



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16643-TDI/1606

**ESTUDO DO IMPACTO DAS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NO POTENCIAL EÓLICO DO ESTADO
DO RIO GRANDE DO SUL. PARA OS PERÍODOS DE
2010 A 2040 E 2070 A 2100**

Marcelo Pizzuti Pes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada
pelo Dr. Enio Bueno Pereira, aprovada em 27 de novembro de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/11.15.16.15>>

INPE
São José dos Campos
2010

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16643-TDI/1606

**ESTUDO DO IMPACTO DAS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NO POTENCIAL EÓLICO DO ESTADO
DO RIO GRANDE DO SUL. PARA OS PERÍODOS DE
2010 A 2040 E 2070 A 2100**

Marcelo Pizzuti Pes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada
pelo Dr. Enio Bueno Pereira, aprovada em 27 de novembro de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/11.15.16.15>>

INPE
São José dos Campos
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Pes, Marcelo Pizzuti.

P436es Estudo do impacto das mudanças climáticas no potencial eólico do estado do Rio Grande do Sul. Para os períodos de 2010 a 2040 e 2070 a 2100 / Marcelo Pizzuti Pes. – São José dos Campos : INPE, 2010.

172 p. ; (INPE-16643-TDI/1606)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

Orientador : Dr. Enio Bueno Pereira.

1. Energias renováveis. 2. Potencial eólico. 3. Mudanças climáticas. 4. Energia eólica. 5. Densidade de potência. I.Título.

CDU 621.548

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

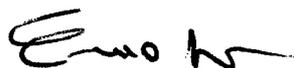
**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Meteorologia**

Dr. Luciano Ponzi Pezzi



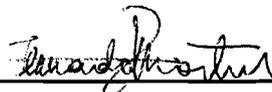
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Enio Bueno Pereira



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Fernando Ramos Martins



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Roberto Fernando da Fonseca Lyra



Convidado(a) / UFAL / Maceió - AL

Aluno (a): Marcelo Pizzuti Pes

São José dos Campos, 27 de novembro de 2009

*A meus pais,
José Pes e Darca Pes*

AGRADECIMENTOS

A meus pais, por todo apoio e carinho e a presença sempre constante apesar da distância, e por sempre acreditarem em mim.

A meu irmão, Maiquel, que sempre esteve do meu lado incondicionalmente, grande amigo e confidente.

Agradecimento especial ao meu orientador, Dr. Enio Bueno Pereira, que se dispôs em orientar-me, pelo voto de confiança, pela paciência e pelo tempo dedicado a para me ensinar e até mesmo discutir assuntos de ordem pessoal.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – e ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos pela oportunidade de realizar o mestrado, pelos dados e instalações.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – pelo auxílio financeiro de dois anos de bolsa de mestrado concedida.

Ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DCEA -, ao Banco Nacional de Dados Oceanográficos – BNDO – e ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET – pelos dados empregados nesta dissertação.

A todos os professores do Curso de Pós-graduação em Meteorologia do CPTEC e a todos os professores do Curso de Física da Universidade Federal de Santa Maria, por todos os conhecimentos e experiências transmitidos, que muito contribuíram para a realização de meus trabalhos.

Agradecimentos aos professores e pesquisadores do CPTEC, Dra. Chou Sin Chan e Dr. Clóvis Sansigolo, pela disposição dos dados de modelo, pelos ensinamentos e ajuda em sanar minhas dúvidas.

Ao Dr. Fernando Ramos Martins pelo apoio, pelo empenho e disposição na discussão de assuntos relevantes à dissertação de mestrado.

Agradecimento especial ao Dr. Nelson Jorge Schuch, meu primeiro orientador em pesquisa, grande amigo e incentivador, pessoa que me deu a oportunidade de seguir o caminho da ciência e que sempre procurou ensinar-me princípios humanos que vão muito além da área acadêmica.

Aos colegas do grupo de pesquisa, pela companhia diária, pela amizade e pelos conhecimentos transmitidos. Aos colegas de apartamento, pelo companheirismo, amizade e paciência ao longo de todo o mestrado.

A todas as pessoas que de alguma maneira participaram dessa etapa de aprendizado.

RESUMO

O presente trabalho consistiu em desenvolver uma metodologia para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre o potencial eólico na região Sul do Brasil. Para esse estudo usou-se séries climatológicas observacionais, reanálises ERA40 de 1960 a 2007 e os prognósticos do modelo climático Eta HadCM do CPTEC, para o cenário climático A1B até 2100. Após a qualificação das séries de dados, calculou-se o BIAS, RMSE e R para validar modelo Eta HadCM a partir de séries climatológicas observacionais e de reanálises com períodos entre 30 e 50 anos ao nível de 10 metros. Também realizou-se o teste de tendência de Kendall a um nível de confiança de 95% a todas as séries. Empregou-se o software WAsP – Wind Atlas Analysis and Application Program – para as regiões de interesse a fim de obter a distribuição do vento e o potencial eólico ao nível de 50 metros mais detalhado para uma grade de 40 km. Além disso, foram gerados os campos de vento (m.s^{-1}), densidade de potência (W.m^{-2}) e variação em porcentagem do potencial eólico a partir dos dados do modelo Eta HadCM. Cinco estações observadas apresentaram tendência significativa a um nível de confiança de 95%. De todas as séries analisadas para o mesmo período, nenhuma apresentou a mesma tendência para as três diferentes origens dos dados. Observou-se que os menores erros sistemáticos ocorreram em regiões que possuem relevo e vegetação mais homogêneos. As maiores variações ocorrem no período de setembro a novembro em até 14 W.m^{-2} na densidade de potência vento ao nível de 10 metros. Na média da velocidade do vento a 50 metros de altura para uma área de $40 \times 40 \text{ km}$ obtidos com o uso do WAsP, a estação de Chuí, Mostardas, Rio Grande e Torres apresentaram valores coerentes com os atlas eólicos do Brasil e do Rio Grande do Sul. Destas estações, Porto Alegre, Santa Maria e Uruguaiana apresentaram velocidade do vento superior aos dados dos atlas eólicos, chegando a uma diferença de $2,17 \text{ m.s}^{-1}$. Os campos de vento do modelo mostram um aumento médio de até 10% no potencial eólico na região de estudo até o ano 2100. Em termos de densidade de potência, as previsões médias sazonais do modelo até 2100 mostram que o período de dezembro a janeiro apresenta a maior atenuação na densidade de potência do vento, cerca de 10% a 40% enquanto de março a maio houve um ganho de 10% a 20% na densidade de potência média. O aumento torna-se sistemático até os meses de setembro a novembro, variando em intensidade de densidade de potência e aumento da área com maior intensidade de vento. Os meses de junho a agosto apresentam aumento de até 10% em todo o estado, com uma pequena área na região norte, onde o aumento pode chegar a 20%. Já nos meses de setembro a novembro ocorre o maior aumento na densidade de potência, acima de 20% e podendo chegar a 40% na região oeste do estado. As discrepâncias e erros entre as observações e o modelo, reveladas pelo BIAS, RMSE, R e análise de tendência de Kendall mostram as dificuldades de usar grandes séries observacionais quando não se tem o conhecimento do histórico das estações e dos efeitos da variação da topografia para a saída de vento a 10 metros do modelo Eta HadCM. Portanto o grau de incerteza dos resultados deve-se às possíveis imprecisões dos dados observados e aos erros de modelo.

**STUDY OF THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGES ON THE WIND
POTENTIAL FOR THE STATE OF RIO GRANDE DO SUL FOR THE
PERIODS OF 2010 TO 2040 AND 2070 TO 2100.**

ABSTRACT

In this work we developed a methodology for assessing the climate change impacts on the wind energy potential in Southern Brazil. For this study, we used observational climatological series, ERA40 reanalysis, from 1960 to 2007, and predictions of Eta HadCM climate model of CPTEC, for the A1B climate scenario by 2100. After qualifying the data series, we calculated the BIAS, RMSE and R to validate the Eta HadCM model from observational climatological series of the reanalysis, with periods between 30 and 50 years, at level of 10 meters. We also performed the Kendall trend test at 95% confidence level to all series. We used the software Wind Atlas Analysis and Application Program - WASP - on the interest regions. Based on that, we obtained the distribution of wind and wind energy potential at level of 50 meters for a grid of 40 km. Furthermore, the wind fields (m.s^{-1}), power density (W.m^{-2}), and change in percentage of wind power from the Eta HadCM model data were generated. Five observed stations showed significant trend at 95% level of confidence. From all series analyzed for the same period, none of them showed the same trend for the three different data sources. We observed the lowest systematic errors occurred in the regions with topography and vegetation more homogeneous. The biggest changes, occurred in the period from September to November, showed values up to 14 W.m^{-2} in the wind power density at level of 10 meters. At 50 meters high for an area of $40 \times 40 \text{ km}$ obtained by using WASP for the Chui, Mostardas, Rio Grande, and Torres stations, the average wind speed values were consistent with the wind atlas of Brazil and Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Santa Maria, and Uruguaiana stations presented wind speed higher than the wind atlas, reaching a difference of $2,17 \text{ m.s}^{-1}$. The wind fields of the model showed an average increase up to 10% in wind power in the region under study by the year 2100. In terms of power density, the seasonal average predictions of the model by the year 2100 showed that the period from December to January had the highest attenuation in the power density of the wind: about 10% to 40%. On the other hand, between March and May, there was a gain of 10% to 20% in the average power density. The increase becomes systemic to the months September to November, varying in the intensity of power density and increase in the area with greater intensity of wind. From June to August, an increase of 10% across the state was observed, with a small area in the north, where the increase may reach to 20%. From September to November, the biggest increase in power density was detected, above of 20% and may reach to 40% in the west of the state. The discrepancies and errors between observations and model, revealed by BIAS, RMSE, R, and Kendall trend analysis, showed the difficulties of using large observational series. This happens specially when we are not aware of the historic of the seasons and the effects of variation in topography to the output of wind 10 meters from the Eta HadCM model. Therefore, the uncertainty of the results is due to the possible inaccuracies of the observed data and to model errors.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

1. INTRODUÇÃO.....	33
1.1. Matriz Energética Brasileira	33
1.2. Mudanças Climáticas e seu impacto no potencial eólico.....	35
1.3. Justificativa e Objetivos	38
2. VENTO E A ATMOSFERA TERRESTRE	41
2.1. Camada Limite Superficial (CLS)	44
2.2. Camada Limite Convectiva (CLC)	44
2.3. Camada de Transição (CT)	45
2.4. Circulação Geral da Atmosfera.....	45
2.5. Ventos de Superfície	48
2.5.1. Vento Geostrófico	49
2.5.2. Vento Gradiente	51
2.5.3. O efeito do Atrito	52
2.5.4. Gradiente vertical da velocidade do vento	54
2.5.5. Obstáculos de superfície	56
2.6. Ventos Locais.....	56
2.7. Medidas do vento e sua avaliação.....	58
2.7.1. Distribuição Estatística de Weibull.....	59
2.8. A Física da Energia dos Ventos	62
2.8.1. Potência do Vento	62
3. REGIÃO DE ESTUDO	65
3.1. Ventos em superfície no Rio Grande do Sul.....	66
4. MATERIAIS E MÉTODOS	71
4.1. MODELO ETA.....	71
4.1.1. Grade Horizontal.....	71
4.1.2. Coordenada Vertical	72
4.1.3. Topografia.....	74

4.1.4. Modelo Eta Climático	75
4.2. WAsP – Wind Atlas Analysis and Application Program	78
4.2.1. Análise de dados Brutos.....	79
4.2.2. Geração de atlas de vento.....	79
4.2.3. Estimativa da Climatologia do Vento	80
4.2.4. Estimativa do potencial eólico	80
4.3. Dados	81
4.3.1. Dados observados	81
4.3.2. Reanálises – ERA-40	83
4.3.3. Modelo climático empregado.....	83
4.3.4. Dados de topografia	83
4.3.5. Dados de vegetação.....	84
4.4. Controle de Qualidade dos Dados de Campo	86
4.5. Análise das séries históricas - Teste de Kendall	88
4.6. Avaliação das Predições do Eta HadCM	90
5. RESULTADOS.....	93
5.1. Validação dos dados observados.....	94
5.2. Análise de tendência dos dados observados	94
5.3. Validação do modelo Eta HadCM	96
5.3.1. Topografia do Modelo Eta HadCM	97
5.3.2. Determinação de <i>R</i> , BIAS E RMSE.....	100
5.4. Análise dos períodos do Modelo Eta HadCM para a Região Sul	121
5.5. Análise das séries com uso do WAsP	130
5.5.1. Chuí.....	131
5.5.2. Mostardas	132
5.5.3. Rio Grande	132
5.5.4. Porto Alegre	133
5.5.5. Torres	134
5.5.6. Santa Maria	135
5.5.7. Uruguaiana.....	135
5.6 Discussões.....	138
6. CONCLUSÕES.....	145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	149
APÊNDICE A.....	157

APÊNDICE B 161
APÊNDICE C 165

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 – Oferta interna de energia elétrica no Brasil por fonte energética.....	34
2.1 – Perfil vertical da atmosfera determinado pela variação da temperatura em função da altitude. No eixo direito, a variação da pressão atmosférica em função da altura.	41
2.2 – Representação da Camada Limite Atmosférica (boundary layer) e da Atmosfera Livre.	43
2.3 – Balanço da radiação média do hemisfério norte. Pode-se considerar que esse balanço também ocorre para o Hemisfério Sul.	46
2.4 – Modelo da circulação global atmosférica, indicando a estrutura vertical das células de circulação e os ventos próximos à superfície. A relação entre o tamanho da atmosfera e da Terra está ampliada para facilitar a visualização.	48
2.5 – Componente x da força gradiente de pressão agindo sobre um elemento de fluido.	49
2.6 – Esquema representativo do vento geostrófico.	50
2.7 – Balanço das forças para o HS entre a força de Coriolis, Força centrípeta e força gradiente de pressão. (a) Centro de baixa pressão – ciclone; (b) Centro de alta pressão – anticiclone.	51
2.8 – Esquema mostrando o balanço entre força gradiente de pressão, força centrífuga e força de Coriolis para regiões em que as isóbaras são retas e regiões em que formam curvas.	52
2.9 – Escoamento laminar de um fluido devido ao deslocamento da placa superior em relação à inferior em repouso.	53
2.10 – Distribuição vertical do regime de circulação do vento.	54
2.11 – Distúrbios do vento devido a um obstáculo.	56
2.12 – Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma.	60
2.13 – Relação entre a intensidade da turbulência I da velocidade do vento e o parâmetro de forma k da função de Weibull.	61

3.1 – Região Sul, abrangendo os estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Toda a região costeira é banhada pelo oceano Atlântico Sudoeste.	65
3.2 – Direção predominante do vento a 50 metros para a região de estudo.	68
3.3 – Variação sazonal da velocidade média do vento no Rio Grande do Sul.	69
3.4 – Velocidade média anual do vento para o estado do Rio Grande do Sul.	70
4.1 – Grade horizontal tipo E de Arakawa.	72
4.2 – Representação do método da silhueta.	74
4.3 – Seção vertical idealizada da topografia do modelo Eta e distribuição das variáveis (u, T, p_s) na vertical.	75
4.4 – Concentração real de CO ₂ na atmosfera até o ano 2000. A partir de 2000 observa-se a concentração de CO ₂ para os cenários de emissões do IPCC em partículas por milhão (ppm).	77
4.5 – Localização das estações de superfície utilizadas, no estado do Rio Grande do Sul.	82
4.6 – Classes de vegetação no estado do Rio Grande do Sul.	85
4.7 – Topografia GTOPO30 para a região de Santa Maria. O mapa apresenta o relevo (isolinhas) e classes de vegetação em um único arquivo para a região de Santa Maria. A estação está localizada no centro. A altitude aumenta no sentido verde-vermelho-azul.	86
4.8 – Fluxograma representativo do algoritmo empregado para qualificação dos dados de direção e velocidade do vento.	88
5.1 – Topografia de 40x40 km referente às grades do modelo Eta HadCM. A escala representa a altitude do continente em relação ao nível do mar, o qual está representado em azul. Por convenção, o nome do ponto de grade foi determinado com base no nome da estação que está inserida dentro desse domínio. As estações estão representadas por pontos amarelos.	99
5.2 – Diagrama de dispersão das médias mensais da velocidade do vento a 10 metros para as estações de Chuí, Mostardas, Porto Alegre e Rio Grande.	102
5.3 – Diagrama de dispersão das médias mensais da velocidade do vento a 10 metros para as estações de Santa Maria, Torres e Uruguaiana.	103
5.4 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações para a estação de Chuí no período de 1964 a 1990.	105

5.5 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de Chuí no período de 1964 a 1990.	105
5.6 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações para a estação de Mostardas no período de 1965 a 1990.	106
5.7 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de Mostardas no período de 1965 a 1990.	106
5.8 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações da estação de Rio Grande no período de 1960 a 1990.	107
5.9 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de Rio Grande no período de 1960 a 1990.	107
5.10 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações para a estação de Porto Alegre no período de 1960 a 1990.	108
5.11 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de Porto Alegre no período de 1960 a 1990.	108
5.12 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações para a estação de Torres no período de 1961 a 1990.	109
5.13 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de Torres no período de 1961 a 1990.	109
5.14 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações para a estação de Santa Maria no período de 1960 a 1990.	110
5.15 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de Santa Maria no período de 1960 a 1990.	110
5.16 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações para a estação de Uruguaiana no período de 1960 a 1990.	111

5.17 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de Uruguaiana no período de 1960 a 1990.	111
5.18 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Chuí.	114
5.19 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Chuí.	114
5.20 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Mostardas.	115
5.21 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Mostardas.	115
5.22 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Rio Grande.	116
5.23 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Rio Grande.	116
5.24 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Porto Alegre.	117
5.25 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Porto Alegre.	117
5.26 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Torres.	118
5.27 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Torres.	118
5.28 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Santa Maria.	119
5.29 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Santa Maria.	119

5.30 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Santa Maria.....	120
5.31 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Uruguaiana.	120
5.32 – Velocidade média do vento a 10 metros para (a) período atual (1960-1990) e (b) período A1B (2010-2040).....	122
5.33 – Velocidade média do vento a 10 metros para (a) período atual e (b) período A1B (2010-2040).	122
5.34 – Diferença da velocidade média do vento a 10 metros para o Período A1B (2010-2040) (a) e o Período A1B (2070-2100) (b) em relação ao período atual.	123
5.35– Variação da densidade média de potência entre as previsões do modelo Eta HadCM e o período atual, em W/m ² considerando uma densidade do ar como sendo 1,10 kg/m ³ . (a) Densidade de Potência A1B (2010-2040) menos Referência; (b) Densidade de Potência A1B (2070-2100) menos Referência.....	124
5.36 – Variação da densidade de potência média entre as previsões do Eta HadCM e o período atual, em porcentagem. (a) Variação da Densidade de Potência (%) A1B (2010-2040) menos Referência; (b) Variação da Densidade de Potência (%) A1B (2070-2100) menos Referência.....	124
5.37 – Variação sazonal da densidade média de potência ao nível de 10 metros para os períodos do Cenário A1B em relação ao período atual; (a) DJF, A1B (2010-2040) menos Referência; (b) DJF, A1B (2070-2100) menos Referência; (c) MAM, A1B (2010-2040) menos Referência; (d) MAM, A1B (2070-2100) menos Referência.....	126
5.38 – Variação sazonal da densidade média de potência do vento ao nível de 10 metros para os dois períodos do Cenário A1B em relação ao período atual. (a) JJA, A1B (2010-2040) menos Referência; (b) JJA, A1B (2070-2100) menos Referência; (c) SON, A1B (2010-2040) menos Referência; (d) SON, A1B (2070-2100) menos Referência.....	127

- 5.39 – Variação sazonal em porcentagem de densidade de potência do vento ao nível de 10 metros para os dois períodos do Cenário A1B em relação ao período atual. (a) DJF, A1B (2010-2040) menos Referência; (b) DJF, A1B (2070-2100) menos Referência; (c) MAM, A1B (2010-2040) menos Referência; (d) MAM, A1B (2070-2100) menos Referência.128
- 5.40 – Variação sazonal em porcentagem da densidade de potência do vento ao nível de 10 metros para os dois períodos do Cenário A1B em relação ao período atual, para inverno e primavera. (a) JJA, A1B (2010-2040) menos Referência; (b) JJA, A1B (2070-2100) menos Referência; (c) SON, A1B (2010-2040) menos Referência; (d) SON, A1B (2070-2100) menos Referência.....129

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1.1 – Emissões globais naturais e antropogênicas de SO ₂ e NO _x	36
1.2 – Emissões de dióxido de carbono por região, 1990-2030. (Bilhões de Toneladas métricas).....	37
2.1 – Valores para rugosidade para o tipo de terreno.....	55
4.1 – Localização das estações, fonte dos dados e período das séries utilizadas...81	
5.1 – Número total de dados originais das séries temporais empregadas no trabalho e dados excluídos com o uso do algoritmo de qualificação para valores de velocidade e direção do vento.	94
5.2 – Resultados de tendência obtidos com o teste de Kendall para as séries de dados observados.....	95
5.3 – Resultados de tendência obtidos com o teste de Kendall para as séries de dados do Eta HadCM para o período atual.....	96
5.4 – Resultados de tendência obtidos com o teste de Kendall para as séries de dados de reanálise ERA-40 para o período atual.....	96
5.5 - Valores de R, BIAS e RMSE entre as séries observadas e séries do período atual do modelo Eta CCS e do modelo HadRM3P.....	100
5.6 – Correlação de Pearson entre dados observados e período atual do modelo Eta HadCM para valores sazonais.....	101
5.9 – Coeficiente de determinação de correlação entre o modelo Eta HadCM e as estações de superfície.	103
5.10 – Valores dos erros médios relativos obtidos nos gráficos das Figuras 5.4 a 5.17 envolvendo observações e modelo.	112
5.11 - Coeficiente de determinação de correlação entre o modelo Eta HadCM e as reanálises.	113
5.12– Valores dos erros médios relativos obtidos nos gráficos das Figuras 5.18 a 5.31.	121
5.13 – Valores médios para os parâmetros de distribuição do vento, velocidade média e potência para a estação de Chuí, para uma área de 40x40 km.....	131

5.14 – Valores médios dos parâmetros de distribuição do vento, velocidade média e potência para a estação de Mostardas, para uma área de 40x40 km.....	132
5.15 – Valores médios dos parâmetros de distribuição do vento, velocidade média e potência para a estação de Rio Grande, para uma grade de 40x40 km....	133
5.16 – Valores médios dos parâmetros de distribuição do vento, velocidade média e potência para a estação de Porto Alegre, para uma grade de 40x40 km..	134
5.19 – Valores médios dos parâmetros de distribuição do vento, velocidade média e potência para a estação de Uruguaiana, para uma grade de 40x40 km. ..	136
5.20 – Intervalo de velocidade média anual e direção do vento a 50 metros predominante das regiões de estudo, obtido a partir do Atlas Eólico Brasileiro e do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul.	136

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Parâmetro de escala de Weibull.

A – Área de forma circular interceptada pelo vento. Expressa em metros quadrados (m^2).

$C_{P, \text{Betz}}$ – Constante de potência.

C_1 e C_2 – funções da estabilidade térmica da atmosfera.

d – Espaçamento entre os pontos h ou v .

ρ – Densidade do ar. Expressa em $kg.m^{-3}$.

E – Energia cinética do vento. Expressa em $m^2.s^{-2}$.

E – Grade horizontal utilizada pelo Modelo Eta (grade de Arakawa).

f_R – Função de distribuição de Rayleigh.

f_w – Função de distribuição de Weibull.

f – frequência máxima de ocorrência de uma determinada velocidade do vento V apresentada na curva de distribuição de Weibull. Expressa em %.

F_{ce} – Força centrífuga. Expressa em Newtons (N).

F_{co} – Força de Coriolis. Expressa em Newtons (N).

h – Pontos de massa onde são definidas diferentes variáveis do modelo.

h, h_1 – Altura de Referência do vento medido, expressa em metros.

h_2 – Altura do vento estimado, expressa em metros.

F_p – Força do gradiente de pressão. Expressa em Newtons (N).

H – Altura do obstáculo de ventos, expressa em metros.

I – Intensidade da turbulência da velocidade do vento.

K – Constante de Von Karman da corrente de ar da camada limite (aproximadamente 0,4).

k – Parâmetro de forma de Weibull.

m – Massa de um determinado volume de ar.

m/s – Metros por segundo. Unidade de medida de velocidade do vento. Também expresso por $m.s^{-1}$.

η – Coordenada vertical eta.

\vec{w} – Velocidade vertical do modelo Eta.

σ_{vento} – Desvio padrão do vento. Expresso em m/s.

σ – Coordenada sigma do Modelo Eta.

P_{vento} – Potência do vento, expressa em Watts por metro quadrado (W/m^2).

$P_{\text{máx}}$ – Potência máxima do vento em W/m^2 .

$P_{\text{méd}}$ – Potência média do vento em W/m^2 .

$P_{\text{mín}}$ – Potência mínima do vento em W/m^2 .

P_{Betz} – Potência máxima possível de ser extraída do vento.

p – Pressão atmosférica. Expressa em milibares (mb) ou ou hecto Pascais (hPa).

p_{sfc} – Pressão atmosférica no nível da superfície. Expressa em milibares (mb) ou ou hecto Pascais (hPa).

p_T – Pressão atmosférica no topo do domínio do modelo Eta expressa em milibares (mb) ou hecto Pascal (hPa).

p_{ref} – Pressão de referência expressa em milibares (mb) ou hecto Pascal (hPa).

τ_x – Tensão de cisalhamento.

u_z – Velocidade vertical do vento. Expressa em m/s.

U – Representação da velocidade média do vento na distribuição de Weibull fornecida pelo WASP, em m/s .

v – Representa as componentes verticais e horizontais do vento no modelo Eta.

v – Velocidade do vento medido, expresso em m/s .

\bar{v} – Velocidade média do vento, expressa em m/s .

v^* – Velocidade de fricção do vento, expressa em m/s .

V_g – vento geostrófico, expresso em m/s .

Z – Distância entre as placas de fluido. Expressa em milímetros (mm).

z_{sfc} – Altitude da superfície expressa em metros.

z_0 – Comprimento de rugosidade da superfície determinado pelas características da superfície. Expresso em m .

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A1, A1B, A2, A1T, B1, A1FI – Cenários de Emissões do Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (RECE) do IPCC.

AL – Atmosfera Livre.

ATLSW – Oceano Atlântico Sudoeste.

BNDO – Banco Nacional de Dados Oceanográficos.

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.

CI – Camada Interfacial.

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia.

CLP – Camada Limite Planetária. Também denominada Camada Limite Atmosférica (CLA).

CLS – Camada Limite Superficial.

cP – massa de ar Continental Polar Antártico.

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.

CT – Camada de Transição.

EIA – Energy Information Administration.

EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos.

GCM – General Circulation Model. Modelo de Circulação Geral da Atmosfera.

GDFL – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory.

GTOPO30 – Global 30 Arc-Second Elevation. Modelo digital de elevação (DEM) com grade horizontal espaçada de 30 segundos, aproximadamente 1 km.

HN – Hemisfério Norte.

HS – Hemisfério Sul.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

ICEA – Instituto de Controle do Espaço Aéreo.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change.

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia.

MEASNET – Measuring Network of Wind Energy Institutes.

mP – massa de ar marítima Polar Antártica.

NCEP – National Centers for Environmental Prediction.

OMM – Organização Mundial de Meteorologia.

PCD – Plataforma de coleta de dados.

PRECIS – Modelo do Hadley Centre da Grã Bretanha, utilizado para obter cenários com resolução de 50 km.

PR – Estado do Paraná.

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica.

RS – Estado do Rio Grande do Sul.

SC – Estado de Santa Catarina.

SERES – Special Report on Emissions Scenarios. Relatório Especial sobre os Cenários de Emissões do IPCC.

SEMC – Secretaria de Energia, Minas e Comunicação do Estado do Rio Grande do Sul.

SONDA – Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais para o setor de energia.

SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment. Programa para desenvolvimento do setor energético solar e eólico patrocinado pelo PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) e GEF (Fundo Global para o Meio Ambiente).

TSM – Temperatura na Superfície do Mar.

WAsP – Wind Atlas Analysis and Application Program.

1. INTRODUÇÃO

Durante toda a história e pré-história da humanidade, a evolução da raça humana esteve sempre ligada à captação de energia do meio ambiente. O grau de desenvolvimento de uma nação está relacionado com a sua demanda por energia. Segundo Goldemberg e Villanueva (2003), o consumo de energia cresceu muito desde que o homem consumia 12 mil kcal.dia⁻¹ há mais de 2000 anos até os dias de hoje, em que o homem moderno consome em média 230 mil kcal.dia⁻¹, resultando em um crescimento de aproximadamente 2000% no consumo de energia per capita. Esse crescimento na demanda de energia é acompanhado do aumento do uso de combustíveis fósseis, ao longo do desenvolvimento industrial e do processo de urbanização a partir do século XVIII.

