instalação de parques eólicos *offshore*, sendo eles a batimetria costeira, o tipo de fundação adequada para a plataforma costeira de profundidade, a rede de linhas de transmissão e as rotas de navegação. A combinação desses parâmetros, juntamente com as análises estatísticas, demonstraram que a instalação de um parque eólico *offshore* no litoral do Rio Grande do Sul é viável.

A batimetria indica o uso de turbinas com fundação do tipo tripé por uma extensão ampla na plataforma costeira. O trânsito de navios é intenso na região, especialmente junto ao porto

de Rio Grande, porém há locais com menor densidade de tráfego que podem ser utilizadas. Por outro lado, seria interessante considerar os locais próximos ao porto, pois poderia reduzir gastos operacionais, como transportar turbinas eólicas na fase de construção e também na fase de operação. As cidades como Rio Grande e Santa Vitória do Palmar possuem linhas de transmissão, subestações *onshore* e cabeamentos adequados.

No litoral sul do Brasil, próximo à cidade de Rio Grande (32° S, 52° W), existem vários parques eólicos *onshore* bem-sucedidos, o que indica que os parques eólicos *offshore* nesta região poderiam ser ainda mais prósperos. Portanto, determinou-se que as proximidades de Rio Grande se apresenta melhor de acordo com esses critérios. Há grande potencial para a instalação de parques eólicos *offshore* nessa região e tem cerca de 165 quilômetros quadrados, aproximadamente, um quarto da área do maior parque eólico *offshore* da Grã-Bretanha. Distante até 50 quilômetros da costa, com uma profundidade entre 20 e 50 metros, com ventos fortes e persistentes semelhantes aos do Mar do Norte, onde estão localizados muitos parques eólicos *offshore* europeus.

No que se refere à projetos futuros, pode-se realizar o mesmo procedimento utilizado nesta pesquisa com outros métodos multivariados. Alguns aspectos não foram considerados, como o impacto ambiental, especificamente, as rotas migratórias de pássaros e mamíferos marinhos, em particular, a de baleias e também não foram avaliados custos financeiros de construção. No entanto, espera-se que os resultados obtidos possam auxiliar políticas públicas e setores privados com interesse em recursos renováveis.

REFERÊNCIAS

- [1] ABEEÓLICA *Boletim Anual de Geração Eólica 2019*. Associação Brasileira de Energia Eólica, 2019. Disponível em: <http://abeeolica.org.br>
- [Aboobacker et al. 2021] Aboobacker, V.M. et al. *Long-Term Assessment of Onshore and Offshore Wind Energy Potentials of Qatar*. *energies*, 14(1178):1–21, 2019.
- [Albuquerque et al. 2020] Albuquerque, W.S.M et al. *Fazendas de geração eólica offshore: Uma alternativa para o descomissionamento de plataformas de petróleo na bacia de Campos*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2020.
- [4] Alves, J.H.G.M *Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate*. *Ocean Modelling*, 11(2):98–122, 2006.
- [Araújo et al. 2013] Araújo et al. *Numerical modeling of the wind flow over a transverse dune*. *Sci Rep*, 3:2858, 2013.
- [6] Archer, C. and Ghaisas, N. *Optimizing wind farm layout via LES-calibrated geometric models inclusive of wind direction and atmospheric stability effects*. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2015.
- [7] Azevedo et al. *Assessment of Offshore Wind Power Potential along the Brazilian Coast*. *Energies*, 13(10), 1991.
- [8] Beiter, P., and Musial, W. *Terminology Guideline for Classifying Offshore Wind Energy Resources. United States*. Departamento de energia dos EUA, 2016. doi:10.2172/1324535.
- [Benazzouz et al. 2020] Benazzouz, A. et al *TOffshore Wind Energy Resource in the Kingdom of Morocco: Assessment of the Seasonal Potential Variability Based on Satellite Data*. *J. Mar. Sci. Eng.*, 2020, 9(31):1–20 . doi:10.3390/jmse9010031.
- [10] Bolaños et al. *Coastal bathymetry from satellite and its use on coastal modelling*. *Coastal Engineering*, (36):1–14, 2018.
- [11] Bosch, J., Staffell, I., Hawkes, A.D. *Numerical modeling of the wind flow over a transverse dune*. *Energy*, 163:766 – 781, 2018.
- [Bresesti et al. 2007] Bresesti, P., Kling, W. L., Hendriks, R. L., Vailati, R. *HVDC Connection of Offshore Wind Farms to the Transmission System*. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(1):37–43, 2007.
- [13] Chaithanya,S., Reddy, V.N.B., Kiranmay, R. *A State of Art Review on Offshore Wind Power Transmission Using Low Frequency AC System*. *International Journal of Renewable Energy Research-IJRER*, 8(1):1–9, 2018.