A consequência da queima desses recursos fósseis é a emissão de diversos gases responsáveis pelo efeito estufa, especialmente o dióxido de carbono (CO₂), o qual é considerado como uma das principais causas das Mudanças Climáticas do planeta, além de ser prejudicial à saúde humana, ao meio ambiente, agricultura e recursos hídricos (CAO, 2004).

O cenário energético mundial vem buscando formas de garantir o suprimento de energia e diminuir a sua dependência de combustíveis fósseis em função dos acordos de redução de emissão de gases do efeito estufa e devido ao fato das reservas de fontes de origem fóssil serem finitas. As energias renováveis e limpas, tais como a solar, a eólica, a hídrica e a biomassa, por exemplo, apresentam-se como a melhor opção para esse fim. No entanto, alguns estudos mostram que as mudanças no clima mundial podem afetar os recursos de energias renováveis, conforme discutido no item 1.2.

1.1. Matriz Energética Brasileira

O Brasil é uma economia emergente e tem sua matriz energética baseada principalmente na energia hidráulica, a qual representa 77% da oferta interna de energia elétrica (Figura 1.1) (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2008).

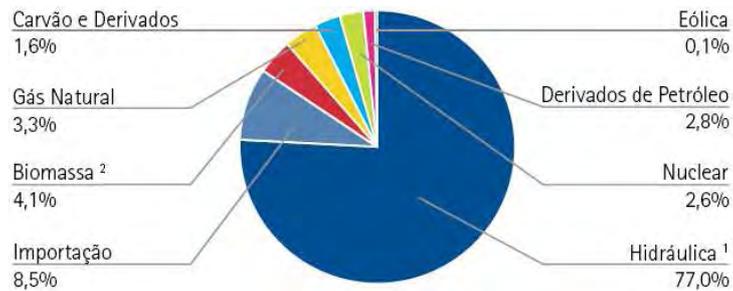


Figura 1.1 – Oferta interna de energia elétrica no Brasil por fonte energética.
Fonte: Adaptado de Balanço Energético Nacional (2008).

A conversão de energia hidráulica em elétrica é uma forma de geração de energia com baixa emissão de poluentes, porém os reservatórios das usinas hidrelétricas causam impacto ambiental devido ao alagamento de grandes áreas causando danos a fauna e flora local e produzindo modificações no micro-clima local. Além disso, estudos realizados por Fearnside (2005) mostram que gases do efeito estufa, principalmente o Metano (CH₄), são emitidos para atmosfera como consequência de processos de degradação anaeróbica da matéria orgânica que ocorrem em áreas alagadas. Também, a geração de energia hidráulica é altamente dependente do regime de chuvas, sendo vulnerável a períodos de estiagem, como no caso da crise enfrentada pelo setor energético brasileiro no entre 1999 e 2001.

Embora países como o Brasil tenham como componente principal de sua matriz energética uma fonte renovável como a hidráulica, a demanda energética mundial ainda depende fortemente dos combustíveis fósseis, como o petróleo, carvão e gás natural. Segundo dados do Balanço Energético Nacional 2008 com ano base 2007, a maior parte da energia consumida pelo setor de transportes brasileiro também é proveniente dos combustíveis fósseis, e que o petróleo e seus derivados representam a maior parte da matriz energética primária brasileira, totalizando 36,7% (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2008).

O Brasil apresenta diversas opções energéticas para impulsionar seu desenvolvimento, entre elas está a energia eólica (PEREIRA, 2007). Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE et al., 2001), mais de 71.000 km² do território nacional possui velocidades de vento superiores a 7 m.s⁻¹ ao nível de 50 m, que é a altura típica dos aerogeradores no início dessa década.

A existência de uma abundante disponibilidade de ventos acima de 7 m.s^{-1} , necessária para viabilização econômica da geração de energia eólica, distribuída no território brasileiro, especialmente na costa do nordeste, aliada com a emergente necessidade de expansão do sistema de abastecimento elétrico tem levado a um crescimento na inserção dessa fonte na base energética nacional, principalmente após a implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, o PROINFA, implantado em 2004 pelo Ministério de Minas e Energia.

A maior parte do potencial eólico brasileiro está nas regiões litorâneas, principalmente nos estados do nordeste, devido aos ventos alísios (AMARANTE et al., 2001). O litoral sul também representa uma parte significativa desse potencial, tornando viável a exploração dessa fonte de energia. Os ventos no Brasil têm características excelentes para a geração de energia, medidas através de parâmetros estatísticos relacionados à sua estabilidade (PEREIRA, 2007).

1.2. Mudanças Climáticas e seu impacto no potencial eólico

As fontes não renováveis de energia lançam na atmosfera uma série de poluentes, tais como dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (NO_2), metano (CH_4), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO_2), clorofluorocarbonos (CFC's), entre outros (IPCC – SPECIAL REPORT ON EMISSIONS SCENARIOS, 2001). Historicamente, as emissões totais de CO_2 aumentaram a uma taxa de cerca de 1,7 % ao ano desde 1900 (NAKICENOVIC et al., 1996).

A principal consequência do aumento desses compostos na atmosfera é o desequilíbrio do efeito estufa natural do planeta (HARTMANN, 1994). Apesar de o efeito estufa ser um fenômeno natural da Terra, e responsável por manter a temperatura da atmosfera em condições adequadas para a existência de toda a vida no planeta, o aumento na concentração dos gases na atmosfera responsáveis por esse efeito altera o balanço de radiação da Terra, o que deve gerar um aumento na temperatura do globo.

Está muito claro que as atividades humanas têm alterado a atmosfera, e que, se continuarmos a emitir CO₂ e outros gases do efeito estufa haverá uma significativa mudança no clima global (HARTMANN,1994). Devemos lembrar que a última era do gelo envolveu apenas uma variação na temperatura média do planeta em torno de 4 °C (HOUGHTON, J., 2004).

Na Tabela 1.1, podemos verificar a emissão de SO₂ e NO_x e na Tabela 1.2 a emissão de CO₂, ambas as emissões por setor em escala global dadas em Tg/ano (teragramas/ano).

Tabela 1.1 – Emissões globais naturais e antropogênicas de SO₂ e NO_x.

	Emissões de SO ₂ (Tg/ano)	Emissões de NO _x (Tg/ano)
Atividades industriais	76	22
Queima de biomassa	2,2	-
Vulcões	9,3	6
Raios		5
Emissões biogênicas de áreas continentais	1,0	15
Emissões biogênicas dos oceanos	24	15
Total de emissões antropogênicas	78,2	27
Total de emissões naturais	34,3	21
Total de emissões	112,5	48

Fonte: Adaptado de Lee (2002).

A Tabela 1.2 mostra as emissões de CO₂ por região do globo classificando também o estágio de desenvolvimento da economia de cada região. Nela, podemos verificar que as economias mais desenvolvidas são as que mais emitem dióxido de carbono e que até 2030, a maior emissão em nível mundial será por parte das economias emergentes da Ásia, a exemplo da China.

Tabela 1.2 – Emissões de dióxido de carbono por região, 1990-2030. (Bilhões de Toneladas métricas)

Região	Histórico		Projeções				
	1990	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Economias Desenvolvidas	11.4	13.6	13.8	14.4	14.7	15.1	15.5
<i>America do Norte</i>	5.8	7.0	7.1	7.4	7.7	7.9	8.3
<i>Oeste da Europa</i>	4.1	4.4	4.5	4.7	4.8	4.8	4.8
<i>Ásia desenvolvida</i>	1.5	2.2	2.2	2.3	2.3	2.4	2.4
Economias em transição	9.8	14.5	17.3	20.0	22.3	24.5	26.8
Economias Emergentes	4.2	2.9	3.1	3.3	3.5	3.6	3.8
<i>Ásia</i>	3.6	8.2	10.2	12.2	13.9	15.7	17.5
<i>Oriente médio</i>	0.7	1.4	1.6	1.8	2.0	2.1	2.3
<i>África</i>	0.6	1.0	1.1	1.2	1.4	1.4	1.5
<i>America do Sul e Central</i>	0.7	1.1	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7

Fonte: Adaptado de Energy Information Administration (EIA). International Energy Outlook (2008).

O aquecimento global é motivo de muitas discussões em relação ao seu efeito no clima do planeta, nos níveis dos oceanos, variações na temperatura em diferentes regiões, derretimento das calotas polares, entre outros.

Para este trabalho, o vento em superfície, o qual é usado como forma de geração não poluente de energia, é o foco principal. Alguns estudos já foram feitos com esse fim, para determinar e compreender o que acontecerá com o regime dos ventos em diferentes regiões do planeta.

Breslow e Sailor (2001), utilizando saídas dos Modelos de Circulação Geral (GCM's) do Canadian Climate Center e Hadley Center, concluíram que haverá uma redução na velocidade dos ventos em superfície para os Estados Unidos da America (EUA). Essa redução será 1,0 a 3,5 % nos próximos 25 anos e de 1,4 a 4,5 % para os próximos 100 anos.

Sailor e Hart (2008) estudaram os efeitos das mudanças climáticas para o nordeste dos EUA. As saídas dos GCM's utilizadas foram extraídas das rodadas padronizadas do IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Os cenários analisados foram o A1B e o A2, do Relatório Especial sobre os Cenários de Emissões (Special Report on Emissions Scenarios - SRES). Esse estudo mostrou que a velocidade dos ventos na região nordeste dos EUA poderão ter uma redução

de 5 a 10 % no verão, enquanto que no inverno essa redução é muito pequena ou até mesmo pode haver um ligeiro aumento no potencial eólico.

O relatório da COPPE da Universidade do Rio de Janeiro, intitulado *Climate Change: Energy Report*, publicado em 2008, aborda a questão do potencial eólico brasileiro usando projeções futuras do modelo climático PRECIS para os cenários A2 e B2. Essas projeções foram comparadas com dados de ventos para o período atual do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) de 2001, para todo o território nacional. Os resultados mostram que a região da costa do nordeste terá ocorrências de ventos acima de 8,5 m/s aumentando ao longo das projeções. Porém, em outras regiões do país, a velocidade do vento diminuirá significativamente. O balanço dessas variações para as diferentes regiões mostra que o potencial eólico de 2100 em relação a 2001 terá um decréscimo de 31% para o cenário A2 e de 60% para o cenário B2.

1.3. Justificativa e Objetivos

Embora o potencial eólico instalado no Brasil seja de 550 MW, o território brasileiro possui um enorme potencial de ventos distribuídos ao longo de seu território, especialmente na costa do nordeste (SILVA et al., 2005).

A capacitação tecnológica da indústria nacional e o custo decrescente da eletricidade de origem eólica, quando associados ao grande potencial eólico nacional (143,5 GW segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro) tornam a energia eólica uma ótima alternativa para o setor energético brasileiro.

O Brasil passou, em pouco mais de 3 anos, de apenas cerca de 22 MW de energia eólica instalada, para os atuais 550 MW instalados <<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa>>. O interesse dos investidores na geração de energia eólica tem ultrapassado as projeções mais otimistas, com 441 fazendas eólicas registradas para o próximo leilão de energia que ocorrerá em novembro de 2009, elevando assim a capacidade potencial para essa fonte de

energia em mais de 13,3 GW, cerca de 30 vezes a capacidade eólica atual instalada.

É de grande importância para esses futuros projetos, os quais entrarão em vigor a partir de 2012, o conhecimento dos efeitos das Mudanças Globais nos ventos em superfície, tendo em vista que os projetos têm uma duração de 20 anos e estarão operando dentro do período de 2010 a 2040 onde existem as primeiras previsões dos modelos climáticos.

Dentro do cenário de exploração de energias renováveis, a Meteorologia tem um papel de grande importância no processo de exploração da energia eólica, pois é necessário um estudo sobre o vento: sua origem, climatologia, sazonalidade, efeitos de fenômenos meteorológicos e climatológicos, características eólicas de diferentes regiões, distribuição estatística dos ventos, entre outros fatores. Portanto, o estudo no setor eólico para fins energéticos tornou-se uma aplicação da Meteorologia, sendo esta, indispensável para a viabilização de qualquer projeto no setor de energia eólica.

O presente trabalho de mestrado em Meteorologia consiste em estudar os impactos das mudanças climáticas sobre o potencial eólico na região Sul do Brasil, desenvolvendo uma metodologia adequada e tendo como objetivo principal gerar informações que atendam ao setor energético fornecendo subsídios aos setores da iniciativa privada e de decisão do governo com relação a futuros investimentos na área de energia.

A região sul possui um grande potencial eólico, o qual já é explorado, em parte, pelo parque eólico de Osório, Índios e Sangradouro¹ com uma capacidade instalada de geração de energia de 150 MW, sendo atualmente a maior fazenda eólica em operação no Brasil e América Latina. Além disso, 86 projetos que fazem parte do leilão eólico são designados para o Rio Grande do Sul.

¹ Maior parque eólico da América Latina, localizado no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, no município de Osório. Possui uma potência instalada de 150 MW e constitui-se de 75 aerogeradores de 2MW cada, distribuídos em três parques: Sangradouro, Osório e Índios (<http://www.ventosdosulenergia.com.br/highres.php>).

Para esse estudo serão utilizadas as saídas do modelo Eta HadCM para o cenário climático A1B, saídas essas que compreendem períodos de 1960-1990, 2010-2040 e 2070-2100. A partir desse trabalho, pretende-se ampliar a área de estudo principalmente para a região nordeste onde está o maior potencial eólico do país, de acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE et al., 2001), aplicando a metodologia desenvolvida.

Para isso, foi realizada a validação dos dados do modelo Eta HadCM a partir de séries climatológicas observacionais com períodos entre 30 e 50 anos. Em seguida desenvolveu-se um estudo da climatologia atual do vento observado aplicando testes de tendência e também o emprego do software WAsP – Wind Atlas Analysis and Application Program – às séries de dados observacionais, às séries de reanálise ERA-40 e às séries dos cenários do modelo Eta HadCM para as regiões de interesse. Com isso visa-se obter as variações no potencial eólico para um nível de 50 metros determinado a partir das saídas do WAsP, utilizando saídas do modelo, observações e reanálises, todas em nível de 10 metros .

Com o emprego do Teste de Kendall às séries observacionais, espera-se conhecer as tendências climáticas atuais, e, a partir das previsões do modelo climático obter-se as tendências futuras na velocidade do vento.

Além disso, serão determinados os campos de ventos do modelo Eta HadCM e as variações de cada período futuro em relação ao período presente e também as variações no potencial eólico para cada local de estudo, que no total são sete estações em superfície.

2. VENTO E A ATMOSFERA TERRESTRE

A atmosfera é uma camada de gases com algumas centenas de quilômetros acima da superfície da Terra. O ar seco atmosférico é composto na maior parte de Nitrogênio (78%) e Oxigênio (21%). Na seqüência o gás mais abundante é o Argônio (1%), que é um gás nobre inerte (HARTMANN, 1994). O 1% restante dos componentes atmosféricos tem como principais gases o vapor d'água, Dióxido de Carbono, Ozônio, Metano, Oxido Nitroso e outros gases minoritários. Embora com concentrações extremamente baixas, os gases minoritários são importantes na absorção e emissão da energia radiante.

Na atmosfera terrestre, as massas de ar se movem devido aos gradientes de pressão causados pelas diferenças em suas condições termais. Ao incidir na atmosfera, a radiação solar causa aquecimentos diferenciados na superfície terrestre gerando um gradiente de temperatura em direção à linha do equador em ambos os Hemisférios da Terra. Esse movimento ocorre quando a energia térmica é transformada em energia cinética, e pode ocorrer tanto em escala global ou local.

Antes de discutir a os mecanismos de formação do vento na atmosfera, vejamos como esta é dividida. A atmosfera pode ser dividida de acordo com o perfil vertical da temperatura (Figura 2.1).

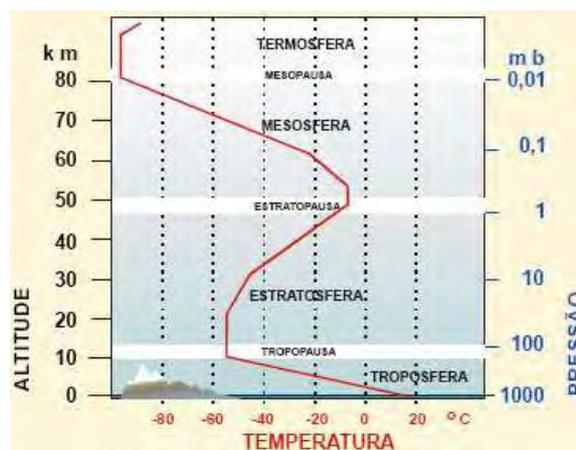


Figura 2.1 – Perfil vertical da atmosfera determinado pela variação da temperatura em função da altitude. No eixo direito, a variação da pressão atmosférica em função da altura.

Fonte: Adaptado de Varejão, 2006.

Nos primeiros quilômetros da atmosfera, em contato com a superfície da Terra, localiza-se a troposfera, que se entende a uma altura de aproximadamente 11 km a qual constitui aproximadamente 80% da massa total da atmosfera (STULL, 1988; ACKERMAN e KNOX, 2003). Na troposfera, a temperatura do ar para todo o planeta, diminui em termos médios com a altura cerca de $6,5 \text{ }^\circ\text{C.km}^{-1}$ (VAREJÃO, 2006) até chegar à região chamada tropopausa, que separa a troposfera da estratosfera.

Na estratosfera, a temperatura torna a aumentar com a altitude devido ao aumento da concentração de moléculas de ozônio², que absorve parte da radiação solar incidente na faixa espectral da radiação ultravioleta.

Após a estratopausa, localizada aproximadamente a 50 km da superfície do planeta, está a mesosfera. Nessa camada a temperatura volta a diminuir novamente com a altitude assim como na troposfera.

A mesopausa separa a mesosfera da termosfera numa altura média de aproximadamente 85 km. Na termosfera a temperatura continua aumentando com a altitude. Acima de 120 km a atmosfera mistura-se gradualmente com o espaço interplanetário.

Segundo Stull (1988), a superfície da Terra é a base do domínio da atmosfera. Os processos de transporte modificam a atmosfera mais baixa de 100 a 3000 metros, criando o que é chamado de camada limite (Figura 2.2), justaposta a superfície terrestre, e o restante do ar na atmosfera é chamado de atmosfera livre onde o escoamento não sofre influência direta da superfície.

² Gás traço que desempenha um importante papel nos processos radiativos e representa 90% do ozônio contido na atmosfera. Esse gás é produzido na atmosfera pela interação da radiação ultravioleta e moléculas de oxigênio (Arckman e Knox, 2003).

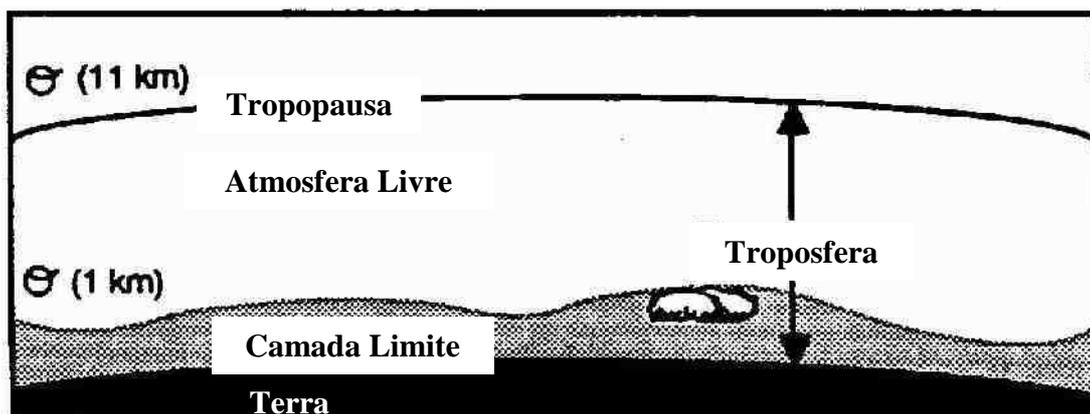


Figura 2.2 – Representação da Camada Limite Atmosférica (boundary layer) e da Atmosfera Livre.

Fonte: Adaptado de Stull (1988).

A troposfera pode ser subdividida em duas partes: a primeira é a parte mais baixa que fica em contato com a superfície da Terra, chamada de Camada Limite Planetária (CLP) ou Camada Limite Atmosférica (CLA), com características turbulentas; a segunda parte é denominada Atmosfera Livre (AL), onde ocorrem processos meteorológicos de meso e larga escala.

A CLP é a parte mais baixa da troposfera em que os ventos, temperatura e umidade são fortemente influenciadas pela superfície devido à troca de calor, momentum e massa com o fluído (HARTMANN, 1994; ARYA, 1988). Ainda, segundo Stull (1988), a camada limite é definida como a parte da troposfera que está diretamente influenciada pela presença da superfície da Terra e responde as forçantes da superfície com uma escala de tempo em torno de uma hora ou menos. Essas forçantes incluem o arrasto devido ao atrito, evaporação e transpiração, transferência de calor, emissão de poluentes e modificação do escoamento em função dos tipos de superfície e da topografia.

A altura da CLP varia de dezenas de metros até alguns poucos quilômetros e depende da taxa de aquecimento ou resfriamento da superfície, intensidade dos ventos, características topográficas da superfície, movimentos verticais de grande escala, advecção de calor e umidade entre outros fatores (ARYA, 1988). A seguir, será discutida a estrutura da camada limite planetária.

2.1. Camada Limite Superficial (CLS)

Na camada limite superficial, o vento é fortemente influenciado pelo gradiente de pressão e pela superfície terrestre. Essa camada fica em contato direto com o solo e pode variar entre alguns centímetros a dezenas de metros, correspondendo a aproximadamente 10% da CLP (STULL, 1988). As variações mais acentuadas das variáveis meteorológicas com a altura ocorrem dentro desta camada e, conseqüentemente, a ocorrência das trocas mais significativas de momentum, calor, massa e também de gases traços. Os primeiros milímetros da CLS logo acima do solo são chamados de Camada Interfacial (CI) na qual a sua espessura varia dependendo do tipo de superfície e o transporte molecular é o mais significativo

Acima da Camada Interfacial ocorrem fluxos verticais turbulentos de calor e de momentum. Os fluxos turbulentos e a fricção apresentam pouca variação com a altura, considerando-se, em média, um decréscimo de 10% de sua magnitude no topo da camada (STULL, 1988). Grandes variações com a altura da temperatura, umidade, cisalhamento do vento, fazem com que as trocas turbulentas mais intensas de momentum, calor e umidade também aconteçam nessa camada (ARYA, 1988).

Próximo da superfície terrestre predomina a turbulência mecânica. À medida que a altura aumenta, a convecção torna-se a principal causa da turbulência. Na camada limite superficial, a estrutura do vento é condicionada pela natureza da superfície e pelo gradiente vertical de temperatura do ar.

2.2. Camada Limite Convectiva (CLC)

A camada limite convectiva estende-se até aproximadamente entre 1 a 2 km de altura, onde a viscosidade molecular deixa de atuar. Além do efeito do atrito, nessa camada ocorre o efeito gerado pelo aquecimento do ar pela superfície, o qual desencadeia movimentos convectivos (VAREJÃO, 2006). Caracteriza-se

também pela presença de perfis verticais aproximadamente constantes da temperatura potencial e, em alguns casos, do campo de vento.

As principais fontes convectivas responsáveis pela mistura desta camada são correntes ascendentes de ar quente (térmicas), que se deslocam a partir da superfície, e as de ar frio que descem dos topos das nuvens convectivas (STULL, 1988).

2.3. Camada de Transição (CT)

A camada de transição encontra-se logo acima da CLC e localiza-se em uma região entre o fluxo perturbado da CLC e o escoamento homogêneo da atmosfera livre. Também é conhecida como Camada de Inversão Térmica e caracteriza-se por apresentar intensos gradientes verticais de temperatura e umidade específica, pois é uma região de transição entre a camada de mistura e a atmosfera livre. O limite superior da camada de transição sobre o oceano varia entre 500 a 1000 metros e sobre o continente pode alcançar 3000 metros de altura (ARYA, 1988; VAREJÃO, 2006).

2.4. Circulação Geral da Atmosfera

O movimento do fluido atmosférico pode ser dividido em duas classes, as quais devem a sua existência à distribuição desigual do aquecimento adiabático da atmosfera. Os movimentos impulsionados diretamente ou indiretamente pelos gradientes horizontais de aquecimento da atmosfera estável estratificada representam mais de 98% da energia cinética da atmosfera. Os movimentos impulsionados pela instabilidade atmosférica são responsáveis pelo restante da energia cinética atmosférica (WALLACE E HOBBS, 1977).

O movimento da atmosfera se processa em diferentes escalas de espaço e de tempo. Existem turbilhões convectivos com diâmetro da ordem de centímetros e duração de segundos (escala micrometeorológica), até configurações sinóticas quase-permanentes com diâmetro de milhares de quilômetros. Todas essas escalas

de movimento envolvem transformações de energia (interna, potencial ou cinética).

No geral, a radiação solar sofre diversas interações com os constituintes atmosféricos, as nuvens e, finalmente, com a superfície do planeta. Basicamente, os processos mais importantes que influenciam a intensidade de radiação solar que atinge a superfície da Terra são a absorção e o espalhamento atmosféricos (LIOU, 1980). Ao ser irradiada para o espaço na forma de onda longa, a radiação emitida pela Terra é absorvida ou refletida pelo vapor d'água e o dióxido de carbono impedindo que essa transponha a atmosfera.

Devido à forma esférica e a inclinação do eixo de rotação da Terra, a radiação solar total que chega a superfície diminui em latitudes maiores, ou seja, em direção aos pólos, ocasionando uma maior concentração de energia em torno da linha do Equador e um déficit nas regiões polares conforme representado na Figura 2.3. As curvas mostram que a radiação de onda longa emitida na região dos pólos é maior que a radiação de onda curta recebida. Na linha do equador essa relação é contrária.

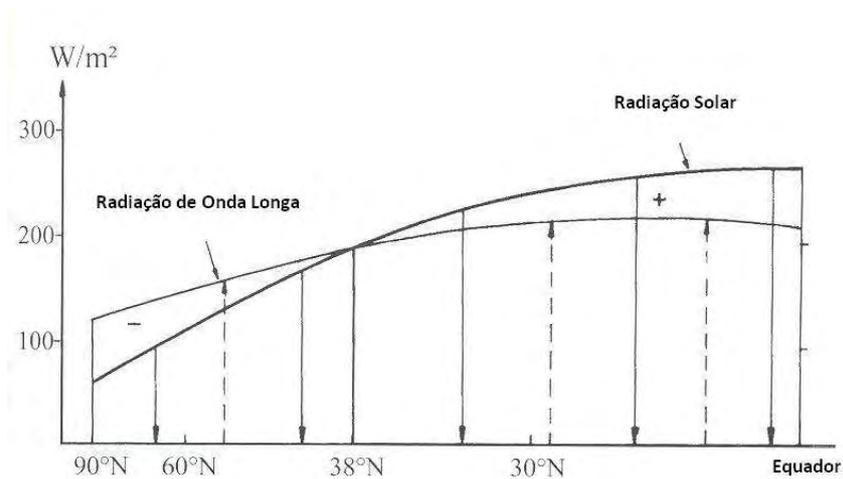


Figura 2.3 – Balanço da radiação média do hemisfério norte. Pode-se considerar que esse balanço também ocorre para o Hemisfério Sul.
Fonte: Adaptado de Gasch e Twele (2002).

Para compensar essa diferença, o calor é distribuído do equador para os pólos norte e sul por meio da troca de massas de ar. Devido ao maior aquecimento no

Equador terrestre, células de circulação de ar surgem, determinando a circulação geral da atmosfera.

O aquecimento diferenciado da superfície terrestre leva a diferenças de pressão na superfície, e conseqüentemente são gerados gradientes de pressão. A circulação geral atmosférica representa os movimentos predominantes e correspondem a uma média do comportamento atmosférico observado ao longo do ano e em todos os meridianos (média longitudinal) (WALLACE E HOBBS, 1977; HARTMANN, 1994).

Associadas a essa distribuição de pressão, existem três células de circulação meridional em cada hemisfério. Essas células atuam na troposfera onde o limite de camada superior de cada uma estaria imediatamente sobre a tropopausa (VAREJÃO, 2006). Trata-se, pois, da representação dos movimentos de grande escala temporal e espacial. Entre 0° e 30° encontra-se a célula de Hadley, entre a baixa equatorial e a alta subtropical, com ramo ascendente próximo a linha do Equador e subsidente em 30°. Entre a alta subtropical e a baixa subpolar, situadas nas latitudes médias, entre 30° e 60° existe a célula de Ferrel, a qual possui circulação com sentido contrário a célula de Hadley, com ramo subsidente em 30° e ascendente em 60°. Após 60° encontra-se a célula Polar (ACKERMAN E KNOX, 2003).