- [14] Copernicus. *Dados horários ERA5 em níveis únicos de 1979 até o presente*. ECMWF. Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>. Acesso em: 18 nov. 2019.
- [Copping et al. 2016] Copping, A, Breithaupt, S., Whiting, J., Grear, M., Tagestad, J., Shelton, G. *Likelihood of a marine vessel accident from wind energy development in the Atlantic*. Wind Energy, 19(9):1557–1566301, 2016.
- [16] de Pinho, P., Madureira, L.S.P., Calliari, L.J., Weigert, S.C., Costa, P.L. *3D Bathymetry and acoustic seabed classification of Pelotas Basin, Brazil*. Brazilian Journal of Geophysics, 34:117–129, 2016.
- [17] Douvere, F., Maes, F., Vanhulle, A., Schrijvers, J. *The role of marine spatial planning in sea use management: The Belgian case*. Marine Policy, 31(2):182–191, 2007.
- [18] Dvorak, M. J., Archer C. L., Archer Jacobson M. Z. *California offshore wind energy potential*. Renew Energy, 109:1244—1254, 2010.
- [Esteban et al. 2011] Esteban, M. D, Diez, J.J, Lopez G, J, Negro, V. *Why offshore wind energy?*. Renewable Energy, 36:444–450, 2011.
- [20] Ferreira, M.A., Chaves, L.A.O *Análise dinâmica da viabilidade da instalação da turbina eólica de eixo horizontal no ambiente offshore brasileiro/ Dynamic analysis of the feasibility of installing a horizontal axis wind turbine in the brazilian offshore environment*. Brazilian Journal of Developmen, 7(9):1–23, 2021.
- [Fiorin et al. 2008] Fiorin, D.V.1.; Schuch, N.J; Martins, F.R; Brackmann, R; Ceconi, M; Pereira, E.B; Guarnieri, R.A *Comportamento estatístico sazonal dos ventos na região do observatório espacial do Sul*. Divisão de Clima e Meio-Ambiente, 2008.
- [Garvey et al. 2015] Garvey, S.D. et al. *Analysis of a Wind Turbine Power Transmission System with Intrinsic Energy Storage Capability*. Wind Engineering, 39(2):149–173, 2015. doi = 10.1260/0309-524X.39.2.149.
- [23] Gille, S.T, Smith, S.G, Statom, N.M. *Global observations of the land breeze*. Geophysical Research Letters, 32:L05605, 2005.
- [24] Gilliland, J. M. and Keim, B. D. *Position of the South Atlantic Anticyclone and Its Impact on Surface Conditions across Brazil*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 535–553, 2018.
- [25] Giorgi, F. e Bates, G.T *The Climatological Skill of a Regional Model over Complex Terrain*. Surveys in Geophysics, 2325–2347, 1989.
- [Grimm et al. 2009] Grimm, M.A. et al. *Clima da Região Sul do Brasil*. Tempo e Clima no Brasil- Oficina de Textos., 259–275, 2009.