Ao longo do ano e em escalas espaciais menores, movimentos diferentes daqueles apresentados na Figura 2.4 são observados, bem como ocorrem deslocamentos de sistemas de baixas e altas pressões, passagens de frentes, etc. Os ventos locais são também influenciados por particularidades da superfície (gradientes de altura entre vales e montanhas), vegetação, proximidade mar-terra (brisa mar-terra), etc.

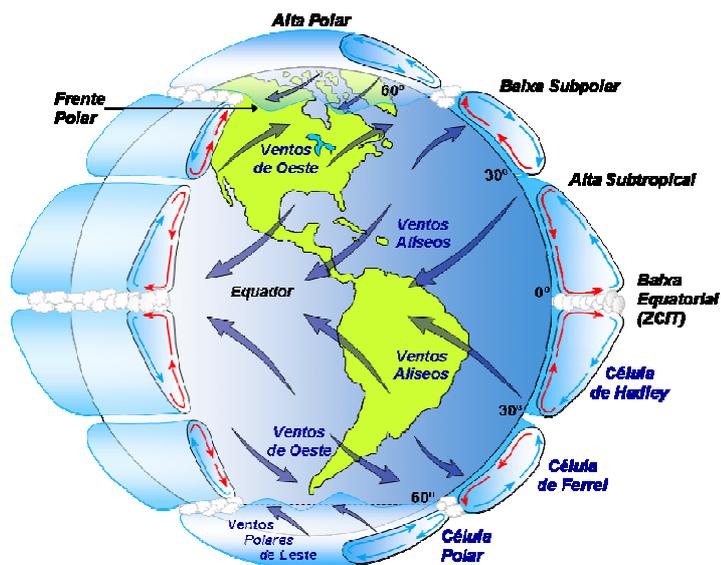


Figura 2.4 – Modelo da circulação global atmosférica, indicando a estrutura vertical das células de circulação e os ventos próximos à superfície. A relação entre o tamanho da atmosfera e da Terra está ampliada para facilitar a visualização.
 Fonte: Adaptado de Lutgens e Tarbuck, 1995.

Conforme a representação da Figura 2.4, os ventos de superfícies provenientes da zona subtropical de alta pressão devem convergir para a zona da baixa equatorial impulsionados pela força gradiente de pressão e defletidos pela força de Coriolis. Dessa forma, no Hemisfério Norte (HN) os ventos alísios são de nordeste e no Hemisfério Sul (HS) os ventos alísios são de sudeste. Nas regiões polares os ventos predominantes são de leste e nas regiões entre 30° e 60° os ventos predominantes em superfície são de oeste.

2.5. Ventos de Superfície

O vento ocorre devido à diferença de pressão entre as massas de ar, no entanto esse não é o vento próximo ao solo utilizado pelas turbinas eólicas. Quando as massas de ar deslocam-se próximas de uma superfície, elas têm a sua velocidade diminuída devido ao atrito com a superfície rugosa, e uma camada limite na superfície é criada. Ela possui a característica de estratificar verticalmente a velocidade dos ventos de zero até o vento geostrófico.

A camada limite varia entre dezenas e centenas de metros, dependendo da rugosidade e da estratificação da temperatura do ar acima da superfície. Assim, as turbinas eólicas sempre operam dentro da camada limite.

2.5.1. Vento Geostrófico

O vento geostrófico é um vento horizontal, não acelerado, que sopra ao longo de trajetórias retilíneas, paralelamente às isóbaras e em latitudes médias se aproxima do vento real com uma diferença de 10 a 15% em latitudes médias (HOLTON, 2004). Este vento resulta do equilíbrio entre a força do gradiente de pressão e força de Coriolis. Este equilíbrio ocorre acima da camada turbulenta em altitudes maiores que 1 km nas quais o efeito do atrito relativo à superfície é desprezível (ARYA, 1988; ARCKEMAN E KNOX, 2003). A força gradiente de pressão é perpendicular as isóbaras e acelera as parcelas de ar das regiões de maior pressão para a de menos pressão.

Na Figura 2.5 está representada a componente x da força gradiente de pressão agindo sobre um elemento de volume $\delta V = \delta x \delta y \delta z$, com centro em $x_0 y_0 z_0$. A pressão que atua nesse fluido é dada pela equação 2.1, onde o primeiro termo, p_0 , do lado direito da igualdade representa a pressão atmosférica e o segundo termo representa a variação horizontal da pressão ao longo do eixo x.

$$p = p_0 + \frac{\partial p}{\partial x} \delta x \quad (2.1)$$

O diagrama mostra um elemento de volume cúbico em um sistema de coordenadas cartesianas com eixos x, y e z. O centro do cubo é rotulado como (x_0, y_0, z_0) . O cubo tem dimensões δx , δy e δz . Forças F_{BX} e F_{AX} atuam nas faces opostas do cubo ao longo do eixo x.

Figura 2.5 – Componente x da força gradiente de pressão agindo sobre um elemento de fluido.

Fonte: Adaptado de Holton, 2004.

Assim, as forças resultantes dessa pressão sobre a parede de área unitária A e B, são das por

$$F_{Ax} = - \left(p_0 + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right) \quad (2.2)$$

$$F_{Bx} = + \left(p_0 - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right) \quad (2.3)$$

Dessa forma, a força resultante que atua sobre o elemento de volume é

$$F_x = F_{Ax} + F_{Bx} = - \frac{\partial p}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \quad (2.4)$$

Por sua vez, a força de Coriolis desvia a trajetórias dessas parcelas atmosféricas, em relação à Terra, para a esquerda no Hemisfério Sul (HS) e para a direita no Hemisfério Norte (HN).



Figura 2.6 – Esquema representativo do vento geostrófico.

Fonte: Adaptado de <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>>.

Essa é uma força fictícia, pois não segue os referenciais inerciais usados pelas Leis de Newton e atua perpendicularmente sobre o movimento das parcelas de ar tendo como referência a superfície da Terra.

Quando essas duas forças atingem o equilíbrio, o vento passa a ter velocidade constante e então o balanço geostrófico é atingido.

O vento geostrófico pode ser calculado a partir da Equação 2.5,

$$V_g = \frac{v^*}{K} \sqrt{\left(\ln\left(\frac{v^*}{fz_0}\right) - C_1\right)^2 + C_2^2} \quad (2.5)$$

Onde v^* é a velocidade de fricção, K é a constante de Von Karman, z_0 o comprimento de rugosidade, C_1 e C_2 são funções da estabilidade térmica da atmosfera e f é um termo associado à força de Coriolis. Para condições neutras, C_1 e C_2 assumem valores de 1,8 e 4,5, respectivamente.

2.5.2. Vento Gradiente

O balanço geostrófico requer que o vento sopre em linha reta. No entanto, isso é um caso raro (ARCKEMAN E KNOX, 2003). O vento gradiente é outra aproximação do vento real. Considerando que as isóbaras não seguem o conceito de linhas retas como mencionado na definição de vento geostrófico, uma nova força deve ser acrescida devido à curvatura das isóbaras: a força centrífuga.

Em virtude dessas curvaturas, surge a aceleração centrífuga. Essa aceleração altera o balanço entre a força de Coriolis e a força gradiente de pressão (WALLACE E HOBBS, 1977). O balanço entre essas três forças é chamado de balanço gradiente (ARCKEMAN E KNOX, 2003).

Na Figura 2.7 está representado o equilíbrio das três forças para o HS para centros de baixa e alta pressão.

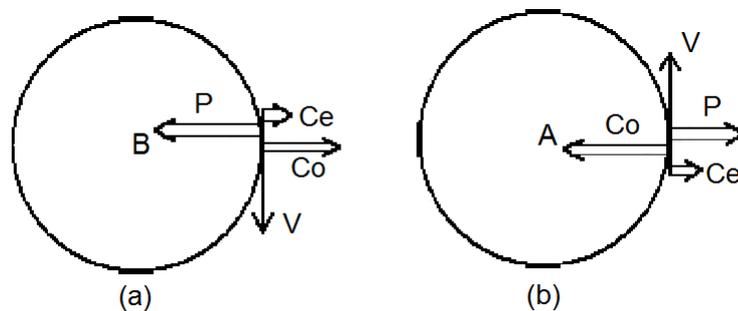


Figura 2.7 – Balanço das forças para o HS entre a força de Coriolis, Força centrípeta e força gradiente de pressão. (a) Centro de baixa pressão – ciclone; (b) Centro de alta pressão – anticiclone.

Fonte: Adaptado de Holton (2004).

Em torno dos centros de baixa pressão (a) e dos centros de alta pressão (b) a força centrífuga é dirigida para fora. A força de Coriolis aponta a esquerda da direção da corrente de vento, em direção para dentro do centro de baixa pressão e para fora no centro de alta pressão. A força gradiente de pressão aponta para fora do centro de alta pressão e para dentro do centro de baixa pressão.

Na Figura 2.8, pode-se visualizar o comportamento das forças no vento geostrófico e quando ocorrem curvas em torno de centros de baixa ou alta pressão.

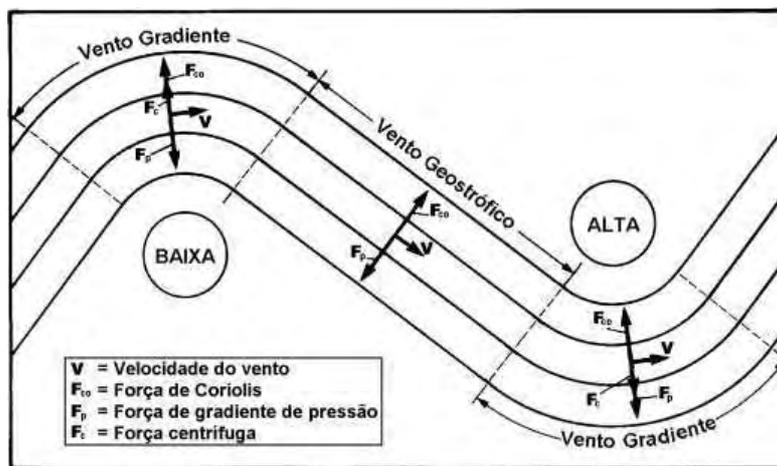


Figura 2.8 – Esquema mostrando o balanço entre força gradiente de pressão, força centrífuga e força de Coriolis para regiões em que as isóbaras são retas e regiões em que formam curvas.

Fonte: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>>

2.5.3. O efeito do Atrito

A velocidade do vento sobre o solo é sempre considerada nula devido ao atrito viscoso. Nos primeiros milímetros, compreendidos dentro da camada laminar, a interação molecular entre as placas do fluido é muito intensa. A representação da camada laminar na Figura 2.9 nos permite visualizar o efeito do atrito molecular próximo a superfície. Considerando o fluido como placas sobrepostas, espaçadas entre si, tem-se que a velocidade da placa inferior será menor que a velocidade da placa superior.

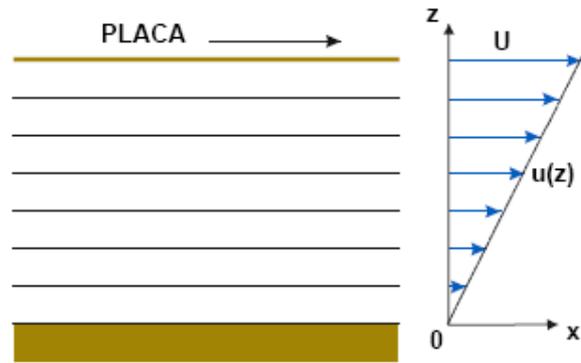


Figura 2.9 – Escoamento laminar de um fluido devido ao deslocamento da placa superior em relação à inferior em repouso.
 Fonte: Varejão, 2006.

A força tangencial aplicada à placa superior para uma determinada área é chamada tensão de cisalhamento. Na Figura 2.9, U é a velocidade da placa e Z é a distância vertical que separa as placas paralelas. A tensão de cisalhamento é representada por τ_x , a qual é resultado da força aplicada por unidade de área da placa.

Entre o solo e as camadas do vento geostrófico que não sofrem distúrbios, existe uma camada com alta variação da velocidade dos ventos. Dentro desta camada limite, a energia é transferida da corrente de alta energia do vento geostrófico para as camadas abaixo, através de movimentos turbulentos. Em função disso, a corrente de ventos próxima da superfície é turbulenta.

Dependendo da rugosidade da superfície, um gradiente da variação vertical da velocidade média do vento (u_z) do vento é gerado em função da altura z . O perfil da velocidade média do vento em função da altura possui curvas semelhante a da Figura 2.10, sem levar em conta a direção do escoamento.

O parâmetro ou altura z_0 – chamada comprimento de rugosidade – é positivo e representa a altura abaixo da qual a velocidade do vento é nula em relação ao solo (TOHM, 1975).

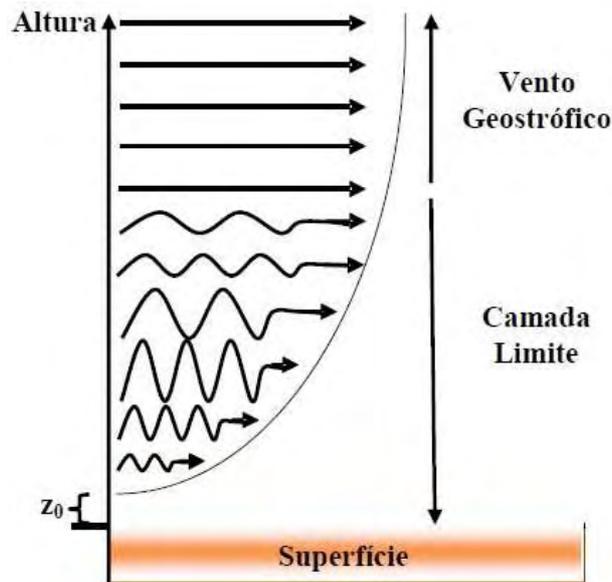


Figura 2.10 – Distribuição vertical do regime de circulação do vento.

A importância de se conhecer a variação da velocidade do vento com a altura reside no fato de que, quanto maior for o gradiente vertical da velocidade do ar, mais intensa será a turbulência (VAREJÃO, 2006). A variação da velocidade média do vento é representada pela Equação 2.5

$$u_z = A \left(\frac{z}{\ln z_0} \right) \quad (2.6)$$

Onde A é uma constante com dimensões de velocidade específica de cada perfil.

2.5.4. Gradiente vertical da velocidade do vento

O gradiente do vento é maior próximo do solo e, conseqüentemente, também o gradiente vertical de velocidade do vento. Uma lei logarítmica da variação vertical da velocidade do vento em uma camada limite turbulenta foi desenvolvida por Plandtl.

$$v(z) = \frac{v^*}{K} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.7)$$

Onde v^* é a velocidade de fricção que está entre 0,1 e 0,3 m/s e é definida por:

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.8)$$

onde τ_w é a tensão de cisalhamento e ρ a densidade do ar, e K é a constante de Von Karman do fluxo de ar da camada limite com um valor aproximado de 0,4. A variável z_0 é o comprimento de rugosidade da superfície, discutida no item 2.6.3, o qual depende da estrutura da superfície, conforme Tabela 2.1 (CARVALHO, 2003; MORTENSEN et al., 2005).

Tabela 2.1 – Valores para rugosidade para o tipo de terreno.

Características da Superfície da superfície	z_0 (metros)
Lagos, mar aberto	0,0001
Superfície com areia	0,0003
Superfície com neve	0,001
Solo descoberto	0,005
Gramma	0,008
Pradaria, campo	0,01
Aeroporto com edifícios e arvores	0,02
Área agrícola com poucas árvores e edifícios	0,03
Vegetação rasteira	0,1
Muitas árvores e/ou arbustos	0,2
Subúrbios	0,5
Cidade, floresta	1,0

Fonte: Adaptado de Carvalho (2003).

Esta lei logarítmica é válida quando se assume que a transferência vertical de energia é constante. Em condições reais, a aplicação desta equação da camada limite é dificultada, devido à imprecisão na determinação da constante de Kármán e na velocidade de fricção. Dessa forma, a variação vertical da velocidade do vento não pode ser calculada diretamente. De forma contrária, a variação relativa para a altura de referência h_1 e a velocidade de referência pode ser calculada facilmente de acordo com a Equação 2.7.

$$v_z(h_z) = v_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (2.9)$$

Dessa forma, a distribuição vertical é dependente somente do comprimento de rugosidade z_0 , se a velocidade para uma altura específica for conhecida.

2.5.5. Obstáculos de superfície

Dependendo do efeito da rugosidade da superfície no perfil da corrente de ar, a rugosidade pode ser assumida como mais ou menos homogênea. A mudança da orografia (estrutura da superfície) da terra, variações na vegetação, prédios, obstáculos naturais ou artificiais tem efeitos locais na variação do perfil do vento. A barlavento pode-se assumir que um obstáculo de altura H causa um distúrbio 5 vezes a altura H (Figura 2.11). No lado oposto a incidência do vento no obstáculo (atrás do obstáculo), os distúrbios na corrente de ar alcança 15 vezes a altura H .

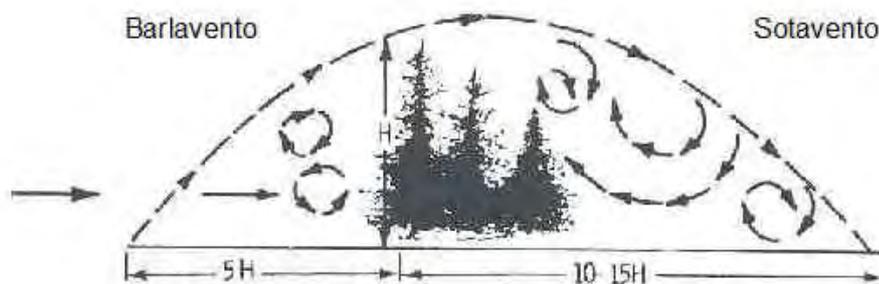


Figura 2.11 – Distúrbios do vento devido a um obstáculo.
Fonte: Adaptado de Gasch e Twele (2002).

2.6. Ventos Locais

A diferença no balanço da radiação causa movimentos locais das massas de ar. Ela deve-se principalmente a superfície da Terra. Ventos locais com características específicas para a região é o resultado do aquecimento diferenciado da superfície para regiões menores.

Os ventos locais mais importantes são as brisas terra-oceano e vento vale-montanha (GASCH E TWELE, 2002). Esses ventos são influenciados principalmente pela diferença de temperatura assim como pela estrutura da superfície da terra e pela sua orografia.

As regiões costeiras possuem circulações características baseadas na diferença de temperatura das massas de ar sobre o oceano e sobre a superfície do continente, as quais são denominadas brisa. A brisa sopra aproximadamente perpendicular a linha da costa e nesse caso, pode ser definida como brisa marítima ou terrestre.

As brisas marítimas e terrestres resultam do aquecimento e resfriamento diferenciais que se estabelecem entre a terra e a água. Frequentemente se observam em dias quentes ventos que sopram cruzando a linha da costa (FEDOROVA, 2001).

A formação da brisa marítima ocorre durante o dia, quando a radiação solar aquece a superfície terrestre de forma significativamente maior do que o oceano adjacente, resultando em um gradiente de temperatura oceano-continente ao longo o dia. Com isso, ocorre a formação de uma região de baixa pressão sobre a superfície terrestre, ocasionando em correntes convectivas ascendentes sobre o continente. Sobre o oceano, a pressão é mais elevada devido à menor temperatura da superfície da água formando movimentos subsidentes (ACKERMAN E KNOX, 2003; VAREJÃO, 2006).

No período noturno a superfície da Terra perde calor mais rapidamente que a superfície do oceano, de forma que o gradiente de temperatura será no sentido continente-oceano, ocasionando a brisa terrestre. Essas circulações estão diretamente relacionadas com o gradiente horizontal de fluxo de calor sensível e com forçantes atmosféricas de grande escala (AVISSAR E PIELKE, 1989).

Durante a noite o resfriamento do continente é maior que o do oceano devido ao maior calor específico da água. Com isso, a circulação a noite é contrária a do dia, porém com ocorrem fluxos mais fracos da terra para o oceano.

As montanhas também têm uma importante influência na circulação de uma determinada região. As diferenças de temperatura entre o vale e o topo da montanha são importantes fontes de correntes de ventos. Durante o dia, o aquecimento diferenciado entre vale e montanha cria gradientes horizontais de temperatura que produzem movimentos ascendentes ao longo das encostas das montanhas ou (FEDOROVA, 2001). As encostas das montanhas são aquecidas de forma que a temperatura na montanha é maior que nos vales adjacentes. O vento anabático sobe pelas encostas devido ao efeito de aquecimento diurno, quando o ar na montanha é mais quente que o ar sobre o vale, formando uma circulação ascendente junto à montanha e descendente sobre o vale.

O vento catabático resulta do ar que desce junto à encosta das montanhas e regiões íngremes devido ao arrefecimento noturno do ar devido ao contato com a superfície. Por tornar-se mais denso o ar conseqüentemente tende a descer pela encosta, do ponto mais alto para o ponto mais baixo formando uma circulação contrária ao caso diurno.

2.7. Medidas do vento e sua avaliação

Chama-se anemometria a determinação quantitativa do vento, em termos de sua velocidade e direção. Os instrumentos usados com essa finalidade são ditos anemógrafos ou anemômetros conforme efetuem, ou não, o registro da velocidade ou simultaneamente da velocidade e da direção. Os equipamentos anemométricos podem ter saída analógica, digital ou ambas (VAREJÃO, 2006).

Para fins de estudo de potencial eólico, normalmente as medições do vento são feitas a 10, 25 e 50 metros ou mais. Medindo-se o vento em alturas diferentes é possível analisar o perfil vertical do vento. Os medidores de velocidade de vento podem ser acoplados ou não, e normalmente, os registros são armazenados em *datalogger* e enviados via telefonia móvel. Com isso, é possível uma amostragem de dados muito maior do que se verifica nas estações meteorológicas. Com relação ao registro da velocidade, normalmente a amostragem é feita a cada segundo e uma média de 10 em 10 minutos. A faixa de medição do equipamento

deve ser entre 0,4 e 60 m/s, e com uma resolução igual ou melhor que 0,05 m/s. A velocidade de partida (“starting threshold”) deve ser igual ou inferior a 0,4 m/s.

A Organização Mundial de Meteorologia (OMM) e a Measuring Network of Wind Energy Institutes (MEASNET) recomendam algumas especificações para os equipamentos de medidas de vento.

Além disso, os anemômetros deverão ser fornecidos com certificado individual de calibração emitido por instituto de calibração credenciado de acordo com a ISO/IEC 17025:2005, comprovando as exigências do Guia MEASNET e da norma IEC 61400-12-1: 2005.

2.7.1. Distribuição Estatística de Weibull

A modelagem do vento para o setor eólico possui duas abordagens bem distintas: modelagem para estimativa de potencial eólico e predições de vento. Nos modelos para estimativa de potencial eólico, são empregadas medidas de vento e informações de relevo, vegetação e rugosidade da região de interesse. Com base nos dados dos locais de medição, e considerando os efeitos da superfície em volta, pode-se determinar o vento livre da influência da superfície.

Numa etapa seguinte, o vento livre de influência da superfície é empregado para calcular o vento na altura de geração eólica para cada ponto da região de interesse, construindo-se assim um mapeamento local do potencial eólico. Para realização destes ajustes, duas abordagens podem ser utilizadas: modelos físicos e modelos estatísticos.

A partir dos dados de velocidade do vento são determinados histogramas expressando as frequências de ocorrência de cada faixa de velocidade. Juntamente com as curvas de turbinas eólicas, os histogramas permitem estimar o potencial de geração de energia do sítio eólico.

Essa distribuição de frequência relativa de ventos pode ser aproximada pela forma contínua da função de Rayleigh (GASCH E TWELE, 2002). A maioria dos

fabricantes de turbinas eólicas fundamenta-se na hipótese de uma distribuição de Rayleigh para os ventos, pois esta se adapta bem ao regime de ventos europeu, continente em que se localiza a maior parte dos fabricantes (CARVALHO, 2003).

A distribuição de Weibull é uma generalização da distribuição de Rayleigh (GASCH E TWELE, 2002). Ela contém um fator de forma k e um fator de escala A e, assim, pode ser usada para condições que não são suficientemente descritas pela distribuição de Rayleigh. A forma geral para a distribuição de Weibull é a seguinte:

$$f_w = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (2.10)$$

Onde f_w é a frequência de incidência do vento, k o fator de forma, A o fator de escala e v a velocidade do vento. Os fatores de escala A e o de forma k são os parâmetros que estão relacionados, respectivamente à velocidade média do vento e à forma da curva (CARVALHO, 2003).

A Figura 2.12 mostra as diferentes configurações que a distribuição de Weibull pode assumir para diferentes fatores de forma. Neste caso de $k = 2$ tem-se a distribuição de Rayleigh.

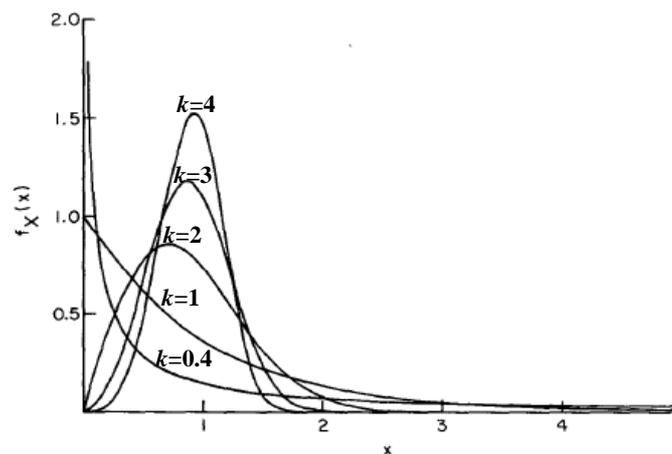


Figura 2.12 – Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma. Fonte: Adaptado de Hennessey (1977).

O parâmetro de forma k é a medida inversa da variação da velocidade do vento com relação à sua média. Ele pode ser calculado I , que é o grau de turbulência da velocidade do vento sobre a velocidade média do vento, conforme Figura 2.13. O termo σ_{vento} representa o desvio padrão do vento.

Quanto menores as variações na velocidade do vento, menor é o desvio padrão e a turbulência. Dessa forma o gráfico de distribuição de frequência é mais concentrado e maior é o valor de k .

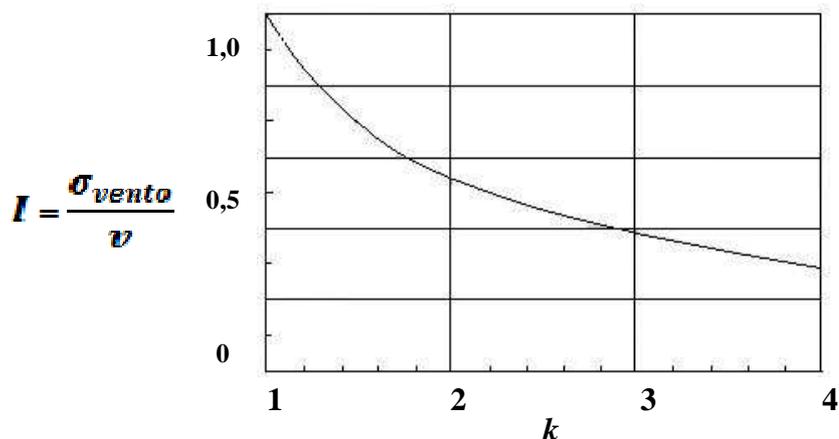


Figura 2.13 – Relação entre a intensidade da turbulência I da velocidade do vento e o parâmetro de forma k da função de Weibull.
 Fonte: Adaptado de Gasch e Twele (2002).

Estudos relacionados à potência dos ventos se concentram no problema do ajuste de distribuições estatísticas de dados de velocidade do vento e indicam que a distribuição de Weibull é a que melhor se ajusta a esses dados (JUSTUS et al., 1976; HENNESSEY, 1977; VAN DER AUWERA et al.; 1980; REHMAN et al., 1994; GARCIA et al., 1998; NFAQUI et al., 1998; SILVA et al., 1994; GASCH E TWELE, 2002; ARCHER E JACOBSON, 2003). No entanto, se a distribuição de Weibull não se ajusta perfeitamente às velocidades do vento, a distribuição não representará o melhor modelo de ajuste de potência (SANSIGOLO, 2005).

Sansigolo (2005) realizou um estudo de distribuição de probabilidade de velocidade e potência do vento para um período de dois anos em Panorama, São Paulo, usando a distribuição Beta, Log-Normal e Weibull e detectou que nem sempre Weibull é a que melhor se ajusta às velocidades dos ventos.

Conhecendo-se a distribuição de probabilidade das velocidades do vento $f_v(v)$, as probabilidades de potência podem ser obtidas tomando-se $P = g(v) = v^3$ e como consequência, tem-se que, se as velocidades do vento são modeladas pela distribuição de Weibull, a distribuição das velocidades cúbicas (potência) são teoricamente a distribuição de Weibull (HENNESSEY,1977). Esta propriedade da distribuição de Weibull e o aparente bom ajuste aos dados de velocidade do vento tornam o modelo mais frequentemente usado em aplicações voltadas ao potencial eólico.

2.8. A Física da Energia dos Ventos

Neste tópico, serão feitas algumas considerações com relação ao aproveitamento do vento para a geração de eletricidade.

2.8.1. Potência do Vento

A potência contida no vento pode ser considerada a energia cinética de uma determinada massa de ar m passando através de uma área A em um dado intervalo de tempo sendo medida em Watts (W).

$$E_v = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.11)$$

A potência instantânea do vento é definida por

$$P_v = \frac{dE_v}{dt} = \frac{1}{2}\left(\frac{dm}{dt}\right)v^2 \quad (2.12)$$

A taxa de fluxo de massa é proporcional à velocidade

$$m = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho Av \quad (2.13)$$

Dessa forma, pode-se escrever a potência como:

$$P_v = E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.14)$$

A energia contida no vento, ou seja, o fluxo de energia cinética média por unidade de área perpendicular ao escoamento é a densidade de potência. A densidade de potência é medida em $W.m^{-2}$. A potência do vento é convertida em energia mecânica do rotor quando a massa de ar tem sua velocidade reduzida ao passar pela área circular A com raio igual a medida das pás do aerogerador.

Em 1926, Betz e Glauert descobriram que o máximo de energia do vento que pode ser extraída por um aerogerador ocorre quando a velocidade do vento v_1 é reduzida em 1/3. De acordo com a teoria de Betz a potência máxima extraída do vento é descrita pela equação 2.15 onde o coeficiente de potência $C_{P,Betz}=0,59$, indicando que somente 59% da potência contida no vento estará disponível para ser convertida em energia mecânica.

$$P_{Betz} = \frac{1}{2}\rho Av^3 C_{P,Betz} \quad (2.15)$$

3. REGIÃO DE ESTUDO

Neste trabalho foi selecionada a Região sul do país como área de estudo. A região Sul está localizada entre o trópico de Capricórnio e latitude 34° S. É composta pelos estados do Paraná (PR), Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS) (Figura 3.1) e possui uma área que de acordo com o levantamento do IBGE de 2000 é de aproximadamente $577.214,0 \text{ km}^2$. O setor leste, que possui uma extensão de 1350 km é banhado pelo Oceano Atlântico Sudoeste (ATLSW), e está delimitado pelos paralelos de $22,5^{\circ}$ S e $33,5^{\circ}$ S e pelos meridianos de 48° W e $57,5^{\circ}$ W. As altitudes variam desde o nível do mar até 1200 m nas regiões próximas às serras Gerais e do Mar.

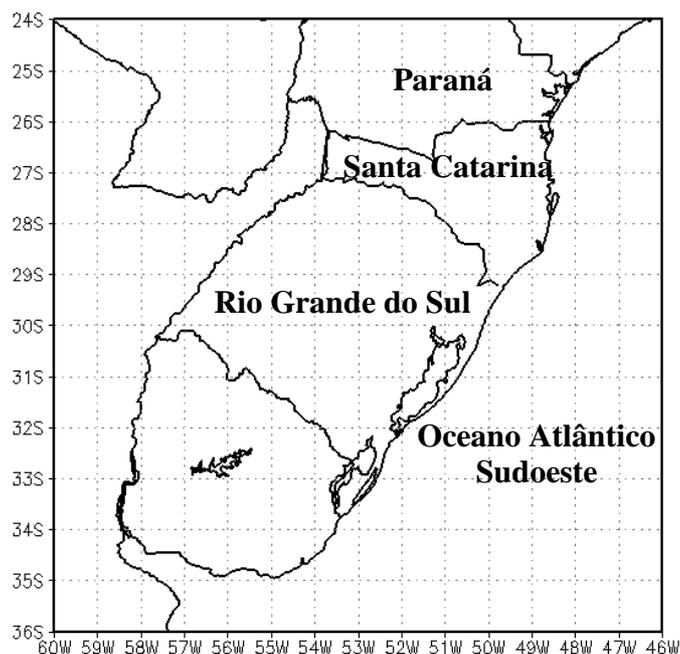


Figura 3.1 – Região Sul, abrangendo os estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Toda a região costeira é banhada pelo oceano Atlântico Sudoeste.

O clima da região é temperado e as temperaturas médias anuais são de 20° a 24° C, podendo haver máximos de 40° a 42° C e mínimos abaixo de 0° C devido à incidência de massas de ar frio. A ocorrência de ciclogêneses e frontogêneses sobre o sul do Brasil também é um fator preponderante na determinação da climatologia da precipitação e temperatura desta Região. Alguns estudos

estatísticos realizados por Gan e Rao (1991), mostram que a maior frequência de ciclogêneses ocorre sobre o Uruguai durante o período de inverno do Hemisfério Sul, e em média, ocorrem cerca de 60 ciclogêneses sobre a Região Sul a cada ano.

Essa região está inserida dentro da zona de ocorrência da corrente de jato subtropical, associada à célula de Hadley, localizado acima da região descendente da desta célula. O jato subtropical está localizado entre as latitudes 20° a 35° S (PEZZI et al, 1996).

A presença da Cordilheira dos Andes tem forte influência na distribuição das massas de ar que entram na região Sul da América do Sul e do Brasil. Além disso, a Cordilheira dos Andes impede a passagem das massas de ar de oeste para o lado leste e canaliza a massa de ar tropical marítima a leste da montanha na direção sul (COMPAGNUCCI et al. 1997; GAURREAUD, 1999).

As massas de ar tropicais apresentam grandes variações zonais na temperatura e umidade relativa sobre o continente. Já as massas de ar polar são caracterizadas pela baixa temperatura. As frentes estão associadas a essas massas de ar, e suas trajetórias e intensidades estão fortemente ligadas ao posicionamento do jato subtropical na América do Sul. Definidas como a interface que separa as duas massas de ar, as frentes ocorrem próximas ao solo separando o ar frio do ar quente (HENRY, 1922; FEDOROVA, 2001). O Sul do Brasil é uma região frontogénica, ou seja, as frentes podem se intensificar ou podem se formar (SATYAMURTY E MATTOS, 1989).

3.1. Ventos em superfície no Rio Grande do Sul

Neste trabalho, as estações de superfície estão todas localizadas em território do estado do Rio Grande do Sul. Com uma área territorial de 282.062 km² e ocupando o extremo meridional do Brasil, o estado delimita-se com o estado de Santa Catarina a N-NE, República Argentina a W-NW, República do Uruguai a S-SW e seu extremo oriental é banhado pelo Oceano Atlântico. Seus limites geográficos se estendem entre as longitudes 57°36'14"W - 49°42'00"W e as

latitudes 33°45'37"S - 27°05'20"S (ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL, 2001).

O regime dos ventos próximos a superfície no extremo sul do Brasil é influenciado pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico, pela entrada de massas de ar e a Depressão do Nordeste da Argentina – centro de baixas pressões a leste dos Andes. Devido às variações de mesoescala e microescala que ocorrem em função das propriedades da superfície, podem influenciar nos perfis de vento em superfície, criando condições de ventos locais que podem diferir significativamente do perfil de larga escala da circulação atmosférica (AMARANTE et al., 2001; COMPAGNUCCI et. al. 1997).

O Atlas Eólico Brasileiro (AMARANTE et al., 2001) e o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, da Secretaria de Energia, Minas e Comunicação – SEMC, do estado do Rio Grande do Sul, são dois trabalhos conhecidos mais recentes sobre levantamento do potencial eólico e ventos em superfície para essa região.

O Atlas Eólico do Rio Grande do Sul foi gerado para estudo de viabilidade de instalação do atual parque eólico de Osório. Para sua construção foram utilizadas 36 torres anemométricas distribuídas em todo o estado. Além disso, os regimes de vento para a região de estudo foram interpolados a partir do modelo de mesoescala – MesoMap – e de simulações computacionais dos processos físicos atuantes na atmosfera, com base em um banco de dados meteorológicos de 15 anos (ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL, 2001). O mapeamento possui uma resolução de 1km x 1km e o modelamento tri-dimensional da camada limite atmosférica foi realizado com o pacote computacional WindMap. Tanto o MesoMap como o WindMap são pacotes computacionais comerciais e, portanto, de código fechado.

O Atlas Eólico Brasileiro possui uma resolução horizontal de até 1 km e também foi desenvolvido a partir do Sistema MesoMap. Teve os principais dados meteorológicos provenientes de reanálise, radiossondagens e temperaturas sobre a terra e oceanos. Os mapas de potencial eólico foram calculados a partir de

simulações realizadas pelo MesoMap para 360 dias, extraídos de um período de 15 anos.

Ambos os trabalhos possuem saídas de velocidade e direção de ventos a 50 metros de altura em relação ao solo. Pode-se verificar a predominância da direção do vento a 50 metros (Figura 3.2) para a região de estudo, de acordo com o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul.

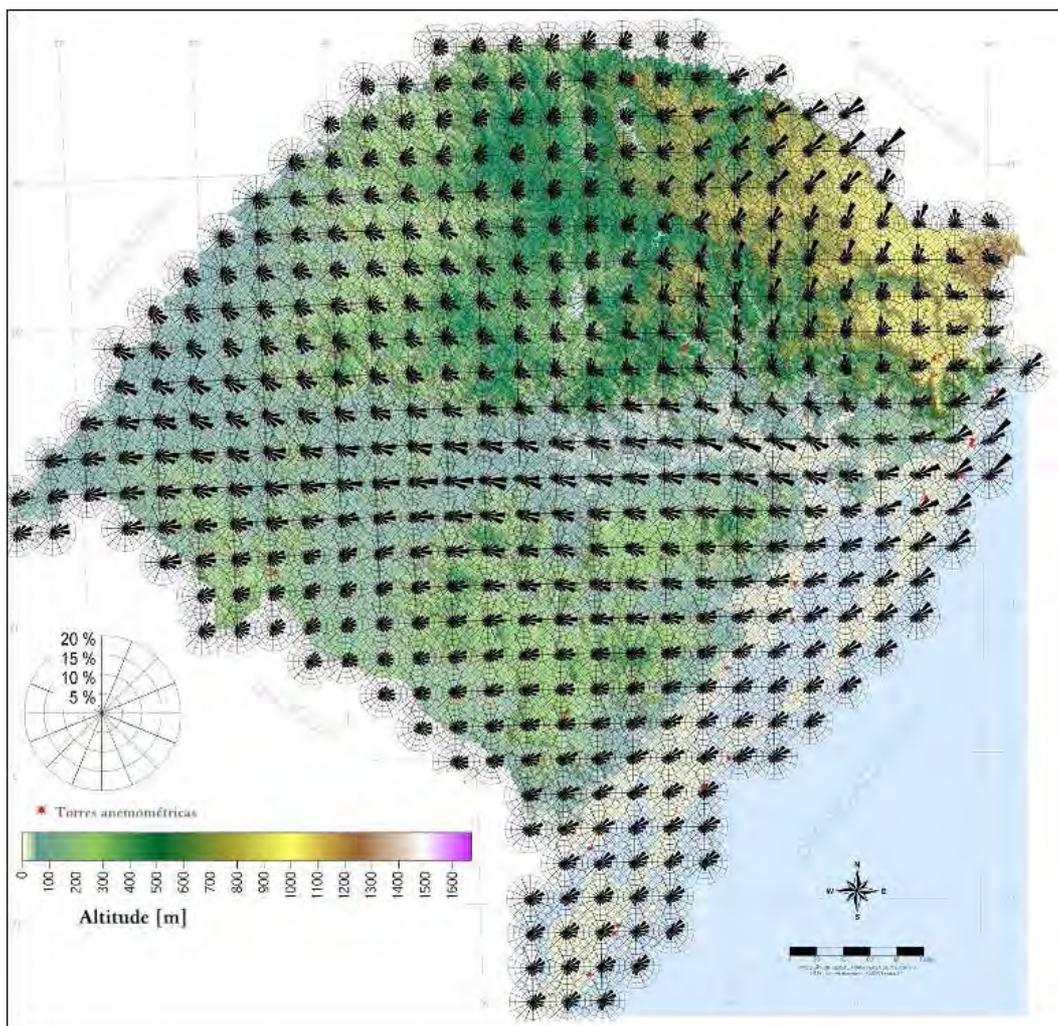


Figura 3.2 – Direção predominante do vento a 50 metros para a região de estudo.
Fonte: Atlas Eólico do Rio Grande do Sul. Disponível em:
<http://www.semc.rs.gov.br/atlas/INDEX_mapas.htm>

Na Figura 3.3 pode-se verificar a variação sazonal da velocidade média do vento a 50 metros. O mapa mostra que o maior potencial eólico do estado está situado na região litorânea, e que as maiores intensidades do vento ocorrem na segunda metade do ano, nos períodos de inverno e primavera, que compreende os meses de

JJA e SON, respectivamente, em todas as regiões com pequenas defasagens na ocorrência dos picos entre os extremos leste e oeste do estado.

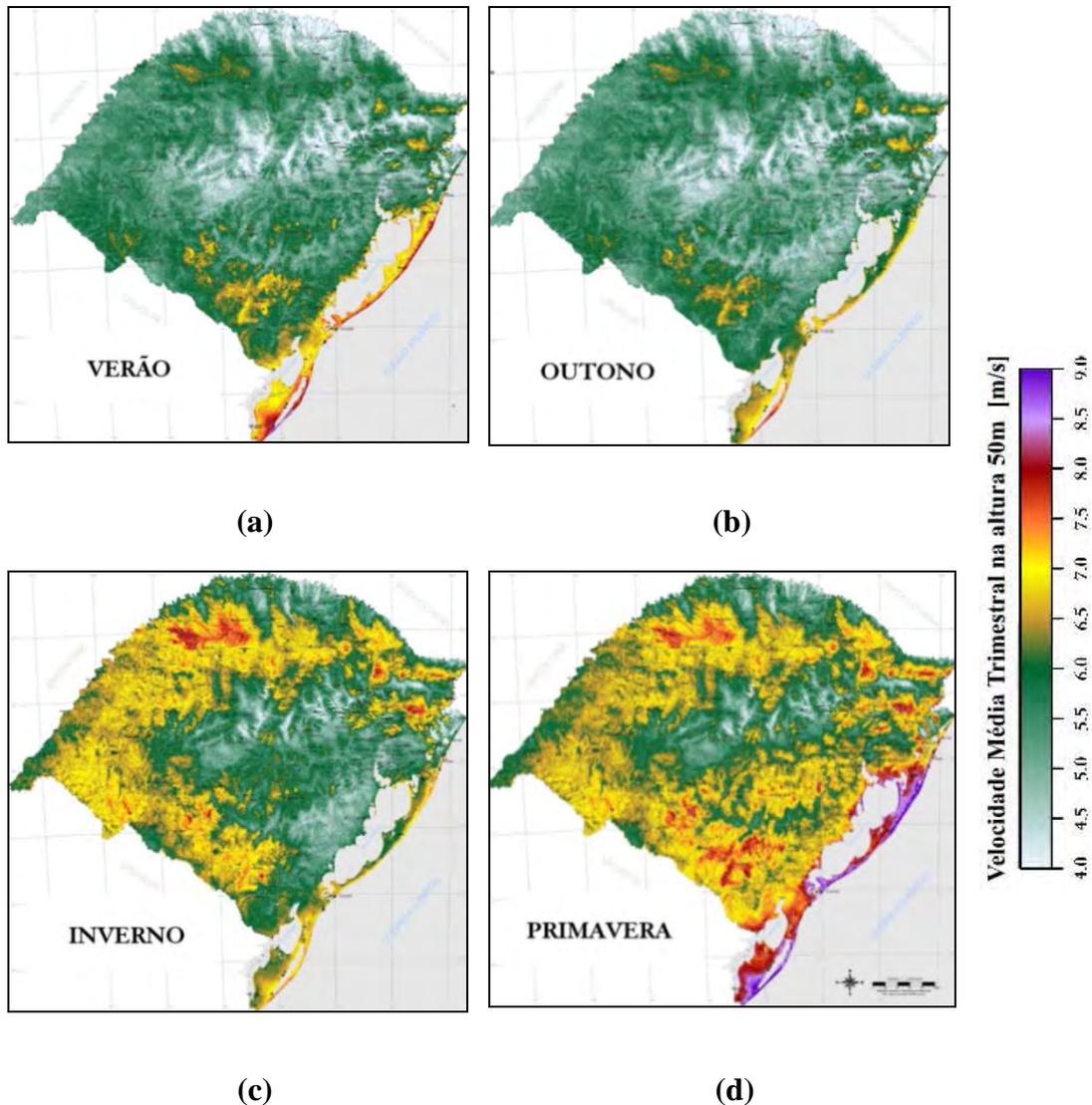


Figura 3.3 – Variação sazonal da velocidade média do vento no Rio Grande do Sul.

Fonte: Atlas Eólico do Rio Grande do Sul. Disponível em: http://www.semc.rs.gov.br/atlas/INDEX_rgs.htm

Com relação às velocidades médias anuais, o Atlas Eólico Brasileiro e o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul diferem em 0,5 m/s a 1,0 m/s, aproximadamente, para algumas regiões. O Atlas Eólico Brasileiro apresenta velocidades a 50 metros de altura (Figura 3.4) de 3,5 m/s na região central do estado, como sendo o menor potencial, e o maior potencial na região litorânea, com velocidades em torno de 7,5 m/s.

O Atlas Eólico do Rio Grande do Sul apresenta para a região central do estado velocidades a 50 metros de altura superiores a 4,0 m/s. As maiores velocidades ocorrem no litoral, chegando a valores superiores a 8,5 m/s no litoral do extremo sul do estado.

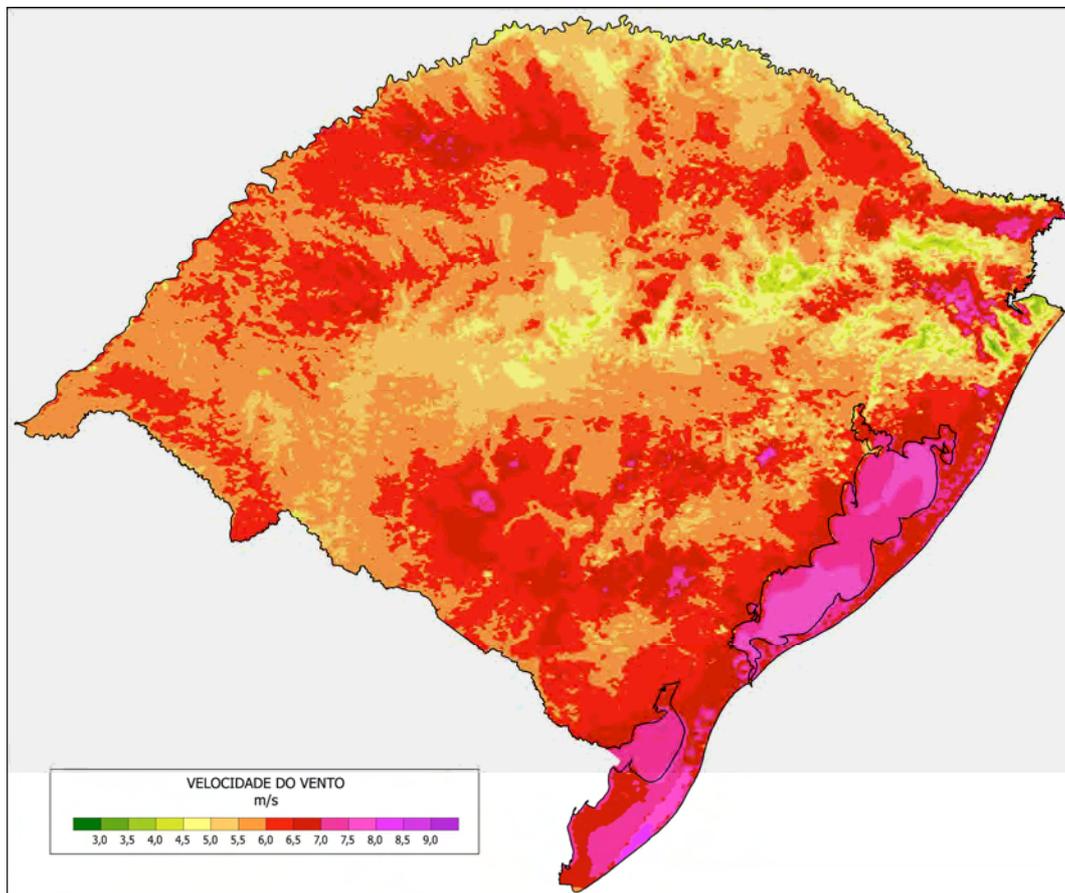


Figura 3.4 – Velocidade média anual do vento para o estado do Rio Grande do Sul.

Fonte: Adaptado de Amarante et al., 2001.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MODELO ETA

O modelo Eta foi desenvolvido, em 1970, pela Universidade de Belgrado em parceria com o Federal Hydrometeorological Institute, da Iugoslávia para previsão numérica de tempo. O modelo tornou-se operacional na Iugoslávia em 1978 e posteriormente a coordenada eta foi criada por Mesinger (1984) para reduzir os erros cometidos pela coordenada sigma (PHILLIPS, 1957). O desenvolvimento posterior do modelo contou com esforços de numerosos cientistas, muitos deles do National Meteorological Center (atual National Centers for Environmental Prediction - NCEP) (MESINGER et al., 1988; BLACK, 1994).

Esse modelo foi instalado no CPTEC em 1996 com o objetivo de complementar a previsão numérica de tempo que vem sendo realizada desde o início de 1995 com o modelo de circulação geral atmosférica (CLIMANÁLISE, 1996).

4.1.1. Grade Horizontal

O modelo de área limitada Eta (MESINGER et al., 1988; BLACK, 1994) tem sido utilizado operacionalmente no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desde 1996 (CHOU, 1996).

O modelo regional se propõe a prever com maiores detalhes sistemas organizados em mesoscala tais como fenômenos associados a frentes, orografia, brisa marítima, tempestades severas. A resolução horizontal atual utilizada na América do Sul é de 40 km e a vertical de 38 níveis. As variáveis prognósticas do modelo são: temperatura do ar, componente zonal e meridional do vento, umidade específica, hidrometeoros de nuvens, pressão à superfície e energia cinética turbulenta.

A grade horizontal utilizada pelo modelo é a grade E de Arakawa (ARAKAWA e LAMB, 1977). As equações do modelo são discretizadas para a grade. A distância entre dois pontos adjacentes de massa ou de vento define a resolução da grade. Um esquema desta grade é apresentado na Figura 4.1.

Nos pontos de massa identificados por “h”, estão definidas as variáveis de pressão em superfície, temperatura, umidade específica, velocidade vertical, água líquida da nuvem, energia cinética turbulenta e outras variáveis termodinâmicas. Nos pontos “v” estão representadas ambas as componentes horizontais do vento. A distância “d” é o espaçamento entre os pontos “h” ou espaçamento entre os pontos “v”, adjacentes, e a magnitude dessa distância é comumente usada para indicar a resolução horizontal do modelo (Black, 1994). Os pontos de massa e de velocidade são determinados na camada intermediária entre dois níveis, enquanto que a velocidade vertical é determinada nas interfaces

Cada ponto de grade consiste em um ponto de massa localizado no centro de quatro pontos de velocidade do vento.

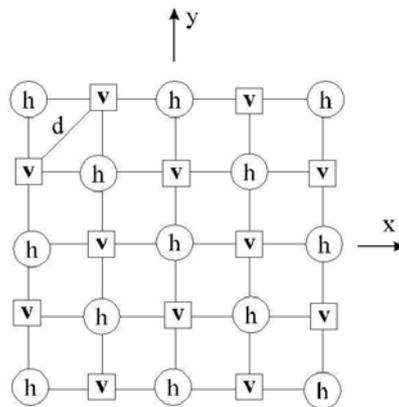


Figura 4.1 – Grade horizontal tipo E de Arakawa.
 Fonte: Modificado de Nickovic et al. (1998).

4.1.2. Coordenada Vertical

A coordenada vertical eta (η), foi desenvolvida por Mesinger (1984) para solucionar erros que ocorrem nos cálculos de variáveis obtidas a partir de derivadas horizontais, ao longo de uma superfície de coordenada muito inclinada. Estes erros são significativos em regiões de montanhas íngremes como é o caso

dos Andes na América do Sul. Isso reduz o problema da falsa contribuição para o gradiente de pressão causado pela coordenada sigma.

A coordenada sigma apresenta algumas desvantagens: as coordenadas da superfície inclinam-se abruptamente para acompanhar as montanhas íngremes; cálculos das derivadas horizontais apresentam erros em regiões montanhosas, principalmente para a força gradiente de pressão; os erros aumentam a medida que aumenta a resolução do modelo e as inclinações de montanhas são melhor representadas.

A coordenada η é fundamentada na normalização da pressão com a vantagem de que, nesta coordenada, as superfícies constantes estão dispostas quase na horizontal, tanto nas áreas planas quanto nas montanhosas. A coordenada η é definida através da seguinte relação:

$$\eta = \underbrace{\left(\frac{p - p_T}{p_{sfc} - p_T} \right)}_{\sigma} \eta_{srf} \quad (4.1)$$

onde

$$\eta_{srf} = \frac{p_{ref}(z_{sfc}) - p_T}{p_{ref}(0) - p_T} \quad (4.2)$$

Nestas equações, p_T é a pressão no topo do domínio do modelo, p_{sfc} e z_{sfc} são respectivamente a pressão e a altitude à superfície e p_{ref} é uma pressão de referência, função da distância acima do nível do mar obtida a partir de uma atmosfera padrão. O topo do modelo se encontra em 50 mb.

Das Equações 4.1 e 4.2 segue que:

$$\eta = 0 \quad \text{em} \quad p = p_T;$$

$$\eta = 1 \quad \text{em} \quad z = z_{sfc}=0;$$

$$\eta = \eta_{sfc} \quad \text{em} \quad z = z_{sfc}.$$

4.1.3. Topografia

A topografia do modelo Eta é representada por de degraus discretos cujos topos coincidem com a interface das camadas do modelo (DERECZYNSKI et al., 2004). A altura de cada degrau é obtida a partir do método de silhueta (Figura 4.2). Este método procura o valor médio das alturas máximas da topografia dentro de cada quadrado de grade. Cada degrau possui um ponto de massa no centro e quatro pontos de velocidade localizados nos vértices.

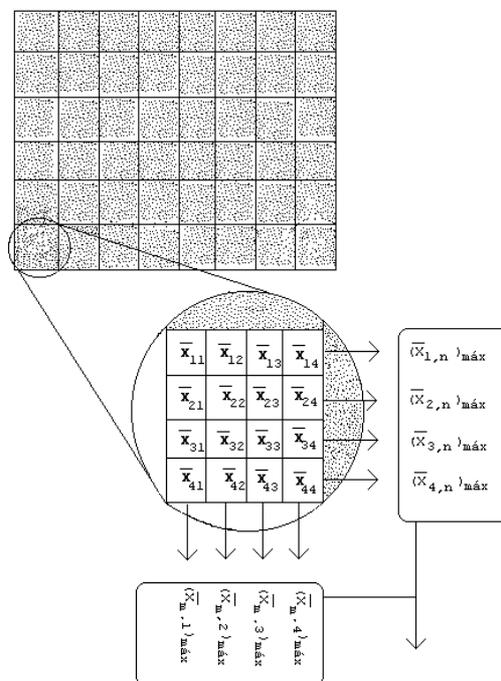


Figura 4.2 – Representação do método da silhueta.
Fonte: Adaptado de Rozante (1999).

As alturas das interfaces são previamente determinadas de acordo com a atmosfera padrão. As variáveis de temperatura, umidade específica e componentes horizontais do vento são dispostas no meio das camadas, enquanto a velocidade vertical e o geopotencial são dispostos nas interfaces das camadas. Os pontos de vento são situados nos lados verticais dos contornos dos degraus. Um diagrama esquemático da topografia em forma de degraus utilizada pelo modelo, bem como

a distribuição das variáveis na vertical, é apresentado na Figura 4.3. As linhas horizontais tracejadas representam as alturas reais do relevo, que são ajustadas pela topografia do modelo às alturas das interfaces das camadas.

As condições de contorno para a velocidade vertical ($\dot{\eta}$) na base e no topo do domínio do modelo, e para a pressão no topo, são definidas como:

$$\dot{\eta} = 0 \quad \text{em } \eta = 0 \text{ e } \eta = \eta_{surf},$$

$$p = p_T \quad \text{em } \eta = 0.$$

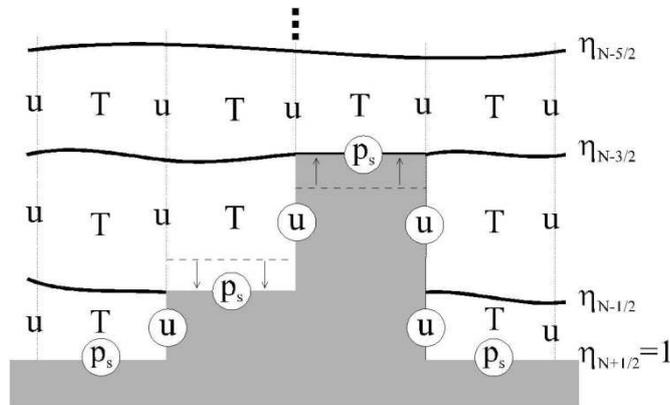


Figura 4.3 – Seção vertical idealizada da topografia do modelo Eta e distribuição das variáveis (u , T , p_s) na vertical.