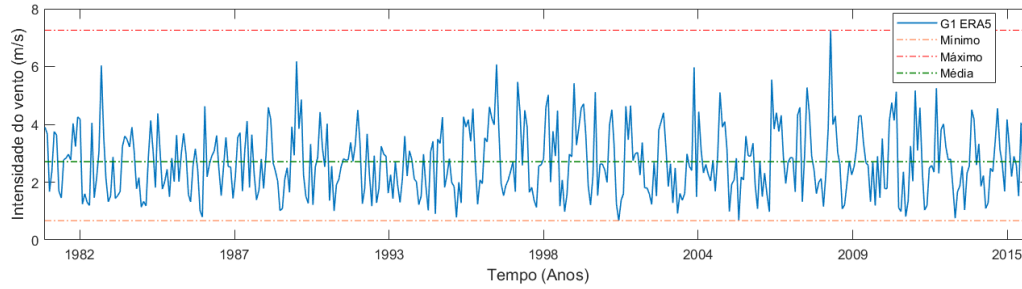
- [Gruber et al. 2003] Gruber, N., Toldo, E., Barboza, E., Nicolodi, J. L. *Equilibrium beach and shoreface profile of the Rio Grande do Sul coast - South of Brazil*. Journal of Coastal Research, 253–259, 2003.
- [28] IRENA *Renewable capacity highlights*. International Renewable Energy Agency, 1–3, 2021.
- [Jarmim et al. 2021] Jarmim et al. *Spatiotemporal climatic analysis in Pernambuco State, Northeast Brazil*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, (2), 2021.
- [Jong et al. 2019] Jong et al. *Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model*. Renew Energy, 109:390–401, 2019.
- [31] Kim, T, Park, J., Maeng, J. *Offshore wind farm site selection study around Jeju Island, South Korea*. Renewable Energy, 94:619–628, 2016.
- [32] Kim, C.K, Jang, J., Kim, T.Y. *Site selection for offshore wind farms in the southwest coast of South Korea*. Renewable Energy, 12(2):151–162, 2018.
- [Krishnamoorthy et al. 2020] Krishnamoorthy, R et al. *An Assessment of Onshore and Offshore Wind Energy Potential in India Using Moth Flame Optimization*. Energies, 13(3063):1–41, 2020.
- [34] Krusche, N., Saraiva, J.M.B. e Reboita, M. *Normais climatológicas provisórias de 1991 a 2000 para Rio Grande, RS*. Departamento de Geociências da Fundação Universidade Federal de Rio Grande, 104, 2002.
- [Lara et al. 2019] Lara, K., Nunes, A., Calvetti, L., Gomes, R. *Condições atmosféricas de grande escala associadas a três eventos de tornados ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (Large scale atmospheric conditions associated with three tornado events occurred in Rio Grande do Sul State, Brazil)*. Revista Brasileira de Geografia Física, 12:1310, 2019.
- [36] Latinopoulos D, Kechagia K *A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece..* Renew Energy, 78:550—560, 2015.
- [Li et al. 2020] Li, Y. et al. *Comparative study of onshore and offshore wind characteristics and wind energy potentials: A case study for southeast coastal region of China* Sustainable Energy Technologies and Assessments, 39:100711, 2020.
- [Lima et al. 2015] Lima et al. *Estimating the offshore wind resources of the State of Ceará in Brazil* Renewable Energy, 83(2):203–221, 2015.
- [Lima et al. 2020] Lima et al. *Recurso eólico offshore - estudos de caso no Ceará*. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, Ceará, Brasil, 12(2):291–301, 2020.

- [Livi et al. 2021] Livi, B. C. B., Wilczek R. R., Batista F. R. S., Maçaira P. *Economic Analysis of Offshore Wind Farms: a Brazilian Case Study*. IEEE Latin America Transactions, 1–8, 2021.
- [41] Lund, I. A. *Map-Pattern Classification by Statistical Methods*. Journal of Applied Meteorology, 2(1):56–65, 1963.
- [Malvaldi et al. 2017] Malvaldi, A. , Weiss, S. , Infield, D. , Browell, J. , Leahy, P. , Foley, AM *Uma análise de correlação espacial e temporal de energia eólica agregada em uma Europa idealmente interconectada*. Wind Energ, 20:1315–1329, 2017.
- [43] Nunes, A. B., Pereira, R. S. *Estimativa de eventos de precipitação com potencial para alagamentos urbanos no Rio Grande do Sul*. Meteorologia em Tópicos, 273–313, 2017.
- [44] Oke, T.R. *Boundary layer climates*. 2^a edição, Routledge, 1987.
- [45] Pascual, C.V., García, J.P., e García, R.G. *Wind Energy Ships: Global Analysis of Operability*. J. Marine Science and Engineering, 9(5), 517, 2021.
- [Reboita et al. 2018] Reboita, M.S, Amaro, T.R. e de Souza, M.R *Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate*. Clim Dyn, 51:187–205, 2018.
- [Reboita et al. 2019] Reboita, M.S, Ambrizzi, T, Silva, B.A, Pinheiro, R.F, Rocha, R.P *The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and Future Climate*. Frontiers in Earth Science, 7:8, 2019 .
- [48] Richardson, D. *The predictability of UK drought using European weather patterns*. School of Engineering Newcastle University, 198, 1991.
- [Rohrig et al. 2019] Rohrig et al. *Powering the 21st century by wind energy—Options, facts, figures*. Applied Physics Reviews, 6(3), 2019. DOI = 10.1063/1.5089877.
- [50] Sandwell, D.T., Gille, S.T., Smith, W.H.F. *Bathymetry from Space: Oceanography, Geophysics, and Climate*. Geoscience Professional Services, (1), 2002.
- [51] Satyamurty, P., Nobre, C.A. e Silva Dias, P.L. *Meteorology of the Southern Hemisphere*. American Meteorological Society, 119–139, 1998.
- [52] Sempreviva, A. M., Barthelmie, R., Pryor, S. *Review of Methodologies for Offshore Wind Resource Assessment in European Seas*. Surveys in Geophysics, 29:471–497, 2008.
- [Sivan et al. 2021] Sivan, C., Rakesh,V., Abhilash, S., Mohanakumar, K. *Evaluation of global reanalysis winds and high-resolution regional model outputs with the 205 MHz stratosphere–troposphere wind profiler radar observations*. Q. J. R. Meteorological Society, 147:2562—2579, 2021.

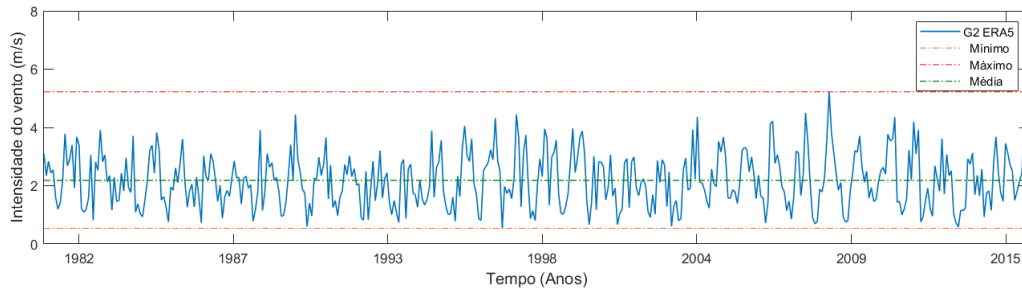
- [54] Sørensen, J.N e Shen, W.Z *Numerical Modeling of Wind Turbine Wakes*. Journal of Fluids Engineering, 124:393–399, 2002.
- [55] Stefanakou, A.A, Nikitakos, Nikitas *A Decision Support Model for Site Selection of Offshore Wind Farms*. 9th International Scientific Conference on Energy and Climate Change, 2016.
- [56] Stehly, T. J. and Beiter, P. C. *2018 Cost of Wind Energy Review*, 2020. doi = 10.2172/1581952.
- [57] STULL, R. *An introduction to boundary layer meteorology.* , Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 660-666, 1988.
- [58] Tozzi, H.A.M. and Calliari, L.J. *Influências das Tempestades Extratropicais sobre o estoque de Sedimentos das Praias entre Rio Grande e Chuí, RS..* 85—87, 1997.
- [Tsoutsos et al. 2015] Tsoutsos T, Tsitoura I, Kokologos D, Kalaitzakis K , J. *Sustainable siting process in large wind farms case study in Crete*. Renew Energy, 75:474—480, 2015.
- [60] Vagiona, D.G, Karanikolas, N.M *A multicriteria approach to evaluate offshore wind farms siting in Greece*. Glob NEST J, 4:235–243, 2012.
- [Villacreses et al. 2017] Villacreses G, Gaona G, Martínez-Gomez J, Juan Jijon D *Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: the case of continental Ecuador..* Renew Energy, 109:275—286, 2017.
- [62] Villwock, J. A., Tomazelli, Luiz J. *Planície Costeira do Rio Grande do Sul: gênese e paisagem atual..* Biodiversidade: regiões da lagoa do Casamento e os butiazais de Tapes, Planície Costeira do Rio Grande do Sul., 109:275—286, 2007.