Fonte: Modificado de Nickovic et al. (1998).

4.1.4. Modelo Eta Climático

O modelo Eta HAdCM foi configurado para o prazo de integração de 31 anos (267840 horas). A frequência de saída do modelo é a cada 6 horas. A resolução horizontal é de 40 km com 38 camadas verticais. O modelo foi atualizado a cada 6 horas com as condições de contorno provenientes do modelo global HADCM3 do Hadley Center - UK MetOffice.

O pacote físico do modelo compreende os esquemas de convecção de Betts-Miller-Janjic (JANJIC, 1994). A microfísica de nuvens é produzida pelo esquema de Zhao (ZHAO et al. 1997). O esquema de radiação desenvolvido pelo GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) inclui tratamento para radiação de onda

curta (LACIS E HANSEN, 1974) e onda longa (FELS e SCHWARZKOPF, 1975).

O esquema de superfície é o Noah (MITCHELL, 2001), com 4 camadas de solo e 13 tipos de cobertura de superfície. A turbulência atmosférica é representada pelo esquema de Mellor-Yamada (MELLOR e YAMADA, 1982). Na camada superficial utiliza-se a teoria de Monin-Obukhov com as funções de estabilidade de Paulson (1970).

Algumas adaptações feitas no modelo são:

- *Calendário de 360 dias*: o Eta original utiliza calendário de 365 dias em anos normais e 366 em anos bissextos. Nessa rodada do modelo, foi utilizado um calendário de 360 dias, correspondendo a 30 dias para cada mês.

- *Atualizações de TSM*: as rotinas de TSM foram modificadas para realizarem a atualização para cada passo de tempo. São feitas interpolações entre os valores de TSM mensais e para a grade de $1^\circ \times 1^\circ$ lat/lon.

- *Atualização da fração de cobertura de vegetação*: a variação sazonal da vegetação foi introduzida a partir da variação da fração de cobertura de vegetação da superfície no modelo. Esta variável foi modificada para ser atualizada a cada dia utilizando valores mensais de fração de cobertura de vegetação.

- *Adaptações para projeções de cenários futuros*: para as simulações do clima futuro, o modelo passa por uma atualização dos índices de CO_2 . A concentração de CO_2 na atmosfera é atualizada para cada ano da rodada do modelo, levando em conta o cenário de emissão considerado. Os coeficientes de transmissividade da atmosfera foram gerados para todo o período da simulação com intervalo de cinco anos através de interpolações dos coeficientes de transmissividade. Esses coeficientes estão relacionados com a concentração de CO_2 na atmosfera e são usados pelo modelo para corrigir o perfil de temperatura pelo esquema de radiação de onda longa do modelo.

Nessa simulação foram usados os arquivos de 1xCO₂ e 2xCO₂ fornecidos pelo Hadley Center. Isso resultou em um arquivo com sete diferentes coeficientes de transmissividade a serem utilizados pelo modelo para rodadas de 30 anos. O modelo foi rodado para o cenário de emissão A1B (Figura 4.4), pertencente à família de cenários A1 do IPCC.

A família de cenários A1 descreve um mundo futuro de rápido crescimento econômico, com a população global atingindo um pico em meados do século e declinando em seguida. Ainda esses cenários consideram uma rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes. A família de cenários A1 se desdobra em três grupos que descrevem direções alternativas da mudança tecnológica no sistema energético. Os três grupos A1 distinguem-se por sua ênfase tecnológica (IPCC, 2007):

- Intensiva no uso de combustíveis fósseis (A1FI);
- Fontes energéticas não-fósseis (A1T)
- Equilíbrio entre todas as fontes (A1B) (em que o equilíbrio é definido como uma dependência não muito forte de uma determinada fonte de energia, supondo-se que taxas similares de aperfeiçoamento apliquem-se a todas as tecnologias de oferta de energia e uso final).

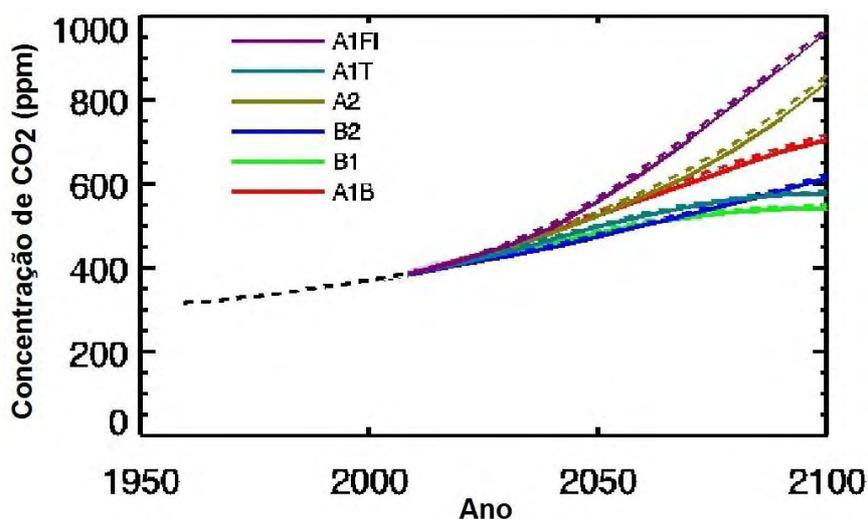


Figura 4.4 – Concentração real de CO₂ na atmosfera até o ano 2000. A partir de 2000 observa-se a concentração de CO₂ para os cenários de emissões do IPCC em partículas por milhão (ppm).

Fonte: Adaptado de http://www.ipcc-data.org/ddc_co2.html

As variáveis fornecidas pela saída do modelo Eta HadCM são 35 variáveis de um nível e 7 variáveis com 20 níveis (1000, 925, 900, 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 50 hPa).

4.2. WAsP – Wind Atlas Analysis and Application Program

O WAsP - Wind Atlas Analysis and Application Program é um modelo numérico computacional, que foi inicialmente desenvolvido para a elaboração do Atlas Eólico Europeu (TROEN E PETERSEN, 1989) pelo *RISØ National Laboratory*, da Universidade Técnica da Dinamarca, estimando o potencial eólico com alta resolução espacial de uma determinada região, a partir de medidas de ventos em superfície.

O WAsP é utilizado para estimar os recursos eólicos a partir da extrapolação horizontal e vertical de dados de ventos para um determinado ponto de referência (BOWEN e MORTENSEN, 2004)

Para essas predições, o programa usa dados gerados a partir medições anemométricas, de velocidade e direção dos ventos.

Esse modelo computacional interpola vertical e horizontalmente os dados de vento medidos em uma torre anemométrica, sobre diferentes tipos de topografia, visando obter uma grade de dados que descreva a climatologia eólica sobre a superfície da área a ser analisada e a uma determinada elevação, por meio de modelos que resolvem o fluxo eólico sobre diferentes tipos de topografia, e corrigindo os efeitos causados pela presença de obstáculos (MORTENSEN et al., 2005).

Numa primeira etapa, a climatologia regional do vento é calculada a partir de uma série temporal de velocidade e direção do vento. A velocidade do vento é dividida em até 12 setores direcionais para o cálculo do vento geostrófico. Os modelos do WAsP são então utilizados para calcular o vento para a estação a partir do vento geostrófico. As saídas consistem na distribuição de Weibull e velocidade do em até 12 setores direcionais.

O presente trabalho usará o WAsP com as seguintes finalidades: análise de dados de brutos de vento, gerar atlas de vento, climatologia dos vento em superfície, estimativa do potencial eólico.

O WAsP possui uma hierarquia para a inserção dos dados observados de ventos e parâmetros físicos da superfície. Inicialmente, cria-se um projeto no qual serão inseridos todos os parâmetros de entrada que serão necessários para fornecer os resultados pretendidos.

O primeiro parâmetro de entrada é o mapa topográfico da superfície, que contem os valores das isolinhas e que é obtido a partir de arquivos topográficos georeferenciados. A resolução do mapa depende da resolução do arquivo de origem, a partir do qual as isolinhas foram geradas e tem extensão *.map*.

4.2.1. Análise de dados Brutos

Esta opção permite uma análise de qualquer série temporal de medidas de vento para prover um resumo estatístico do clima de vento observado para um local específico.

A análise de dados brutos possui uma ferramenta chamada Climatologia de Vento Observado (Observed Wind Climate). Esta ferramenta fornece dois gráficos para direção e velocidade dos ventos. Um dos gráficos representa a distribuição de Weibull gerada a partir da velocidade do vento, informando os fatores de forma k e escala A , a velocidade média (U) e a densidade de potência (P) em Watts por metro quadrado ($W.m^{-2}$). Também, é gerado um gráfico de distribuição da frequência da direção dos ventos em até 12 setores. Para cada setor, ou seja, para cada faixa de direção, pode-se obter a distribuição de Weibull específica para a velocidade.

4.2.2. Geração de atlas de vento

Dados de vento analisados podem ser convertidos em uma climatologia de vento regional ou em um atlas de conjunto de dados de vento. Numa série de dados do

atlas de ventos as observações foram “limpas” no que diz respeito às condições específicas do sitio.

Para gerar o atlas de vento, é necessário inserir os dados observados da estação juntamente com o mapa topográfico da superfície, os valores de comprimento de rugosidade em torno da estação e possíveis obstáculos.

O comprimento de rugosidade da superfície é determinado pela vegetação ou tipo de superfície existente na região da estação meteorológica. Os valores de comprimento de rugosidade da superfície são tabelados e estão relacionados à altura em que o efeito do atrito causado pela superfície faz com que o vento tenha velocidade horizontal nula.

4.2.3. Estimativa da Climatologia do Vento

Usando um atlas de vento gerado pelo WAsP a partir de um conjunto de dados de campo, ou um atlas obtido de outra fonte, o programa pode calcular a climatologia dos ventos em qualquer ponto específico executando o cálculo inverso ao usado para gerar um atlas de vento. Introduzindo descrições da superfície ao redor do local predito, os modelos podem prever a climatologia de vento atual esperado neste local.

4.2.4. Estimativa do potencial eólico

A energia total contida na média dos ventos é calculada pelo WAsP. Além disso, uma estimativa atual, da produção de energia anual de uma turbina de vento pode ser obtida fornecendo ao WAsP a curva de potência da turbina eólica em questão.

Após inserir os dados de ventos e todos os parâmetros relativos às características da superfície, o software possibilita a simulação da energia gerada por uma determinada turbina no sitio estudado. O WAsP possui um pacote com as turbinas comercializadas no mundo todo, com os mais variados tamanhos e potências.

4.3. Dados

Os dados utilizados para realização desse estudo são dados de velocidade e direção do vento a 10 metros, observacionais, do modelo Eta HadCM e de reanálise ERA-40. Também foram empregados dados de topografia e vegetação dos locais de estudo. As séries observacionais são séries históricas com períodos entre 30 a 40 anos. O modelo também possui séries de dados para períodos de 30 anos em suas previsões assim como as reanálises.

4.3.1. Dados observados

Para estudo da tendência da velocidade do vento nas últimas décadas e validação do modelo climático, empregou-se dados de vento a 10 metros de estações de superfície e dados de reanálise em diferentes regiões do estado do Rio Grande do Sul. As séries históricas compreendem períodos entre 30 a 50 anos de dados de velocidade e direção do vento.

As estações usadas para esse estudo, descritas na Tabela 4.1, foram fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, pelo Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), do Comando da Aeronáutica, e pelo Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), da Marinha do Brasil.

Tabela 4.1 – Localização das estações, fonte dos dados e período das séries utilizadas.

Estação	Latitude	Longitude	Altitude (metros)	Período de Dados	Proprietário
Chuí	33°44'30"S	053°22'18"W	13	1964-2002	BNDO
Mostardas	31°14'52"S	050°54'24"W	1	1965-2002	BNDO
Rio Grande	32°02'S	52°06' W	2,46	1961-2007	INMET
Porto Alegre	29°59'40"S	051°10'18"W	10	1960-1999	ICEA
Torres	29°21'S	49°43' W	4,5	1961-2007	INMET
Santa Maria	29°42'39"S	053°41'32"W	88	1960-2000	ICEA
Uruguaiana	29°46'55"S	057°02'18"W	78	1960-1997	ICEA

Na Figura 4.5 estão representadas as estações sobre o território do estado Rio Grande do Sul. Quatro dessas estações encontram-se na região litorânea do estado e três no interior do continente.

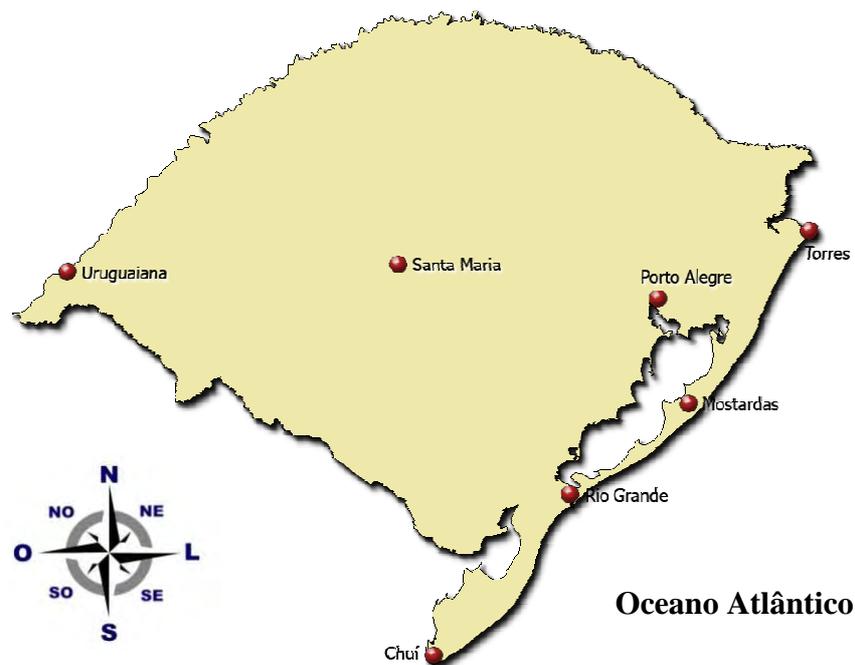


Figura 4.5 – Localização das estações de superfície utilizadas, no estado do Rio Grande do Sul.

Os dados das estações de Chuí e Mostardas, do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) são de propriedade do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (CHM). Essas duas estações estão localizadas no rádio-farol Chuí e radio-farol Mostardas na região costeira do estado do Rio Grande do Sul. As estações radio-farol Chuí e radio-farol Mostardas possuem séries de dados desde 1964 e 1965, respectivamente. Maiores informações sobre o BNDO podem ser obtidas na página <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/bndo/index.htm>.

As estações de Rio Grande, Torres, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, possuem uma séries históricas de dados de 1961 a 2007.

Os dados das estações dos aeroportos de Santa Maria (SBSM), Porto Alegre (SBPA) e Uruguiana (SBUG) foram fornecidos pela Subdivisão de Climatologia Aeronáutica do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA). Os dados fornecidos pela Aeronáutica são médias mensais para um período de 40 anos, de 1960 a 2000. Por norma, o ICEA não pode fornecer dados brutos ao usuário. Desta forma, os dados dessas estações foram fornecidos na forma de médias mensais.

4.3.2. Reanálises – ERA-40

As reanálises utilizadas nesse trabalho são dados do projeto ERA-40, obtidos de observações e dados de satélite para o período de setembro de 1957 a agosto de 2002. Os dados estão disponíveis em quatro informações diárias, para 00UT, 06UT, 12UT e 18UT.

As resoluções dessa reanálise são 60 níveis verticais com grades de 125 km de espaçamento. Os dados foram extraídos para as componentes U e V do vento ao nível de 10 metros para as mesmas coordenadas das estações de superfície utilizadas nesse trabalho.

4.3.3. Modelo climático empregado

A partir das simulações e projeções geradas pelo modelo Eta HadCM, foram calculadas e extraídas as séries temporais da magnitude e direção do vento para os pontos de grade que compreendem os sítios observacionais da Tabela 4.1.

Os dados de saída no modelo Eta HadCM extraídos nesse trabalho, são os dados de vento em superfície U 10m e V 10m, que correspondem as componentes de velocidade e direção do vento a 10 metros do solo. As séries extraídas correspondem aos pontos de grade que coincidem com as estações de observação. As rodadas do modelo geram 4 informações diárias para cada variável se saída do Eta HadCM, nas horas 00UT, 06UT, 12UT e 18UT.

4.3.4. Dados de topografia

Os dados de relevo empregados no trabalho são dados GTOPO30 global (USGS, 2008). Este é um modelo digital de elevação (DEM), com grade horizontal regularmente espaçada em arco de 30 segundos, equivalente em graus a 0,0083333333 graus (aproximadamente 1 km). No entanto esse valor diminui na direção leste/oeste (longitudinal) a medida que a latitude aumenta (GTOPO Documentation, 2008). A unidade horizontal representa uma elevação horizontal

em metros acima do nível médio do mar. A precisão vertical do GTOPO30 possui um erro linear de em torno de 30 metros a um nível de confiança de 90%.

Os arquivos de topografia de 40x40 km foram gerados tendo como ponto central as coordenadas das estações, conforme visto anteriormente na Tabela 4.1. Esses arquivos consistem em curvas de nível com espaçamento vertical de 10 metros. Cada isolinha é formada por diferentes pontos, cada deles formado por uma determinada latitude e uma longitude, e representam a mesma altitude em relação ao nível médio do mar.

4.3.5. Dados de vegetação

Os dados de vegetação a serem empregados são dados com resolução espacial de 1 km e projeção lat/lon. Esses dados foram obtidos a partir de dados digitais da vegetação do Projeto RADAM-IBGE (VIEIRA et al., 2007).

Foram utilizados os dados de vegetação para a região Sul do Brasil, o qual possui todas as classes de vegetação. A partir dessas informações pode-se determinar o comprimento de rugosidade da superfície com base na classificação do tipo de cobertura do solo, de acordo com a Tabela 2.1 vista anteriormente no Capítulo 2. A Figura 4.6 representa as classes de vegetação do estado do Rio Grande do Sul, onde estão distribuídas as estações utilizadas nesse trabalho.

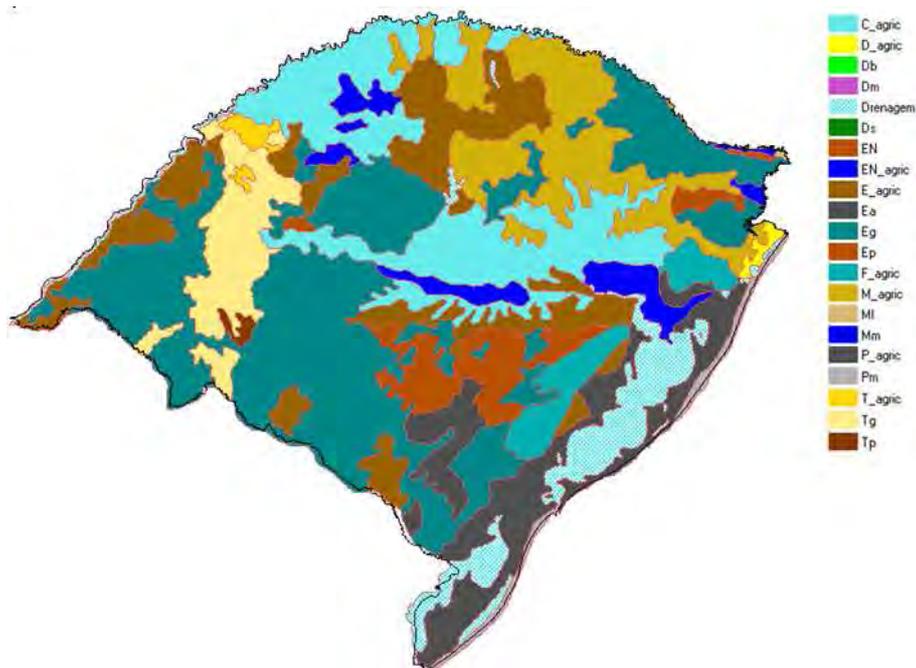


Figura 4.6 – Classes de vegetação no estado do Rio Grande do Sul.

Os limites de cada classe de vegetação são determinados por linhas as quais são adicionadas ao arquivo de topografia de cada região estudada. A área de vegetação possui os mesmos limites que a área de topografia. Com isso, ambas podem ser sobrepostas. As informações das linhas delimitadoras das classes de vegetação são acrescentadas a matriz de coordenadas. Nessa matriz cada ponto é representado por um valor de latitude e um de longitude.

Após processar a área de vegetação e topografia tendo como ponto central a estação, o próximo passo é gerar uma única matriz com as isolinhas e as linhas delimitadoras das classes de vegetação (Figura 4.7), funcionando como uma interface entre uma classe e outra. Dessa forma o WAsP pode identificar o tipo de cobertura do solo e os pontos onde ocorrem a mudança de cobertura, e a partir dessa informação é possível ele determina os diferentes comprimentos de rugosidade da superfície usados em seus modelos físicos e estatísticos.

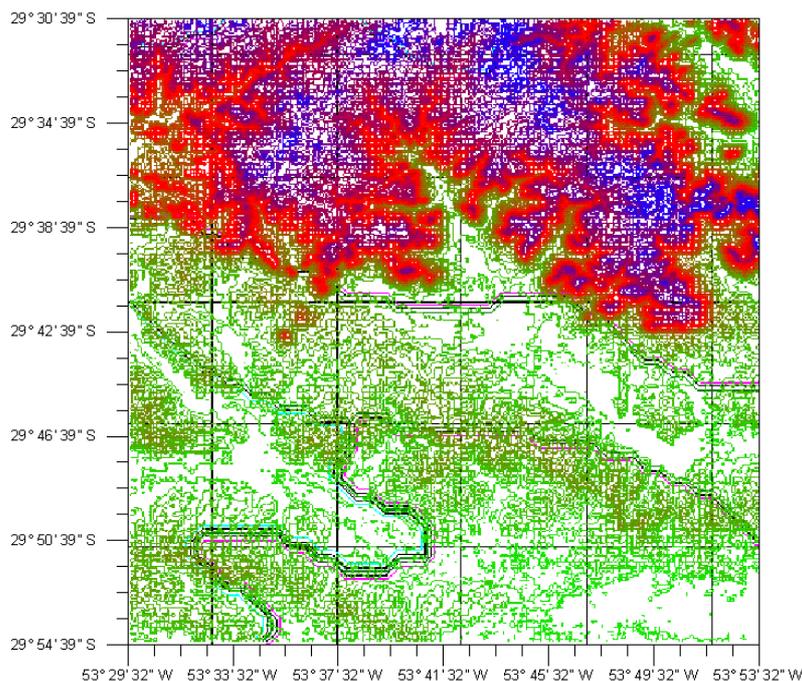


Figura 4.7 – Topografia GTOPO30 para a região de Santa Maria. O mapa apresenta o relevo (isolínhas) e classes de vegetação em um único arquivo para a região de Santa Maria. A estação está localizada no centro. A altitude aumenta no sentido verde-vermelho-azul.

O WAsP utiliza o mapa geo-referenciado para realizar a parametrização da superfície. Os mapas de topografia e vegetação para as outras estações estão no Apêndice A.

4.4. Controle de Qualidade dos Dados de Campo

O primeiro passo deste trabalho é o controle de qualidade dos dados de direção e velocidade dos ventos das estações utilizadas e das saídas do modelo Eta HadCM. Esse controle é necessário a fim de minimizar a possibilidade de análises tendenciosas devidas à baixa confiabilidade dos dados.

Os dados observacionais que possuem valores horários de velocidade e direção de vento passaram por um processo de controle de qualidade, no qual são sinalizados e retirados dados duvidosos, de acordo com os critérios adaptados da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) (EPA, 2000) e disponíveis via WebMET – The Meteorological Resource Center (WebMET, 2008). Esse processo de controle de qualidade dos dados é operacional no projeto SONDA –

Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais, coordenado pelo CPTEC/INPE.

O controle de qualidade consiste em avaliar as seguintes etapas:

- Eventos raros ou fisicamente impossíveis
- Variabilidade em curto prazo
- Variabilidade em longo prazo

Velocidade do vento: a velocidade do vento deve variar entre 0 e 25 m/s; não deve variar menos que 0,1 m/s por três horas consecutivas; não deve variar menos que 0,5 m/s por doze horas consecutivas.

Direção do vento: a direção do vento deve variar entre 0° e 360° graus; não variar menos que 1° por mais de três horas consecutivas; não variar menos que 10° graus por 18 horas consecutivas.

Na Figura 4.8 está representada a estrutura do teste empregado nas séries temporais utilizadas nesse trabalho.

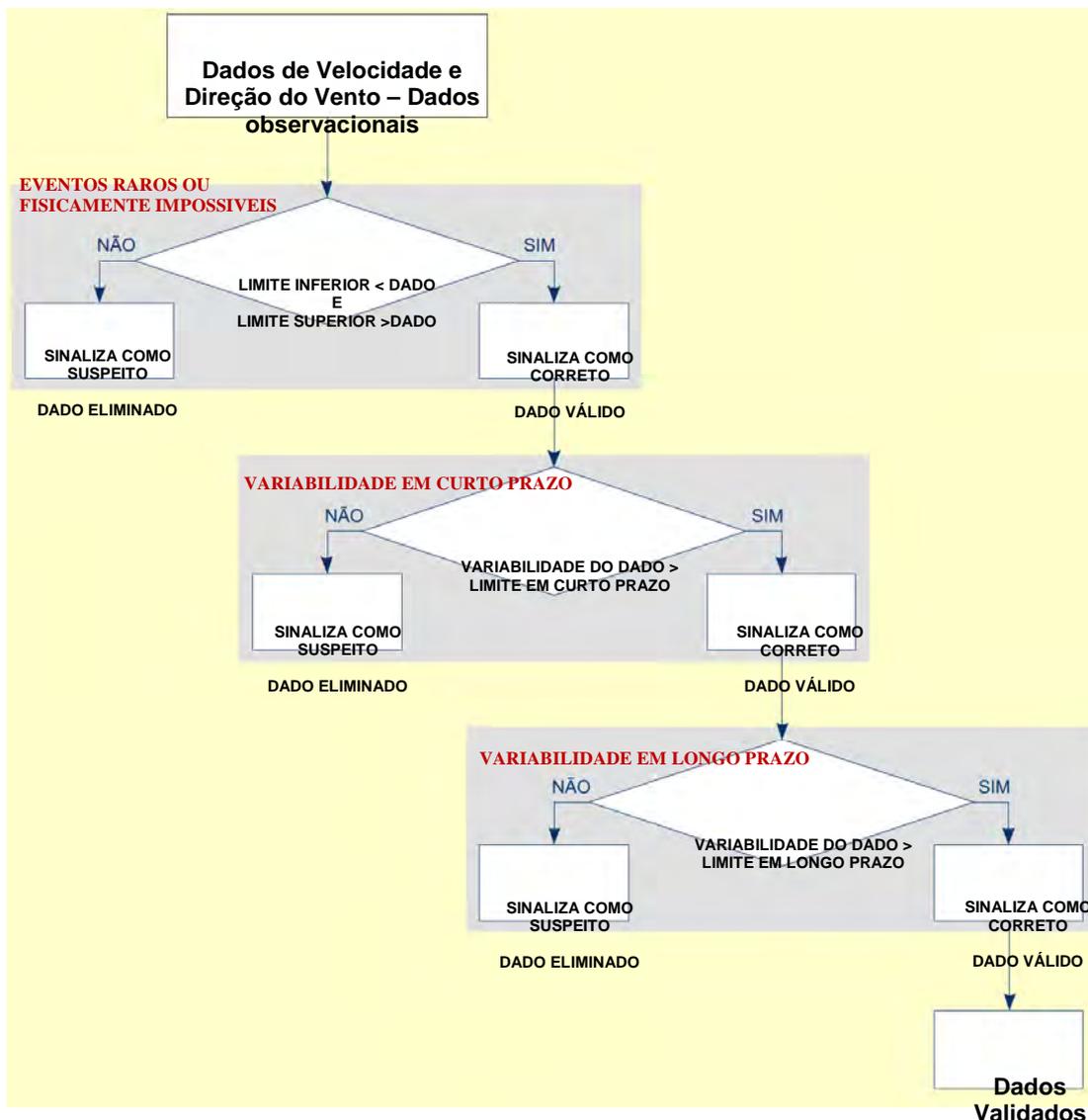


Figura 4.8 – Fluxograma representativo do algoritmo empregado para qualificação dos dados de direção e velocidade do vento.