APÊNDICES

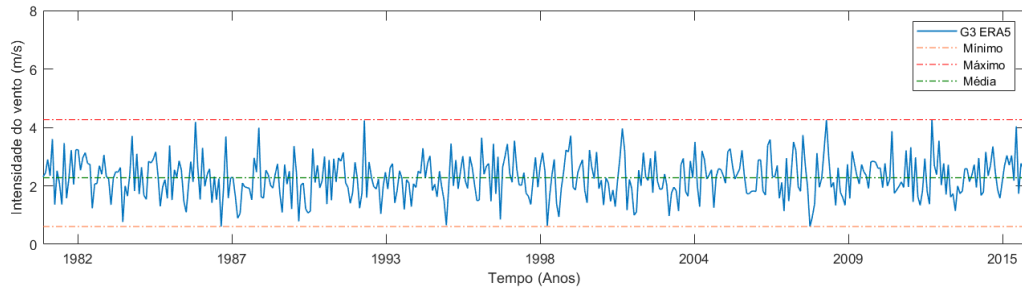
7.1 Apêndice 1 - Método de Lund decomposto em modo S para o ERA5 do clima presente.



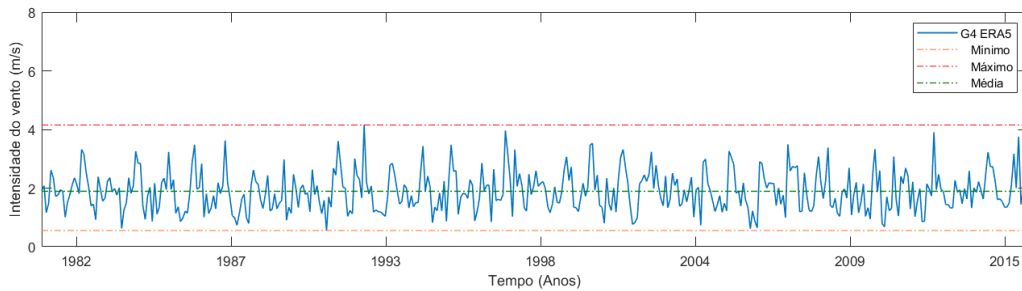
(a)



(b)



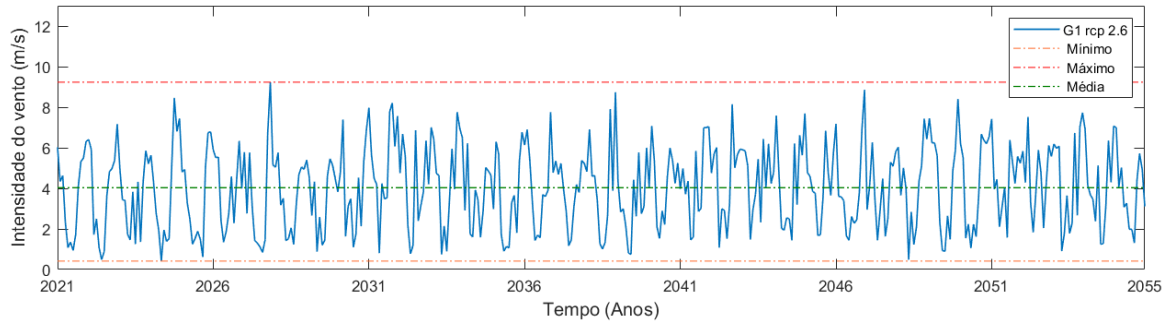
(c)



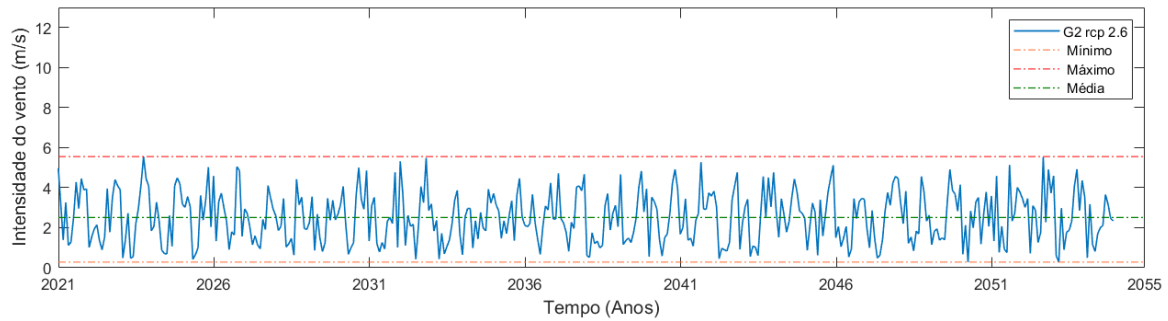
(d)

Figura 7.1: Séries temporais da intensidade do vento do ERA5 decomposto em modo S de 1981 à 2015 para os grupos (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4. A linha azul indica a intensidade do vento (m/s). A linha verde indica a média da intensidade do vento. Já as linhas vermelha e laranja indicam os valores de máximo e mínimo, respectivamente.

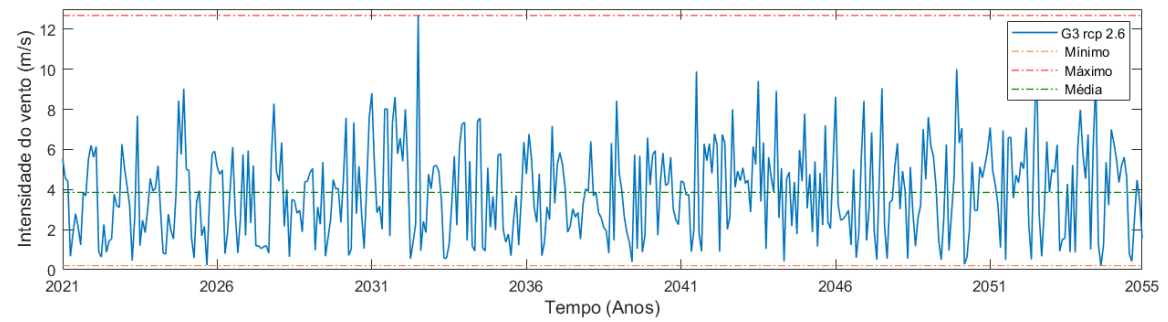
7.2 Apêndice 2 - Método de Lund decomposto em modo S para o RCP 2.6 do cenário futuro.



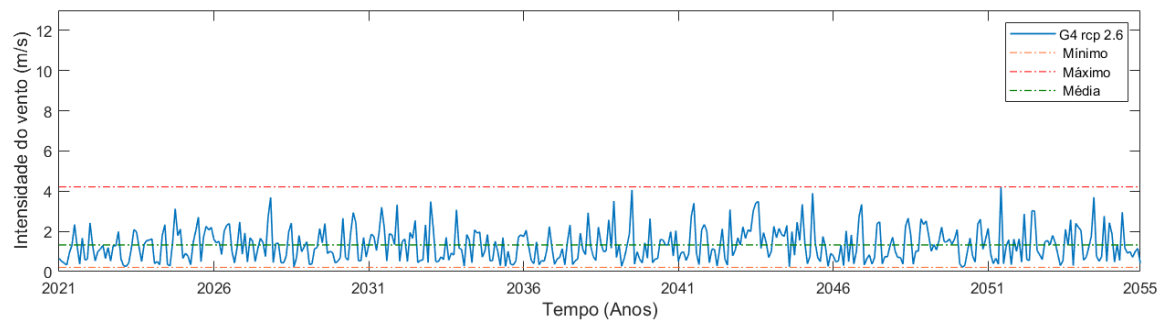
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7.2: Séries temporais da intensidade do vento do RCP 2.6 decomposto em modo S de 2021 à 2055 para os grupos (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4. A linha azul indica a intensidade do vento (m/s). A linha verde indica a média da intensidade do vento. Já as linhas vermelha e laranja indicam os valores de máximo e mínimo, respectivamente.