4.5. Análise das séries históricas - Teste de Kendall

O teste de Kendall foi aplicado com o objetivo de identificar as possíveis tendências climáticas existentes nas séries de dados. Com isso, pode-se determinar a variação do vento atual ao longo das séries e comparar com as previsões futuras do modelo climático empregado.

O teste de Kendall proposto por Sneyers (1975) considera que, na hipótese de estabilidade de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de forma

independente, e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (BACK, 2001).

Goossens e Berger (1986) afirmam que o teste de Kendall é o método mais apropriado para analisar mudanças climáticas em séries climatológicas e permite também a detecção e localização aproximada do ponto inicial de determinada tendência.

Esse teste não paramétrico foi aplicado neste trabalho para as séries temporais dos dados observados visando encontrar possíveis tendências.

Sneyers (1975) descreve o método considerando uma série temporal x_i com N elementos, onde $1 \leq i \leq N$. O teste consiste na soma t_n do número de termos M_i da série, relativo ao valor x_i cujos termos precedentes ($j < i$) são inferiores ao mesmo ($x_j < x_i$).

$$t_n = \sum_{i=1}^n M_i \quad (4.3)$$

Para séries com grande número de termos, sob a hipótese nula (H_0) de ausência de tendência (BACK, 2001), t_n apresentará uma distribuição normal com média e variância igual a:

$$E(t_n) = \frac{N(N-1)}{4} \quad (4.4)$$

$$\text{Var}(t_n) = \frac{N(N-1)(2N+5)}{72} \quad (4.5)$$

Testando a significância estatística de t_n para a hipótese nula usando um teste bilateral, esta pode ser rejeitada para grandes valores de $u(t)$ dada por

$$u(t) = \frac{[t_n - E(t_n)]}{\sqrt{\text{Var } t_n}} \quad (4.6)$$

A hipótese nula é aceita ou rejeitada se $\alpha_1 > \alpha_0$ ou $\alpha_1 < \alpha_0$ respectivamente, para um nível de significância α_0 . O sinal de $u(t)$ indica se a tendência é crescente $u(t) > 0$ ou decrescente $u(t) < 0$ (BACK, 2001; RODRIGUES et al., 2007).

O valor da probabilidade α_1 é calculado com o uso de uma tabela normal reduzida, onde

$$\alpha_1 = \text{prob}(|u| > |u(t)|) \quad (4.7)$$

A significância do teste é em geral $\alpha_0 = 0,05$, valor que corresponde ao nível de confiança de 95%. Para isso, o valor de $u(t)$ deve estar entre -1,96 e 1,96 para que a hipótese H_0 seja satisfeita, ou seja, para que a série temporal não apresente uma tendência significativa.

4.6. Avaliação das Predições do Eta HadCM

A importância das validações do modelo deve-se ao fato de que é preciso conhecer quão confiáveis são as predições futuras do modelo, tendo em vista que os erros na determinação velocidade do vento são elevados ao cubo no cálculo de densidade de potência. Portanto, nesse processo, verifica-se os níveis de incerteza do modelo Eta HadCM nas estimativas das séries do período atual usando as séries observadas para obter-se a precisão do modelo. Esse processo consiste em projeções do modelo para períodos passados, portanto, contendo dados referentes a períodos em que existam dados medidos. Para isso, utilizou-se as séries de dados de superfície e as séries do período atual do modelo, conforme denominado doravante nesse trabalho, e que compreende o período atual de 1960 a 1990.

Idealmente, o procedimento de validação do modelo parte do princípio de que as séries de dados climatológicos observacionais são de alta confiabilidade. No entanto, pode-se verificar na Tabela 5.1 que isso não ocorre e um número representativo de valores teve que ser excluído das séries. Ainda, algumas séries consistem de médias mensais de velocidade do vento, o que impossibilita a

aplicação do algoritmo de qualificação dos dados. Contudo, estas são as melhores séries de dados climatológicos existentes para a realização desse trabalho.

Vários fatores importantes devem ser levados em conta na incerteza nessas informações: as estações utilizadas não possuem um histórico de manutenção (ex: calibrações e trocas de equipamentos); possíveis mudanças de local das estações, ou até mesmo alterações nas alturas dos medidores. A falta de calibração dos anemômetros ou o mal funcionamento desses, além de sua vida útil, são fatores que podem acrescentar erros às medidas da velocidade do vento. Adicionalmente, fatores que interferem diretamente no comprimento de rugosidade da superfície também não foram disponibilizados, tais como: mudanças no tipo de vegetação em volta da estação, e crescimento urbano.

Para avaliação da simulação do período atual do modelo Eta HadCM (1960-1990), os valores preditos foram comparados com os valores de vento medidos nos locais das estações de superfície.

Para quantificar o grau de incerteza do modelo aplicou-se três testes estatísticos, descritos a seguir.

- Coeficiente de Correlação de Pearson entre observações e predições (R): esse coeficiente mede a associação linear entre observações e predições e é definido pela seguinte equação:

$$R = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i - \bar{P}}{S_P} \right) \left(\frac{O_i - \bar{O}}{S_O} \right) \quad (4.8)$$

Onde S_P e S_O são, respectivamente, os desvios padrões das predições e observações, \bar{P} e \bar{O} são as médias das predições e observações, e N é o número de observações e suas respectivas predições. Substituindo S_P e S_O pelas suas equações, o coeficiente de correlação entre P e O pode ser calculado por:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (4.9)$$

O valor de R é adimensional e pode variar de -1 a 1 e sua previsão perfeita é 1. É possível ocorrer uma correlação elevada para uma previsão com grandes erros, pelo fato desse coeficiente ser independente da escala e por não levar em conta o viés da previsão.

- Raiz do Erro Quadrático Médio (*RMSE – Root Mean Squared Error*): Medida da magnitude média dos erros de previsão. Varia de 0 a infinito e seu valor para previsão perfeita é 0. Como é uma média quadrática, erros maiores possuem maior influência sobre o valor final do que os erros menores. Possui a mesma unidade das predições ou observações.

- Viés ou Erro Sistemático Médio (*BIAS ou ME – Mean Error*): Medida da média dos erros (Erro ou desvio = $P_i - O_i$) que permite verificar se a previsão é sistematicamente subestimada ou superestimada. Varia de infinito negativo a infinito positivo e seu valor para previsão perfeita é 0, mas pode atingir esse valor mesmo para uma previsão ruim, caso hajam erros compensatórios. Possui a mesma unidade das predições e observações.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (4.10)$$

Deve-se considerar também, que os modelos meteorológicos, assim como o modelo Eta HadCM, são empregados para fins de geração de campos de variáveis, de forma que as suas saídas não são pontuais e fornecem valores médios no interior da grade de integração, ao contrário das estações de observação que fornecem dados pontuais. No caso, as saídas do modelo Eta HadCM empregadas nesse trabalho, representam valores médios para uma grade horizontal de 40x40 km. Assim, ao comparar as predições com observações, os erros avaliados não são somente devidos ao procedimento de cálculo do modelo, mas também devidos à comparação dos campos do modelo com um ponto específico dentro desses campos. Adicionalmente se agregam os possíveis erros decorrentes de imprecisões nas condições iniciais e de contorno empregadas pelo modelo Eta HadCM e as incertezas dos dados observacionais, já mencionados anteriormente.

5. RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados obtidos pela comparação entre previsões, observações e reanálises são apresentados e discutidos. Inicialmente, será apresentada uma avaliação da previsão de vento em superfície do modelo Eta HadCM, juntamente com uma descrição dos diagramas de dispersão e uma discussão sobre os erros médios do modelo em relação às observações e dados de reanálise. Para ambas as comparações, foram calculados os coeficientes de Correlação de Pearson, o BIAS e o RMSE entre as séries.

Em seguida, serão discutidas as análises de tendência das séries observadas e do período atual do modelo, obtidas por meio do teste de Kendall.

Os campos de vento em superfície gerados pelo modelo também estão representados. Para cada período do modelo Eta HadCM foram gerados os campos de vento e a diferença entre os campos do período atual do modelo e os períodos de 2010-2040 e 2070-2100 do cenário A1B.

Na última seção, serão apresentadas os resultados obtidos com emprego do WAsP para as séries observadas, reanálise e as previsões do modelo Eta HadCM. Com o emprego do WAsP, obteve-se a distribuição estatística do vento para as estações, para o período atual do modelo, reanálises e os períodos futuros. Além disso, o potencial eólico foi calculado para cada série de dados ao nível de 10 metros, e extrapolado para 50 metros de altura com o uso do WAsP, em uma área de 40x40 km com valores de topografia e comprimento de rugosidade da superfície. Para essa nova altitude foram geradas as médias densidade de potência, velocidade média do vento e os parâmetros A e k e as velocidades e direções predominantes do vento.

5.1. Validação dos dados observados

Na Tabela 5.1 pode-se verificar as alterações nas séries após a validação, através do total de dados originais e o total de dados excluídos pela qualificação. A qualidade dos dados das estações varia muito, sendo que algumas das estações apresentaram até 17% dos seus dados rejeitados pelo processo, como é o caso da estação de Mostardas, enquanto outras não tiveram nenhum dado rejeitado.

Tabela 5.1 – Número total de dados originais das séries temporais empregadas no trabalho e dados excluídos com o uso do algoritmo de qualificação para valores de velocidade e direção do vento.

Estação	Período	Dados Originais	Dados Excluídos	Dados Válidos	Dados Excluídos (%)
Chuí	1964-2002	51515	6901	44614	13
Mostardas	1965-2002	48232	8357	39875	17,3
Rio Grande	1961-2007	13773	341	13432	2,4
Porto Alegre	1960-1999	481	0	481	0
Torres	1961-2007	14238	0	14238	0
Santa Maria	1960-2000	371	0	371	0
Uruguaiana	1960-1997	493	0	453	0

As séries de dados das estações de Santa Maria, Porto Alegre e Uruguaiana, fornecidas pelo ICEA não passaram pelo controle de qualidade, pois os dados foram disponibilizados em médias mensais, o que torna inviável a aplicação do algoritmo de validação. Torres, por sua vez, mesmo sendo submetida ao teste de validação não revelou nenhum dado fora dos critérios de validação seguidos.

5.2. Análise de tendência dos dados observados

Aplicou-se testes de tendência Kendall a um nível de confiança de 95% para todas as séries de dados observados. Os gráficos das séries podem ser visualizados no (Apêndice B). A tendência é classificada de três formas: *significativa positiva*, *significativa negativa* e *não significativa*, como pode ser visto nas Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4. Se a tendência for *não significativa* nada se pode afirmar em relação ao aumento ou decréscimo do vento ao longo do período estudado. Caso a série seja

significativa positiva, pode-se dizer com base na análise que a velocidade do vento aumentou ou está aumentando dentro do período considerado. Para a tendência *significativa negativa*, é possível afirmar que a velocidade do vento está diminuindo. O sinal de $u(t)$, da Equação 4.6, determina se a série apresenta uma tendência positiva ou negativa. Para o nível de confiança de 95%, os valores de $u(t)$ que determinam se a série possui uma tendência significativa estão fora do intervalo de 1,96 a -1,96. Os valores compreendidos dentro desse intervalo não são significativos.

Tabela 5.2 – Resultados de tendência obtidos com o teste de Kendall para as séries de dados observados.

Estação	Localização		Período de Dados	u(t)	Tendência
	Latitude	Longitude			
Chuí	33°44'30"S	053°22'18"W	1964-2002	3,0363	Significativa
Mostardas	31°14'52"S	050°54'24"W	1965-2002	1,4457	Não Significativa
Rio Grande	32°02'S	52°06' W	1961-2007	-0,1408	Não Significativa
Porto Alegre	29°59'40"S	051°10'18"W	1960-1999	-3,6817	Significativa
Torres	29°21'S	49°43' W	1961-2007	-5,7911	Significativa
Santa Maria	29°42'39"S	053°41'32"W	1960-2000	3,3081	Significativa
Uruguaiana	29°46'55"S	057°02'18"W	1960-1997	-2,0492	Significativa

Das sete estações analisadas, cinco apresentaram tendência significativa, ou seja, a hipótese nula de tendência H_0 não é satisfeita. As estações de Mostardas e Rio Grande não apresentaram tendência. Não há um padrão para as observações, pois duas das séries apresentam tendência crescente, três delas apresentam tendência decrescente e duas não têm tendência significativa.

Em seguida, aplicou-se o teste de Kendall para as séries do período atual do modelo Eta HadCM (Tabela 7.3). Ocorrem duas tendências significativas positivas para Porto Alegre e Santa Maria. Deve-se considerar que as séries correspondem à média da velocidade do vento para os pontos de grade de 40x40 km em que estão inseridas as estações de observação utilizadas no trabalho.

Tabela 5.3 – Resultados de tendência obtidos com o teste de Kendall para as séries de dados do Eta HadCM para o período atual.

Estação	Localização		Período de Dados	u(t)	Tendência
	Latitude	Longitude			
Chuí	33°44'30"S	053°22'18"W	1960-1990	0,2549	Não Significativa
Mostardas	31°14'52"S	050°54'24"W	1960-1990	1,0707	Não Significativa
Rio Grande	32°02'S	52°06' W	1960-1990	0,6628	Não Significativa
Porto Alegre	29°59'40"S	051°10'18"W	1960-1990	2,0565	Significativa
Torres	29°21'S	49°43' W	1960-1990	0,7308	Não Significativa
Santa Maria	29°42'39"S	053°41'32"W	1960-1990	2,6344	Significativa
Uruguiana	29°46'55"S	057°02'18"W	1960-1990	1,3087	Não Significativa

Aplicando o teste de Kendall para as séries de reanálise, obtive-se tendências significativas para quatro locais. Chuí apresentou tendência significativa negativa, enquanto Mostardas, Rio Grande e Porto Alegre apresentaram tendência significativa positiva.

Tabela 5.4 – Resultados de tendência obtidos com o teste de Kendall para as séries de dados de reanálise ERA-40 para o período atual.

Estação	Localização		Período de Dados	u(t)	Tendência
	Latitude	Longitude			
Chuí	33°44'30"S	053°22'18"W	1960-1990	-3,9941	Significativa
Mostardas	31°14'52"S	050°54'24"W	1960-1990	4,0621	Significativa
Rio Grande	32°02'S	52°06' W	1960-1990	4,0621	Significativa
Porto Alegre	29°59'40"S	051°10'18"W	1960-1990	3,6542	Significativa
Torres	29°21'S	49°43' W	1960-1990	1,7166	Não Significativa
Santa Maria	29°42'39"S	053°41'32"W	1960-1990	0,0169	Não Significativa
Uruguiana	29°46'55"S	057°02'18"W	1960-1990	-0,9008	Não Significativa

5.3. Validação do modelo Eta HadCM

As avaliações do modelo Eta HadCM foram realizadas para a saída de velocidade e direção do vento em 10 metros do período atual do modelo. As predições do modelo foram comparadas com o vento medido (observações) e com dados de reanálise ERA-40.

A partir dos desvios calculados entre predições, observações e reanálise, foram calculados o erro sistemático médio, a raiz do erro quadrado médio e o coeficiente

correlação de Pearson as quais serão tratadas ao longo desse capítulo como BIAS, RMSE e R , respectivamente.

O uso do R é importante, pois, o BIAS influencia as medidas de erro aleatório RMSE. Quando o BIAS for elevado, positivo ou negativo, as previsões encontram-se sistematicamente afastadas das observações, contribuindo para um maior valor nos módulos dos desvios e conduzindo a maiores erros de RMSE. Portanto, usou-se o R para medir o espalhamento dos pontos, medindo o grau de linearidade observado entre previsões, observações e reanálise. Ainda, o BIAS apresentado nesse trabalho refere-se à velocidade de vento em metros por segundo (m.s^{-1}) e em alguns casos seu valor é negativo. Deve-se considerar que o valor negativo refere-se à variação do BIAS em torno das observações e não o valor da velocidade propriamente dito, pois a existência de velocidade negativa é fisicamente impossível.

Nos diagramas de dispersão, o comportamento geral das previsões P do modelo, em função das observações O , é descrito por ajustes lineares $P = a + b.O$ calculados com base em todos os pontos e representados por linhas vermelhas. O mesmo vale para comparação do modelo Eta HadCM com dados de reanálise ERA-40. Os coeficientes lineares a e angulares b , bem como os coeficientes de correlação R , calculados para os ajustes lineares são apresentados nos cantos inferiores direitos de cada diagrama de dispersão. As linhas azuis que passam pela origem dos gráficos representam os casos ideais, com coeficientes angulares unitários. Elas representam os casos em que as previsões seriam perfeitas, assumindo o mesmo valor das observações $P = O$.

5.3.1. Topografia do Modelo Eta HadCM

As séries de dados de vento em 10 metros foram extraídas das grades do modelo Eta HadCM em que as estações de observação estão inseridas, de acordo com a posição latitude e longitude de cada estação. Quando observa-se a topografia das grades do modelo Eta HadCM verifica-se que em alguns casos ocorre uma grande variação na topografia dentro dessa grade. Isso está representado na Figura 5.1,

onde os pontos em amarelo representam o local da estação dentro do ponto de grade do modelo.

O modelo Eta utiliza o método da silhueta para calcular a altura de cada degrau da topografia do modelo, obtendo no final uma altura média, a qual irá coincidir com um dos níveis do modelo. Este pode ser um dos fatores que implicam no aumento do erro sistemático, encontrado quando valida-se o modelo a partir de dados observacionais.

Ainda, deve-se considerar que a topografia inserida na parametrização de superfície do modelo WAsP não coincide com a topografia do modelo Eta HadCM. Isso acontece devido ao fato da topografia usada no WAsP ter seu domínio determinado tendo como ponto central a estação de observação de dados de ventos.

As grades do modelo Eta HadCM utilizadas nesse trabalho são denominadas com os mesmo nome das estações que encontra-se inseridas em cada um desses domínios. Pode-se observar que as grades com maior variação no relevo, são Porto Alegre, Torres e Santa Maria. As grades de Chuí, Mostardas e Rio Grande apresentam topografia bem homogênea no que se refere à área continental. Ainda, estas últimas apresentam uma grande superfície de água, já que essas são regiões litorâneas. Uruguaiana possui topografia e vegetação bastante homogêneas.

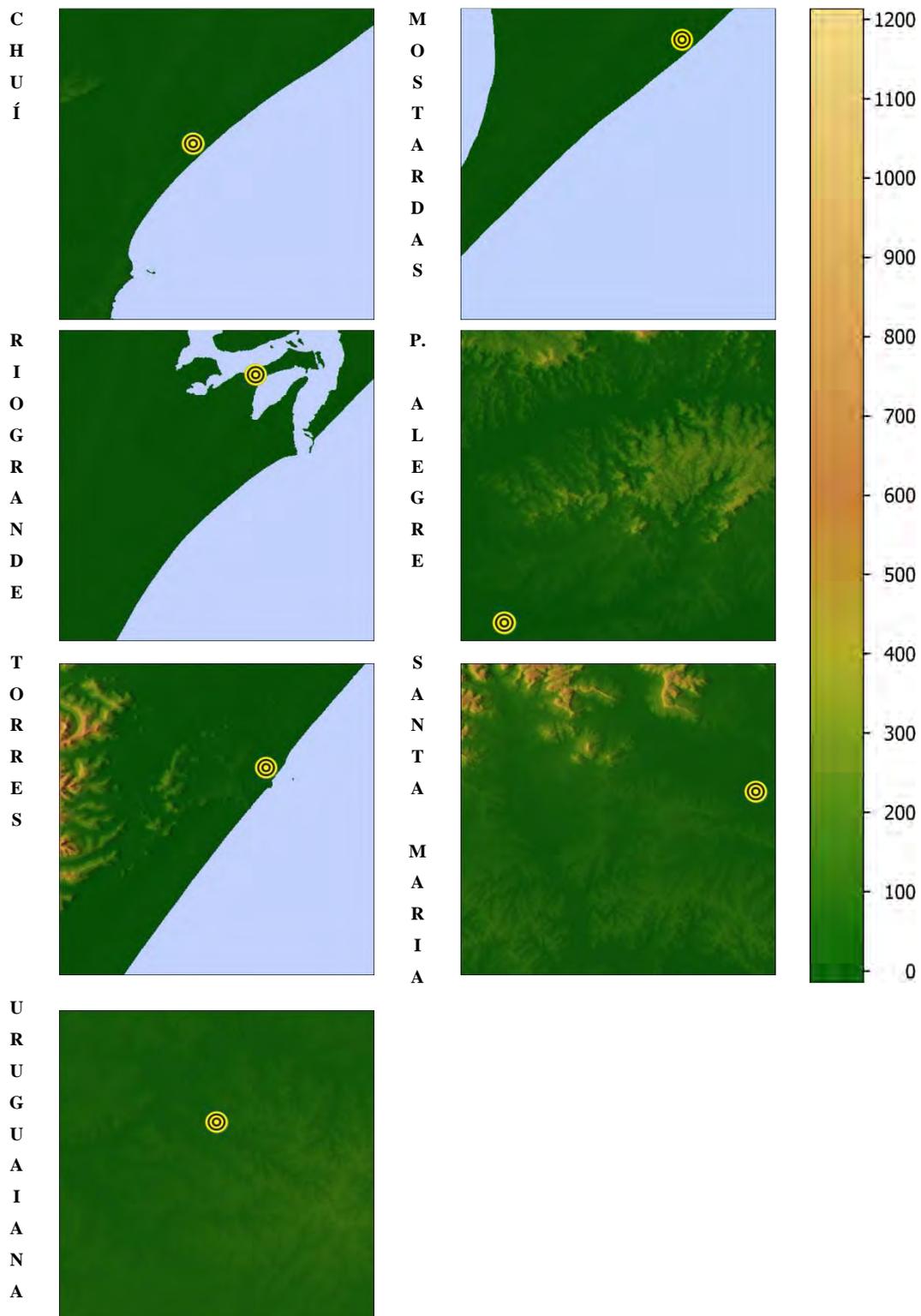


Figura 5.1 – Topografia de 40x40 km referente às grades do modelo Eta HadCM. A escala representa a altitude do continente em relação ao nível do mar, o qual está representado em azul. Por convenção, o nome do ponto de grade foi determinado com base no nome da estação que

está inserida dentro desse domínio. As estações estão representadas por pontos amarelos.

5.3.2. Determinação de *R*, BIAS E RMSE

Inicialmente, trabalhou-se com os Modelo Eta CCS e HadRM3P para determinar o período atual e os prognósticos desses dois modelos para os cenários futuros A2 e B2. No entanto, a validação dos modelos e os valores de potencial eólico obtidos foram pouco satisfatórios para o vento em 10 metros. Ambos modelos subestimaram muito os dados observados e resultaram em valores de BIAS e RMSE maiores que o modelo Eta HadCM utilizado posteriormente. Na Tabela 5.5 é apresentada os valores de *R*, o BIAS e RMSE.

Tabela 5.5 - Valores de *R*, BIAS e RMSE entre as séries observadas e séries do período atual do modelo Eta CCS e do modelo HadRM3P.

	Eta CCS x Observado			HadRM3P x Observado		
	<i>R</i>	BIAS (m/s)	RMSE (m/s)	<i>R</i>	BIAS (m/s)	RMSE (m/s)
Chuí	0,77	-2,80	3,19	0,81	-2,79	3,18
Mostardas	0,39	-2,85	3,65	0,72	-3,15	3,86
Rio Grande	0,60	0,10	1,41	0,84	-0,74	1,32
Porto Alegre	0,41	2,22	2,13	0,94	-1,27	1,66
Torres	0,42	-0,39	2,02	0,72	-1,21	1,93
Santa Maria	0,87	1,94	2,09	0,77	-1,31	1,52
Uruguiana	0,93	0,83	1,23	0,73	-1,86	2,02

Pode-se observar que o *R* para o modelo Eta CCS e HadRM3P são menores que os valores de *R* obtidos com o modelo Eta HadCM, apresentados posteriormente na Tabela 5.9. O BIAS e o RMSE possuem valores altos, mostrando um desvio grande dos modelos em relação às observações.

Verificou-se o Coeficiente de Correlação de Pearson entre os valores sazonais e o ciclo anual dos dados observados e do modelo Eta HadCM, para o período atual. Essa avaliação nos permite determinar quão próximo da realidade estão as predições do Eta HadCM. Os valores da correlação sazonal foram baixos, conforme pode-se observar na Tabela 7.6. Chuí, Mostardas e Torres apresentaram valores abaixo de 0,2.

Tabela 5.6 – Correlação de Pearson entre dados observados e período atual do modelo Eta HadCM para valores sazonais.

Estação	Total de meses	R
Chuí	320	0,190
Mostardas	302	0,159
Rio Grande	268	0,381
Porto Alegre	372	0,481
Torres	290	0,140
Santa Maria	249	0,442
Uruguiana	368	0,454

As estações que apresentaram a melhor correlação para este caso foram Porto Alegre, Santa Maria e Uruguiana, com R superior a 0,44.

Considerando que foram comparadas séries observacionais, as quais possuem grande variação temporal, com séries de modelo, as quais séries possuem menor variação em torno de sua média, realizou-se a correlação para médias de cada mês do ano, utilizando todos os meses de todo o período. Assim, obteve-se doze pontos para ambas as séries.

Nos gráficos da Figura 5.2 e 5.3, verificaram-se os parâmetros de incerteza aplicados aos ciclos anuais de toda série de dados para cada uma das estações. O eixo das abscissas representa os valores de vento observado, e o eixo das ordenadas representa os valores do vento predito pelo modelo Eta HadCM. Os pontos do gráfico representam a velocidade média do vento para cada mês.

A distância vertical dos pontos a linha azul corresponde à diferença ou desvio da previsão em relação à observação $P_i - O_i$. A medida do espalhamento em torno da linha vermelha nos diagramas de dispersão não é influenciada pelo BIAS.

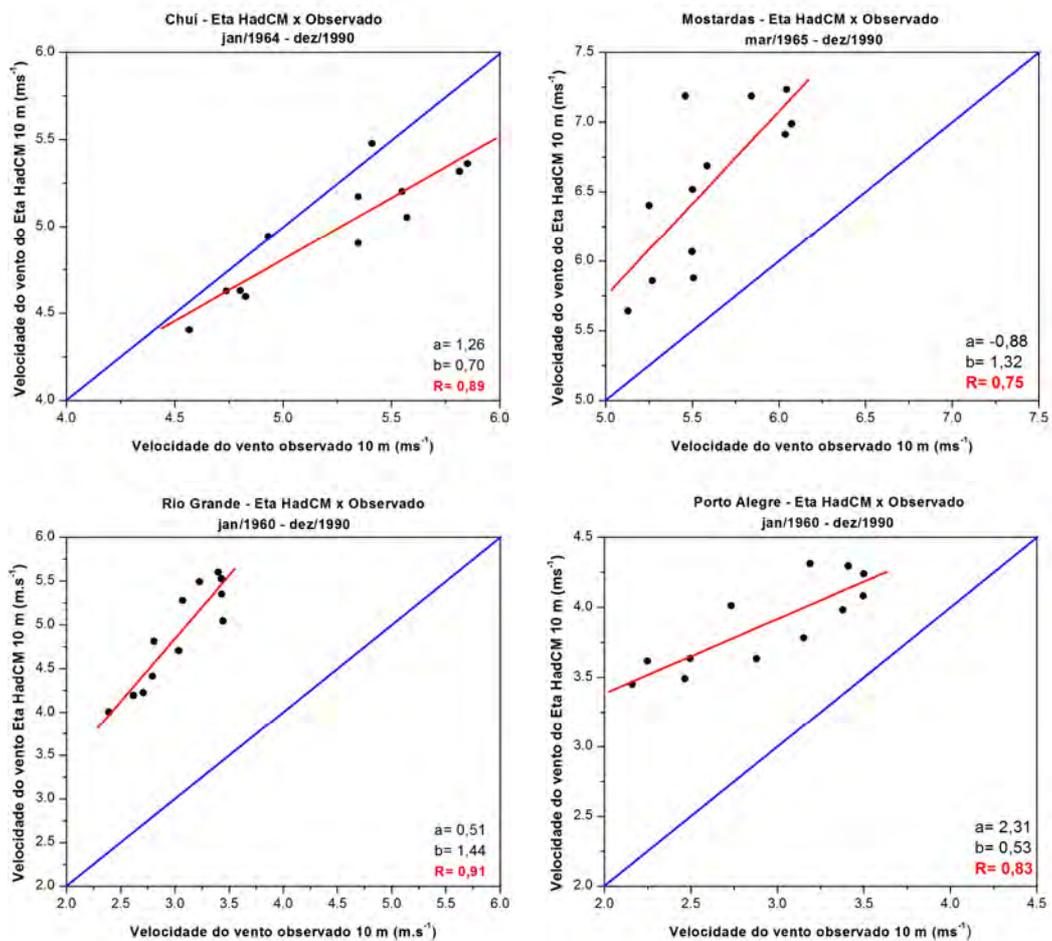


Figura 5.2 – Diagrama de dispersão das médias mensais da velocidade do vento a 10 metros para as estações de Chuí, Mostardas, Porto Alegre e Rio Grande.

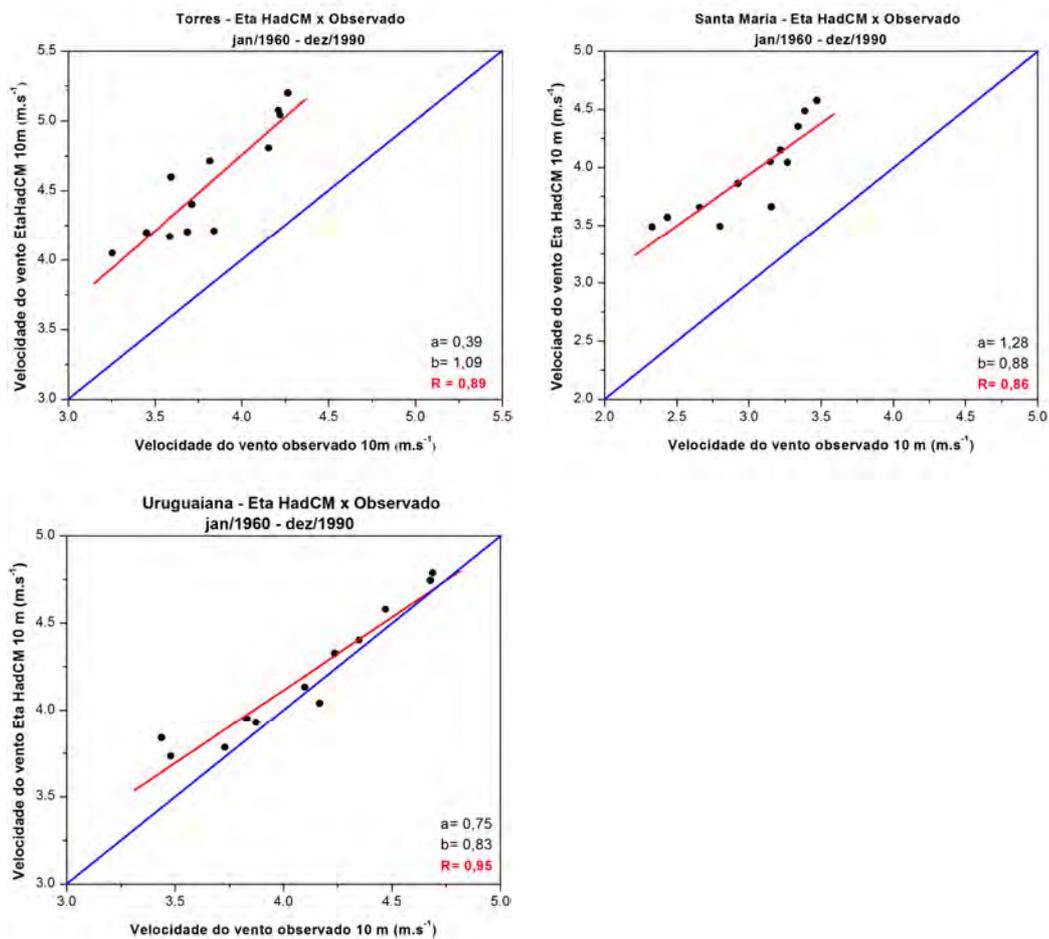


Figura 5.3 – Diagrama de dispersão das médias mensais da velocidade do vento a 10 metros para as estações de Santa Maria, Torres e Uruguaiiana.

Pode-se observar que nos diagramas de dispersão da Figura 5.3, com exceção de Mostardas, os pontos situam-se acima da reta azul. Isso indica que o modelo está superestimando intensidades de vento. Na Tabela 5.7 estão representados os coeficientes de correlação R para as sete estações utilizadas nesse trabalho.

Tabela 5.9 – Coeficiente de determinação de correlação entre o modelo Eta HadCM e as estações de superfície.

Índice	Chuí	Mostardas	Rio Grande	Porto Alegre	Torres	Santa Maria	Uruguaiiana
R	0,89	0,75	0,91	0,83	0,89	0,86	0,95

Nas Figuras 5.4 a 5.17 são apresentados os gráficos do BIAS, RMSE juntamente com seus valores médios e os valores médios de velocidade do vento para observações e modelo. As linhas em vermelho e azul representam o ciclo anual do

vento observado e do modelo, respectivamente. As linhas verticais em preto representam os valores de máximos e mínimos da velocidade média do vento observado para cada mês. Com base nessas análises, pode-se verificar que a velocidade média do vento entre o modelo Eta HadCM e os dados observacionais, para os locais de estudo teve uma variação de 0,10 a 0,95 m/s, com exceção de Rio Grande, que apresentou variação maior, de 1,48 m/s. Ainda, em todos os casos, com exceção de Chuí, o modelo superestima os a velocidade média do vento.

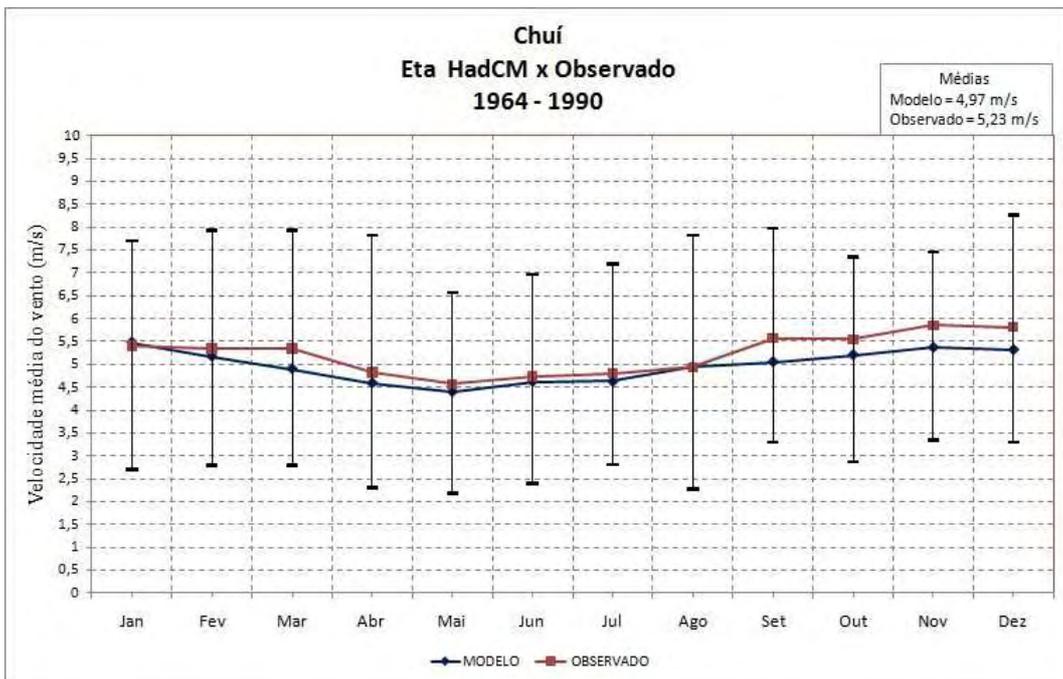


Figura 5.4 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações para a estação de ChuÍ no período de 1964 a 1990.

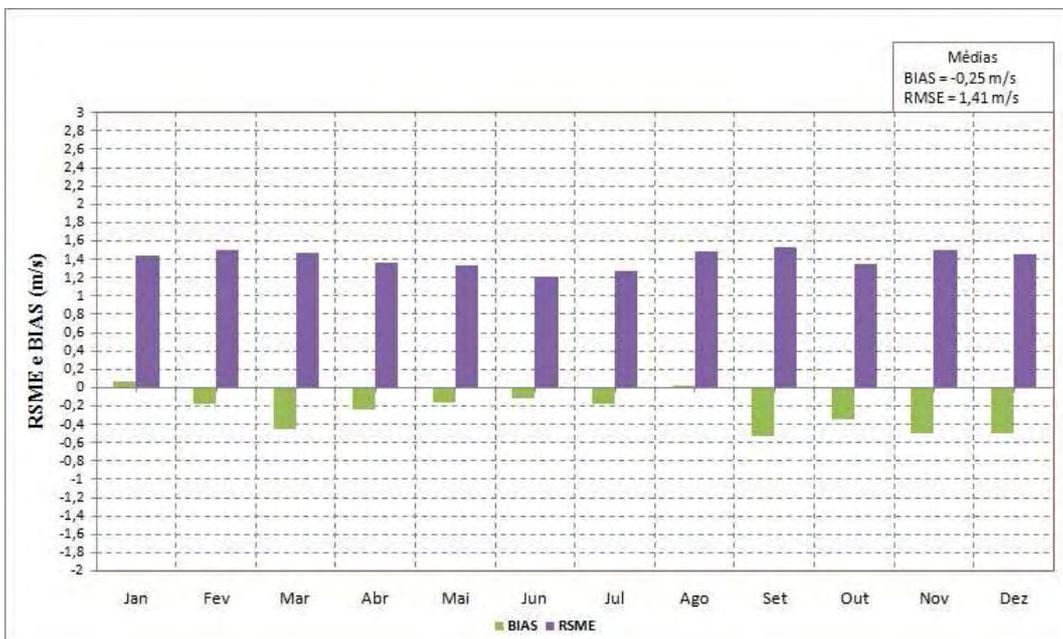


Figura 5.5 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de ChuÍ no período de 1964 a 1990.

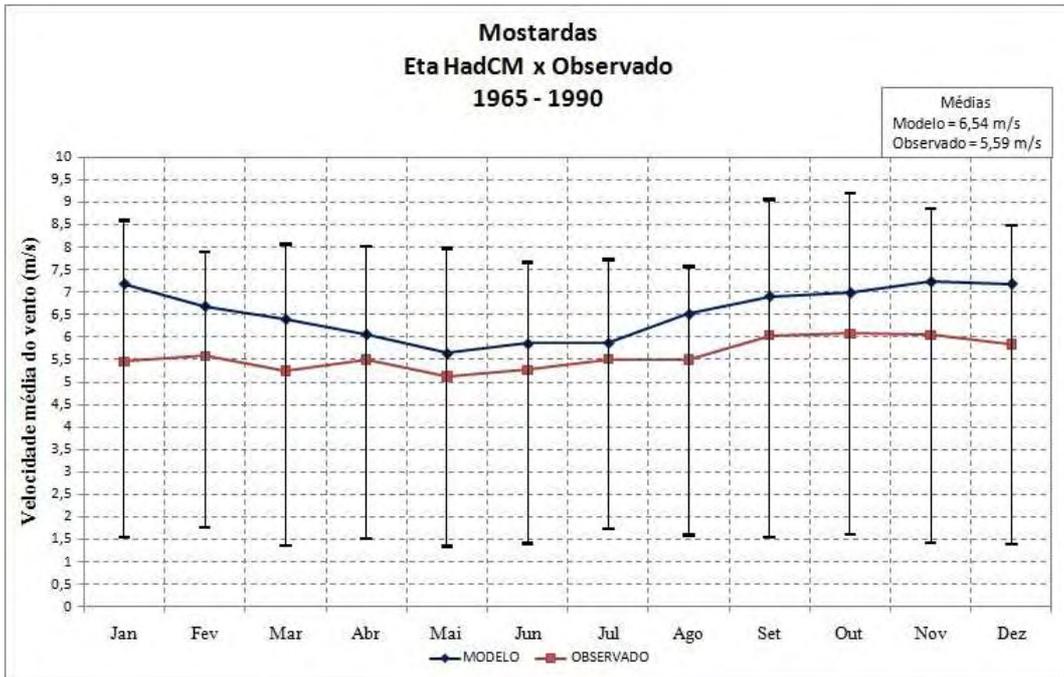


Figura 5.6 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações para a estação de Mostardas no período de 1965 a 1990.

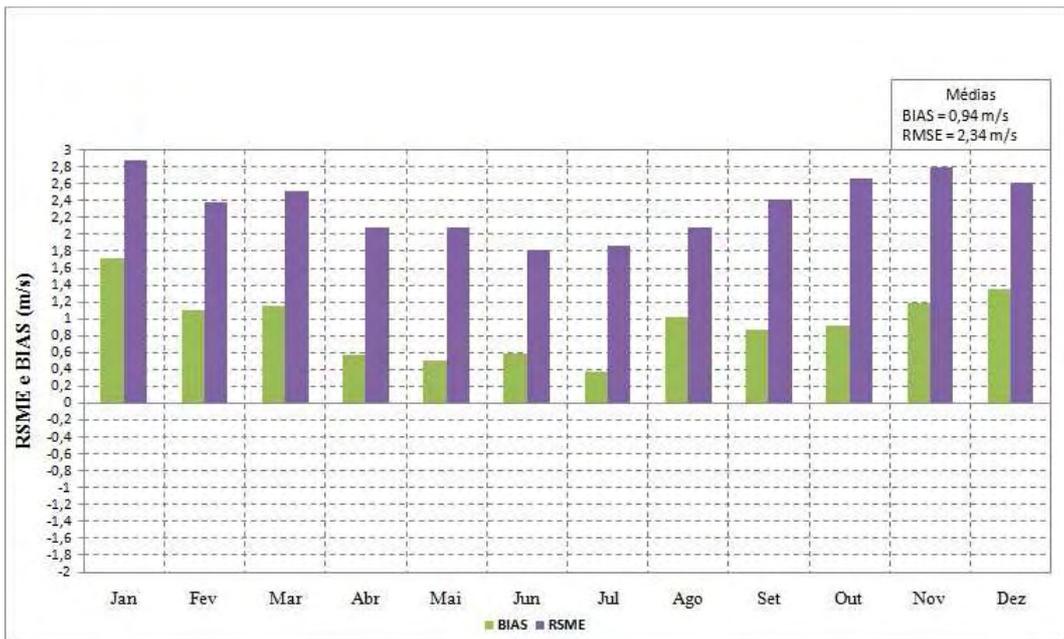


Figura 5.7 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de Mostardas no período de 1965 a 1990.

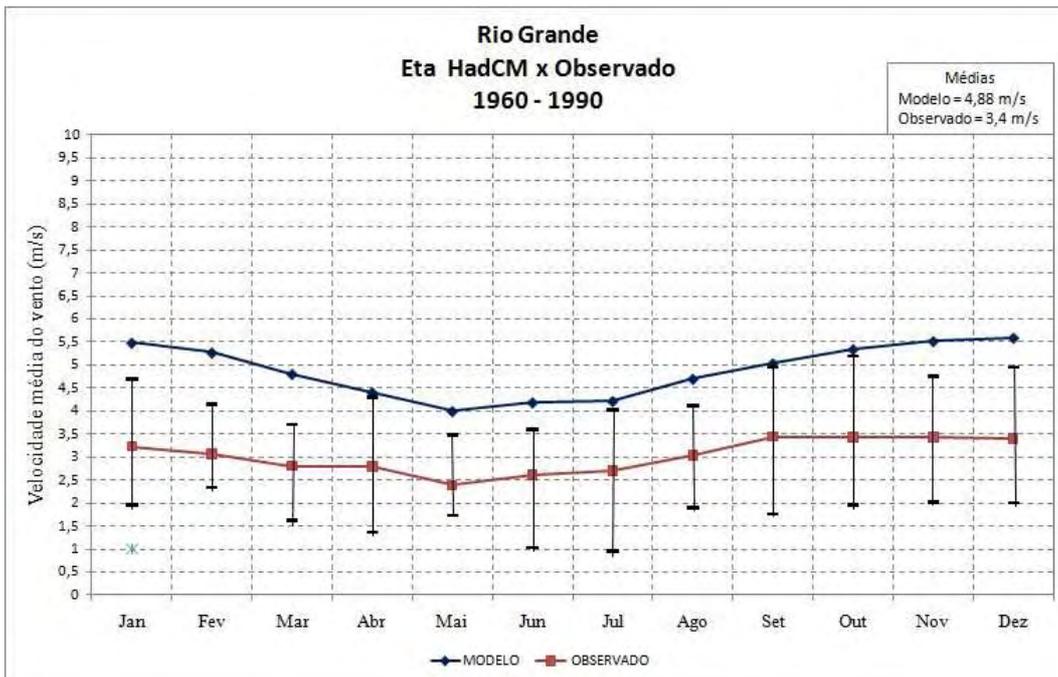


Figura 5.8 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações da estação de Rio Grande no período de 1960 a 1990.

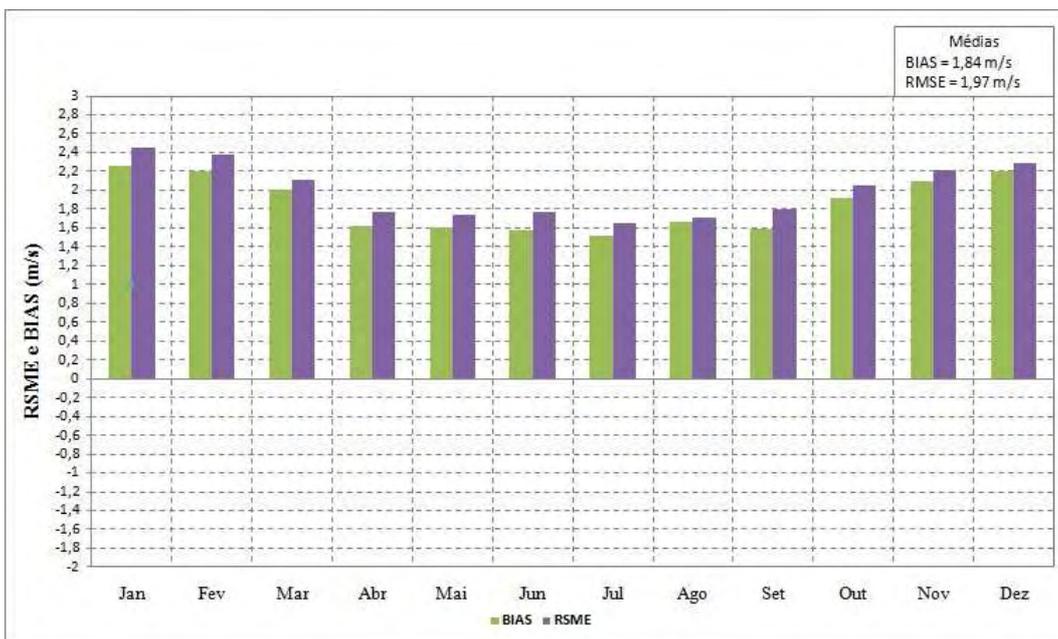


Figura 5.9 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de Rio Grande no período de 1960 a 1990.

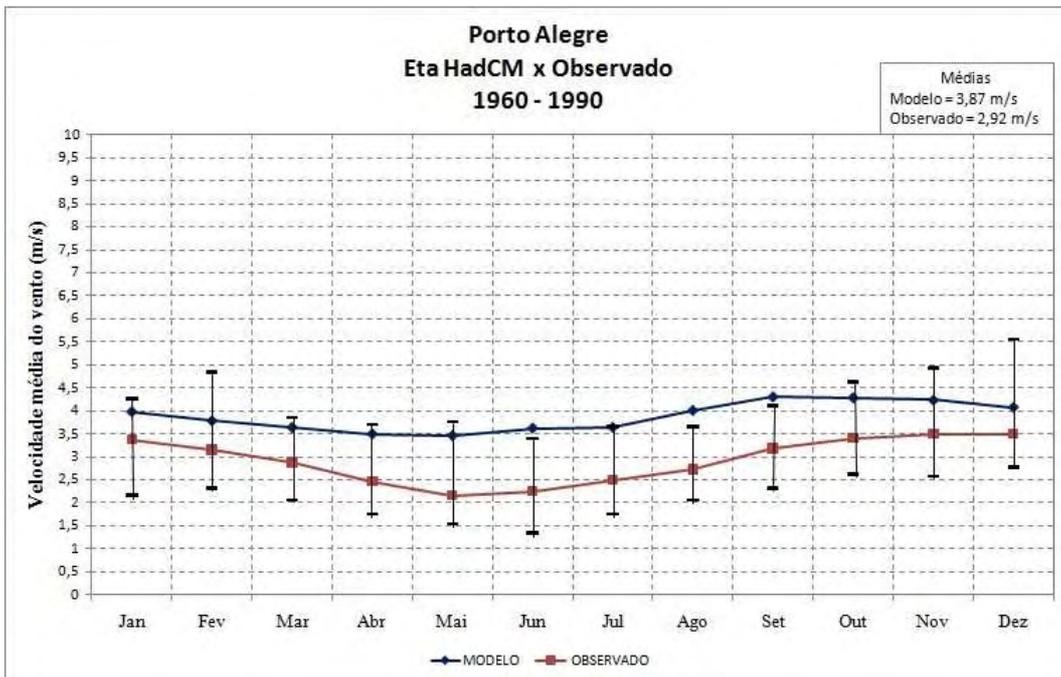


Figura 5.10 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações para a estação de Porto Alegre no período de 1960 a 1990.

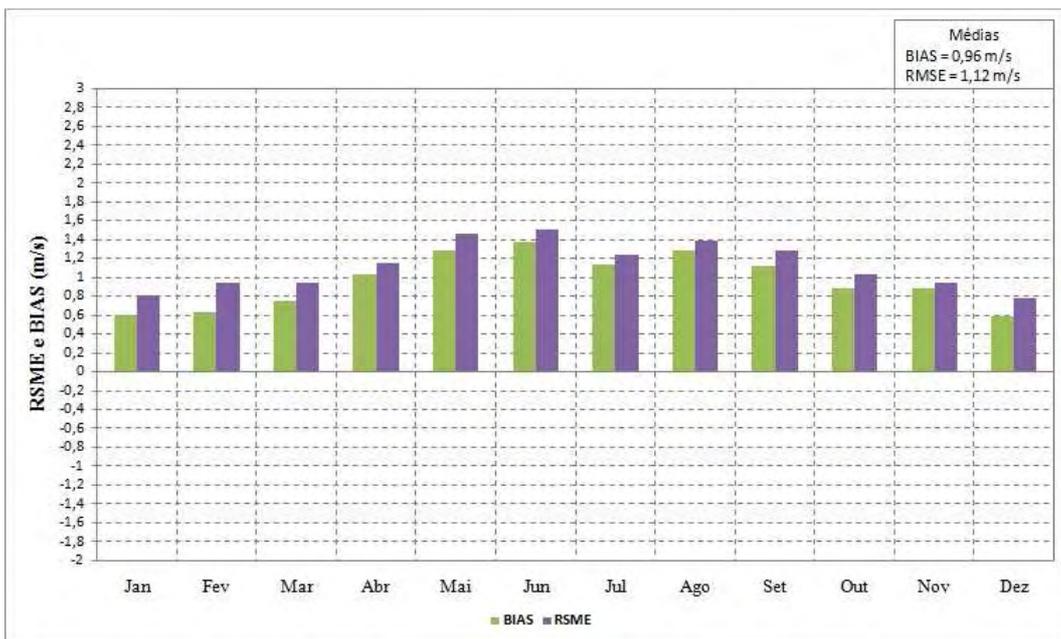


Figura 5.11 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de Porto Alegre no período de 1960 a 1990.

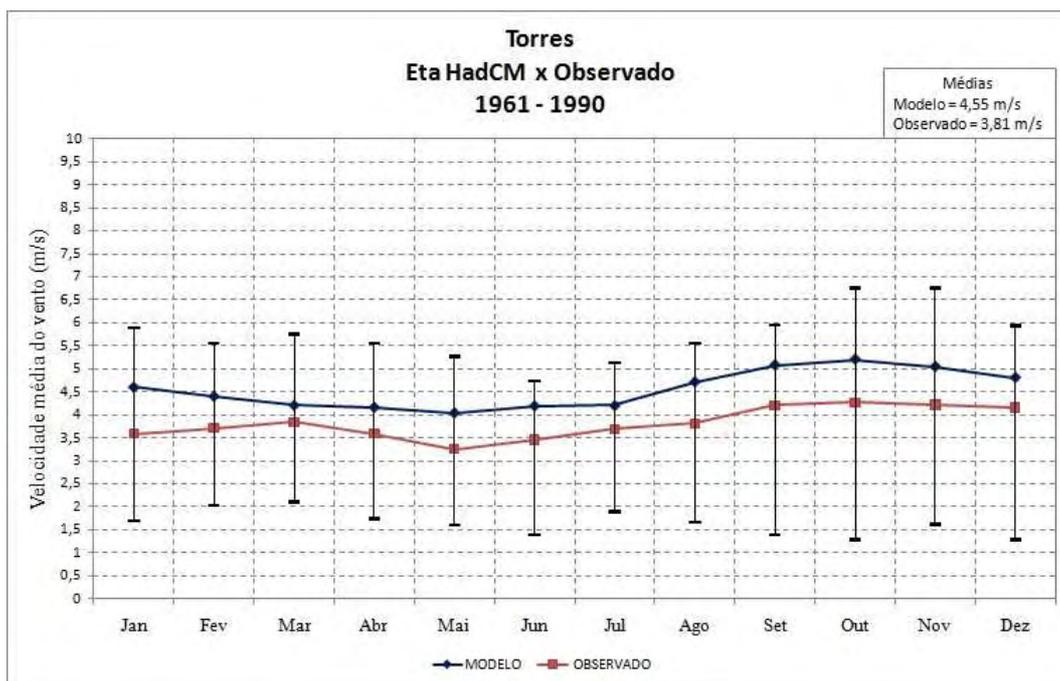


Figura 5.12 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações para a estação de Torres no período de 1961 a 1990.

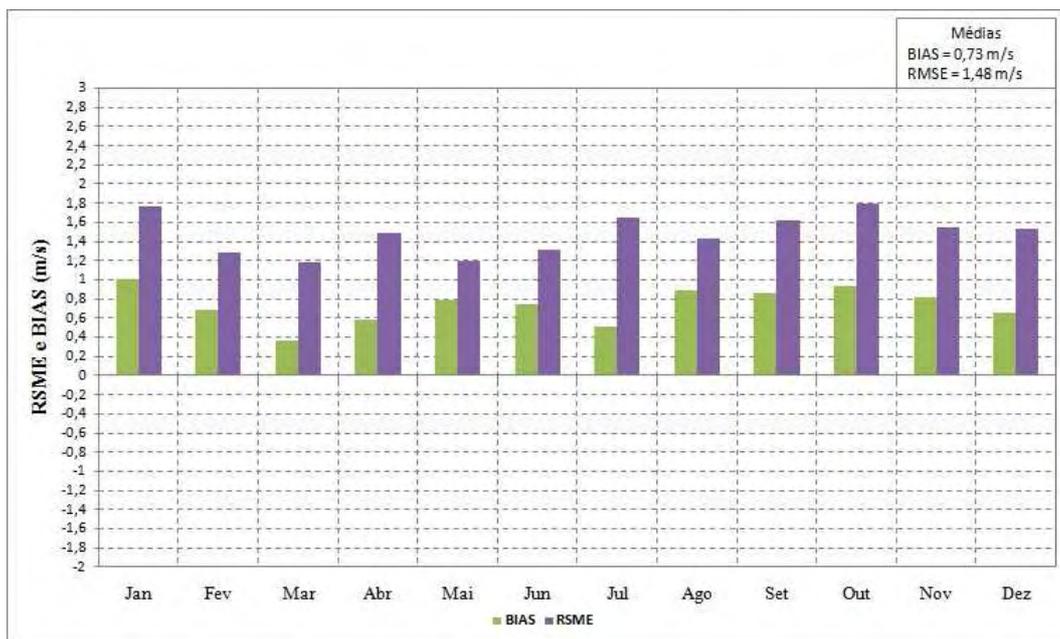


Figura 5.13 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de Torres no período de 1961 a 1990.

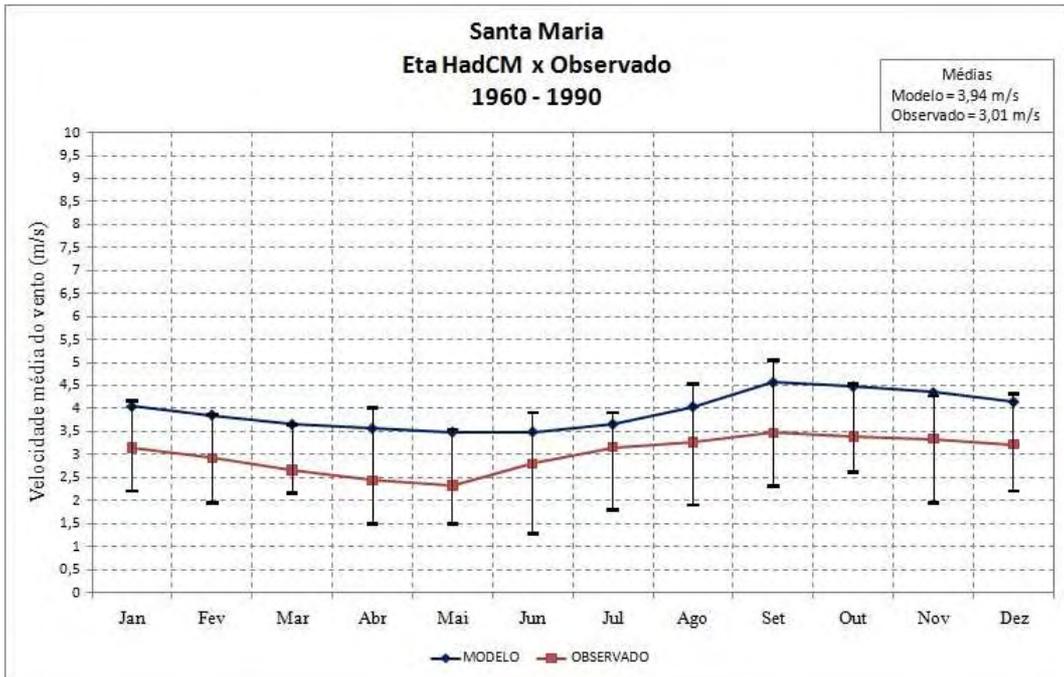


Figura 5.14 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações para a estação de Santa Maria no período de 1960 a 1990.