7.3 Apêndice 3 - Método de Lund decomposto em modo T para os dados do ERA5 do clima presente.

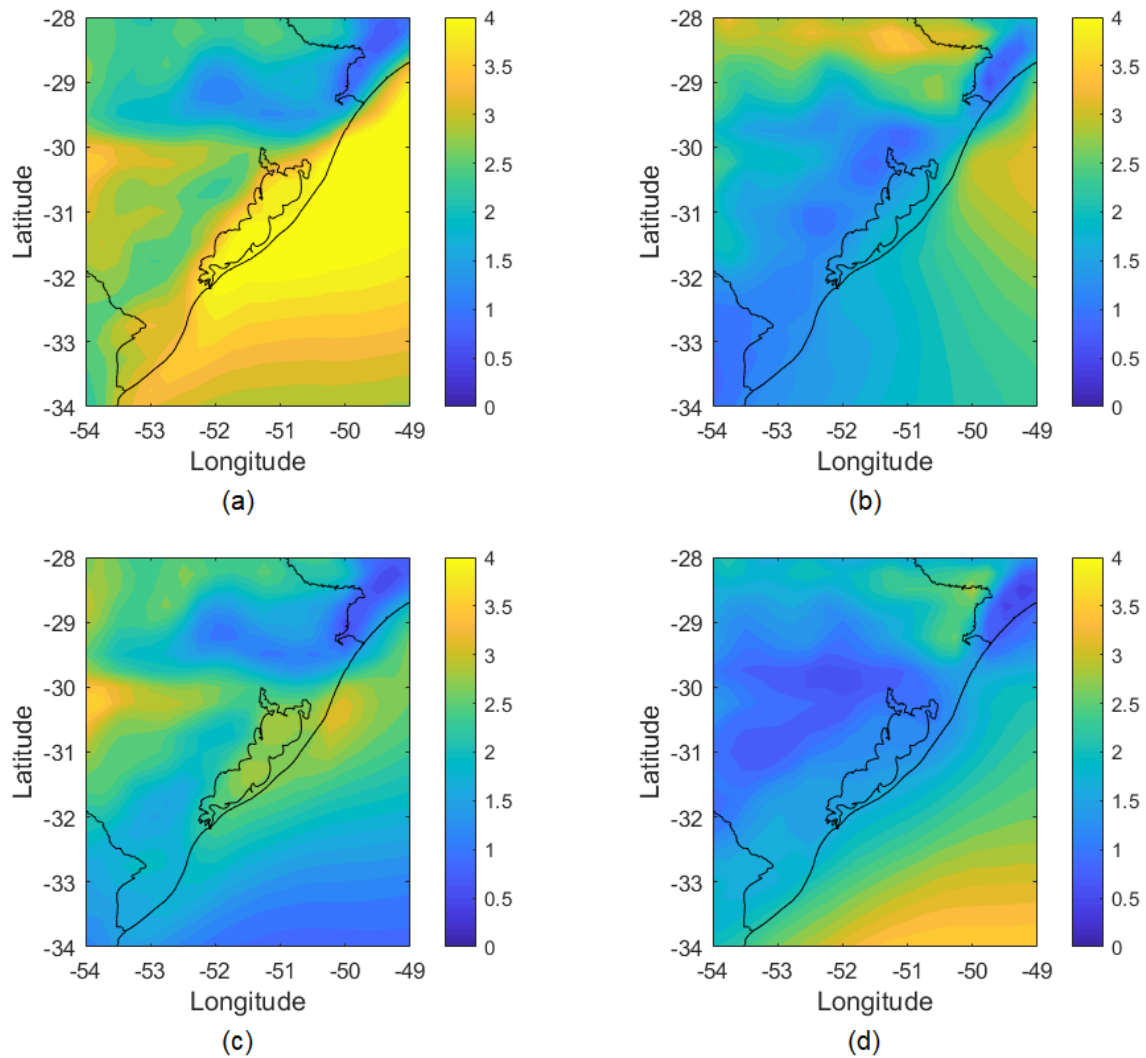


Figura 7.3: Padrão mais frequente da velocidade do vento para os grupos (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4, utilizando o método de Lund decomposto em modo T para os dados do ERA5.

7.4 Apêndice 4 - Método de Lund decomposto em modo T para o RCP 2.6 do cenário futuro.

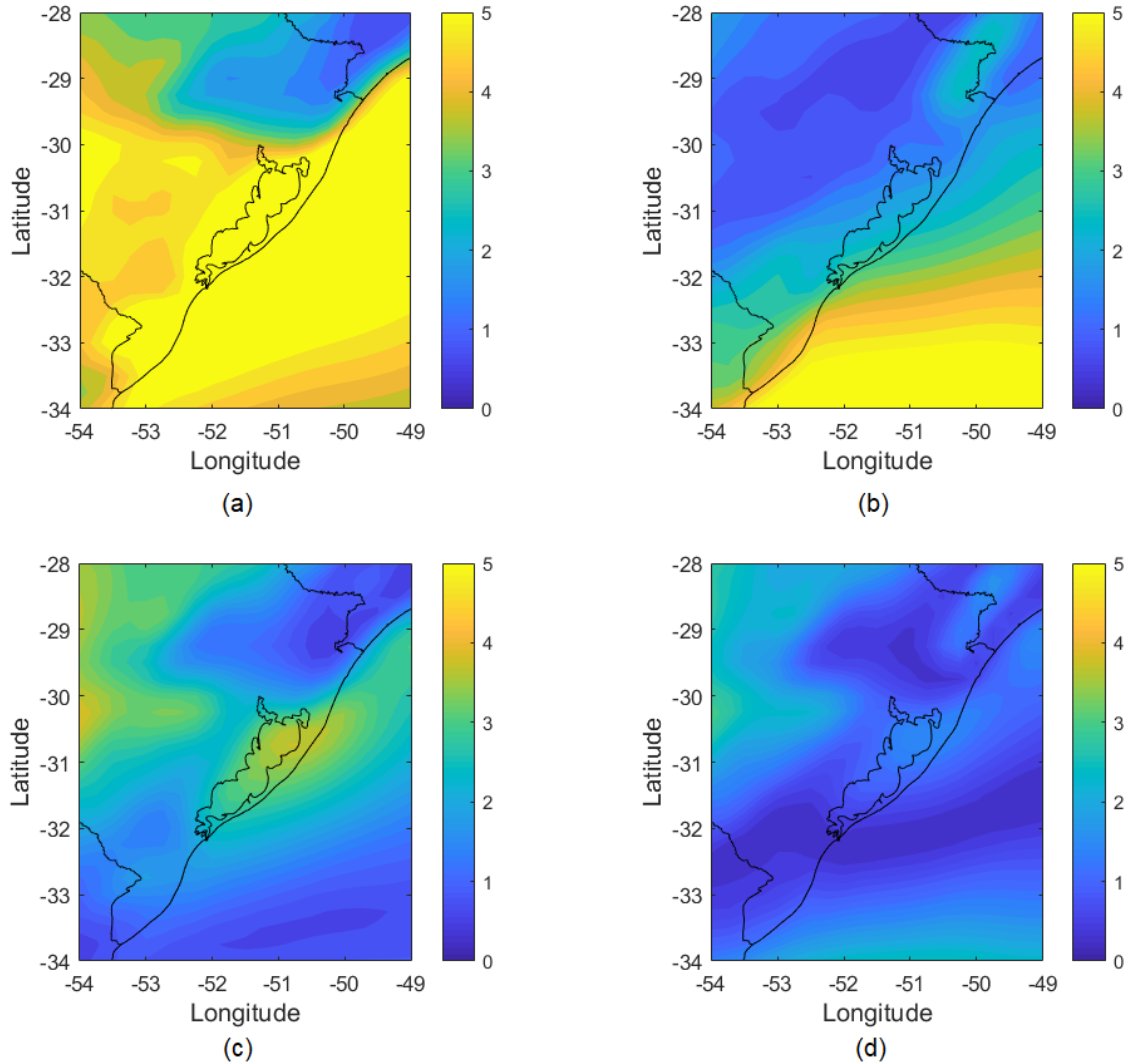


Figura 7.4: Padrão mais frequente da velocidade do vento para os grupos (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4, utilizando o método de Lund decomposto em modo T para os dados do RCP 2.6.