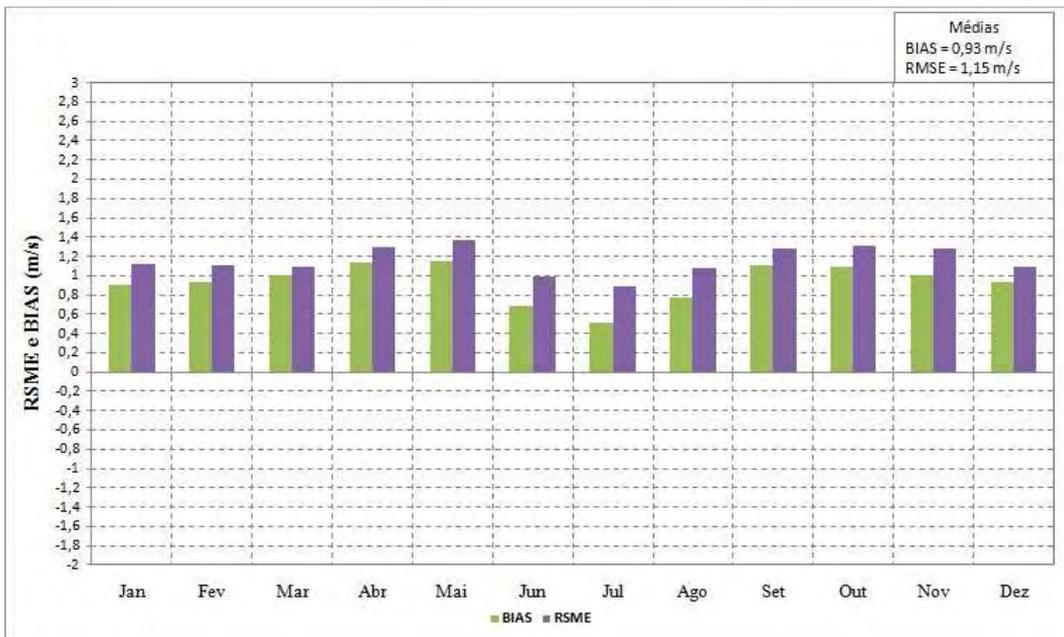


Figura 5.15 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de Santa Maria no período de 1960 a 1990.

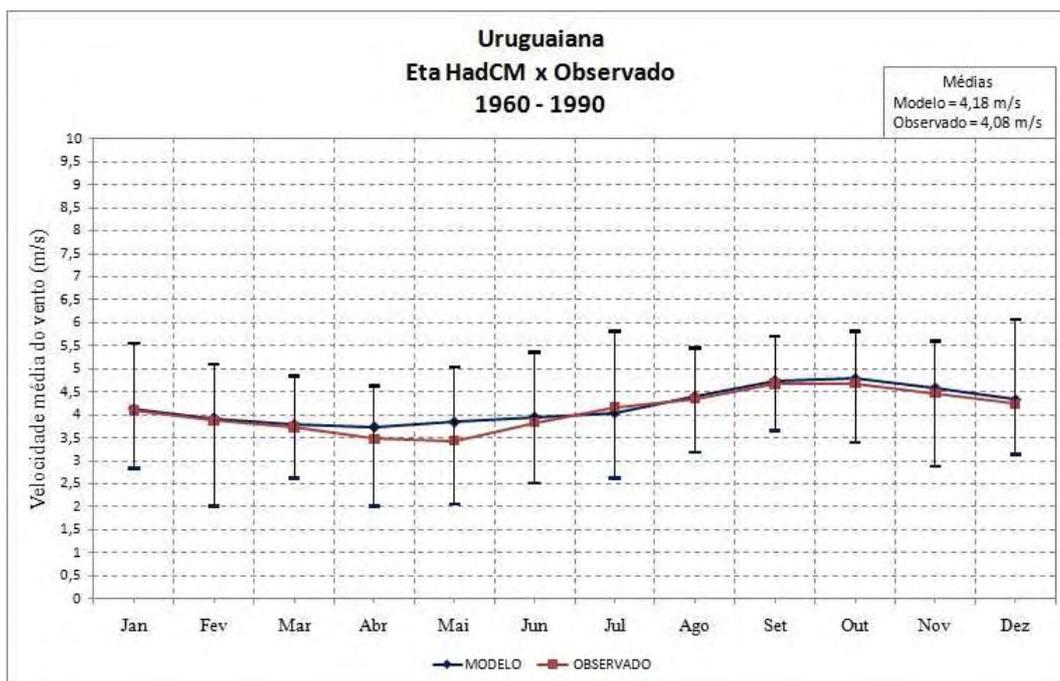


Figura 5.16 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e observações para a estação de Uruguaiiana no período de 1960 a 1990.

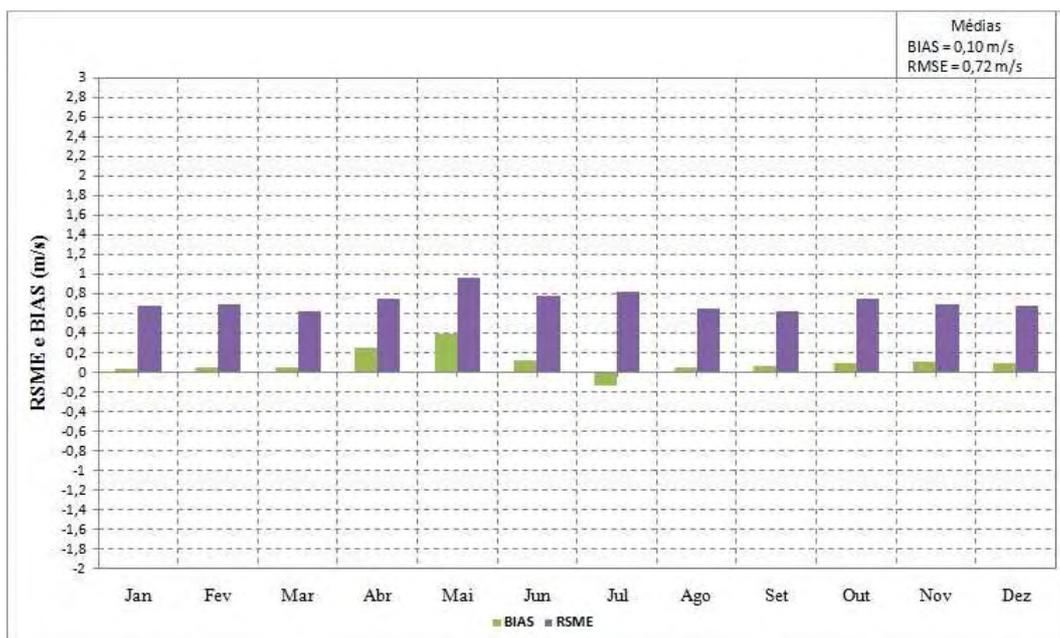


Figura 5.17 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e observações para a estação de Uruguaiiana no período de 1960 a 1990.

Na maioria dos casos, o modelo apresenta BIAS elevado, como no caso de Rio Grande, Mostardas e Porto Alegre. No entanto para as estações de Chuí e

Uruguaiana, o valor do BIAS é baixo, de -0,25 m/s e 0,10 m/s respectivamente. Observou-se ainda que apesar do modelo Eta HadCM apresentar BIAS e RMSE elevados, os coeficientes de correlação indicam bons níveis de correlação entre predições e observações para os ciclos anuais, sempre superiores a 0,74 podendo chegar a 0,95 conforme apresentado na Tabela 5.9.

A Tabela 5.10 apresenta os erros médios percentuais do BIAS e do RMSE obtidos através da razão dos erros médios pelas médias das observações (\bar{O}). Verifica-se que o BIAS é positivo em todos os casos com exceção de Chuí.

As maiores velocidades médias observadas foram para as estações de Chuí, Mostardas e Uruguaiana. Rio Grande, Torres e Santa Maria apresentaram velocidades médias inferiores a 4 m.s⁻¹, enquanto Porto Alegre revelou uma velocidade média inferior a 3 m.s⁻¹. Os maiores BIAS% e RMSE% ocorreram para Rio Grande, de 54% e 59%.

Tabela 5.10 – Valores dos erros médios relativos obtidos nos gráficos das Figuras 5.4 a 5.17 envolvendo observações e modelo.

Índice	Chuí	Mostardas	Rio Grande	Porto Alegre	Torres	Santa Maria	Uruguaiana
BIAS*	-0,25	0,94	1,84	0,96	0,73	0,93	0,1
RMSE*	1,41	2,34	1,97	1,12	1,48	1,15	0,72
\bar{O}*	5,23	5,59	3,4	2,92	3,81	3,01	4,08
BIAS%	4%	16%	54%	32%	19%	30%	2%
RMSE%	26%	41%	59%	38%	39%	38%	17%

*Unidade: m.s⁻¹

Além dos dados observados, o modelo Eta HadCM foi comparado com os dados de reanálise ERA-40, de forma a avaliar a confiabilidade da avaliação das predições do modelo Eta HadCM. Deve-se atentar para o fato de que essas comparações foram feitas entre dois pontos de grade, e não mais entre um ponto de grade e um ponto específico, como o caso das estações. O modelo Eta HadCM possui uma grade de 40x40 km, enquanto os dados de reanálise são correspondentes a uma grade de 125x125 km. Na Tabela 5.11 são apresentados os valores de *R* para essa comparação.

Tabela 5.11 - Coeficiente de determinação de correlação entre o modelo Eta HadCM e as reanálises.

Índice	Chuí	Mostardas	Rio Grande	Porto Alegre	Torres	Santa Maria	Uruguiana
R	0,36	0,63	0,65	0,94	0,48	0,47	0,64

As correlações apresentaram valores baixos entre modelo e reanálises, com exceção de Porto Alegre, com $R= 0,94$. As demais séries apresentaram valores de $R < 0,65$.

As Figuras 5.18 a 5.31 mostram os gráficos com os valores do BIAS, RMSE e médias das reanálises e do modelo Eta HadCM.

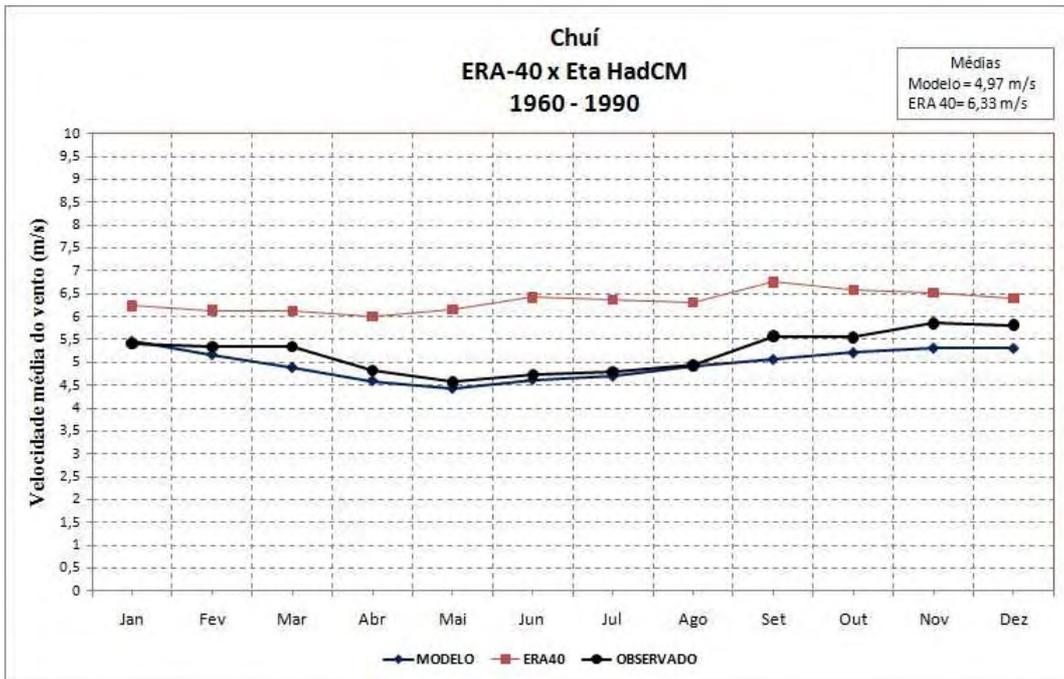


Figura 5.18 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Chuí.

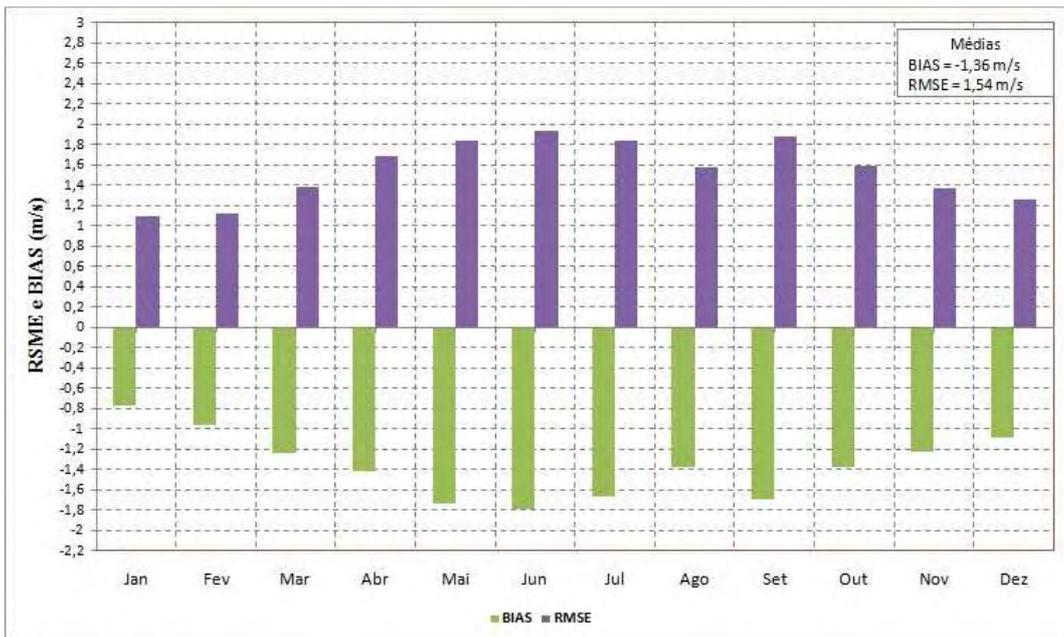


Figura 5.19 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Chuí.

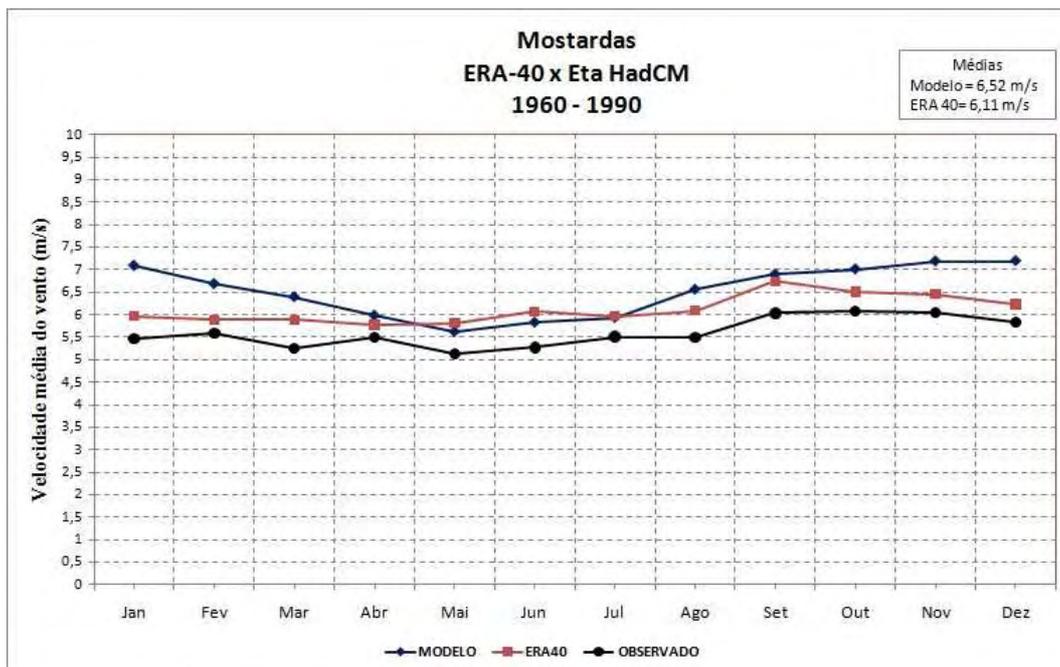


Figura 5.20 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Mostardas.

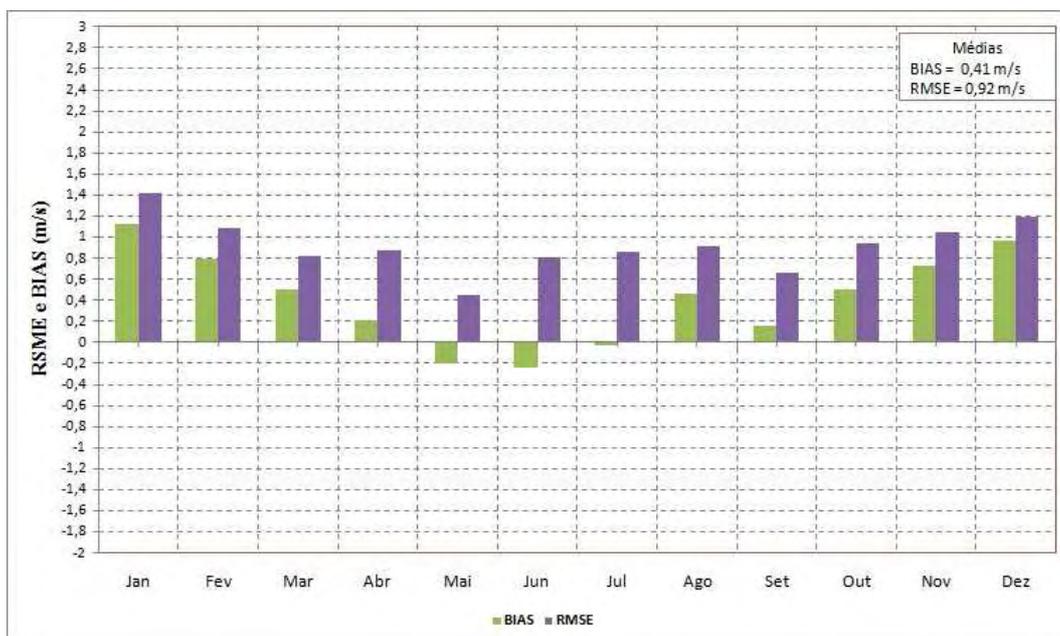


Figura 5.21 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Mostardas.

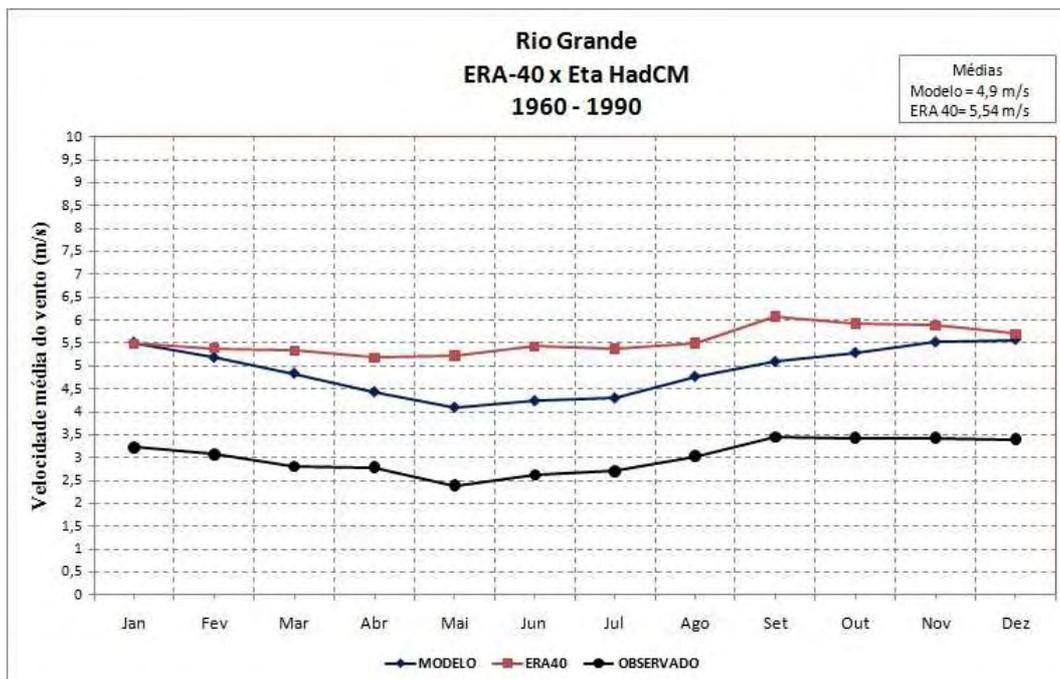


Figura 5.22 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Rio Grande.

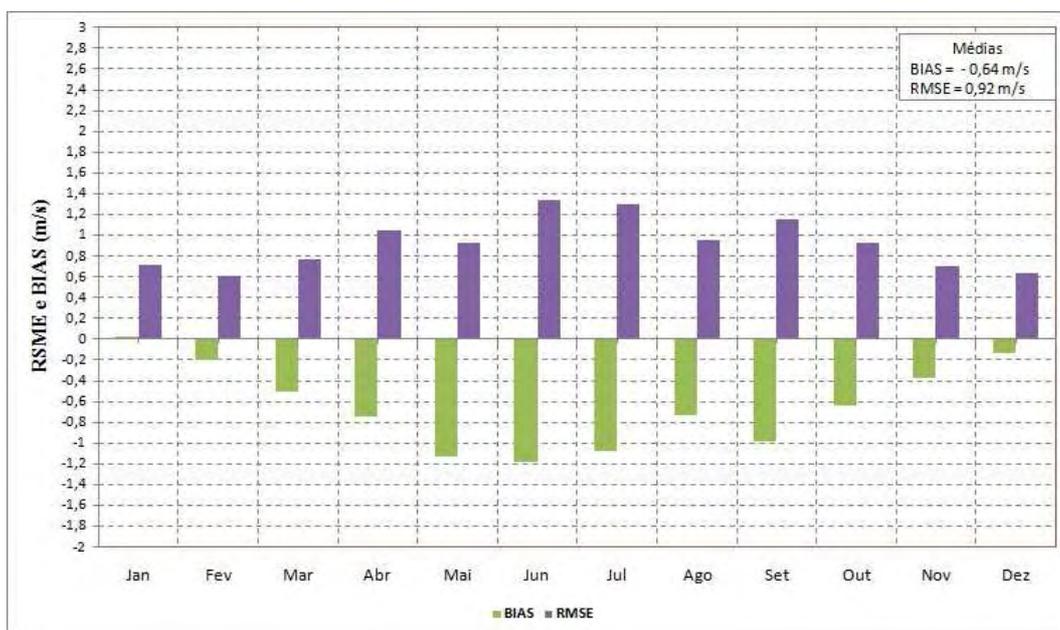


Figura 5.23 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Rio Grande.

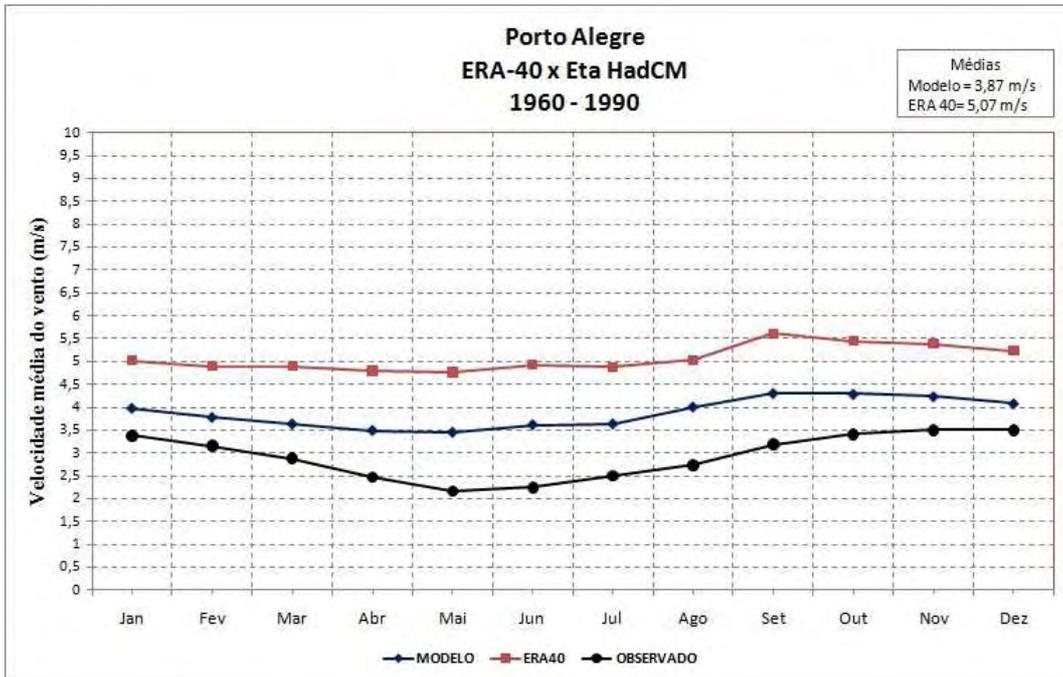


Figura 5.24 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Porto Alegre.

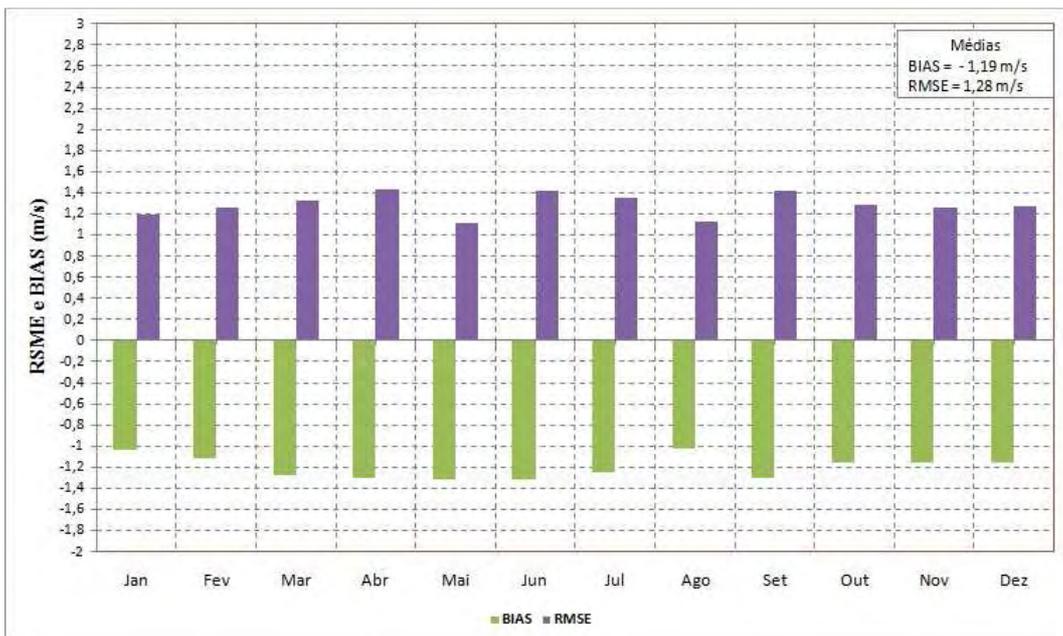


Figura 5.25 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Porto Alegre.

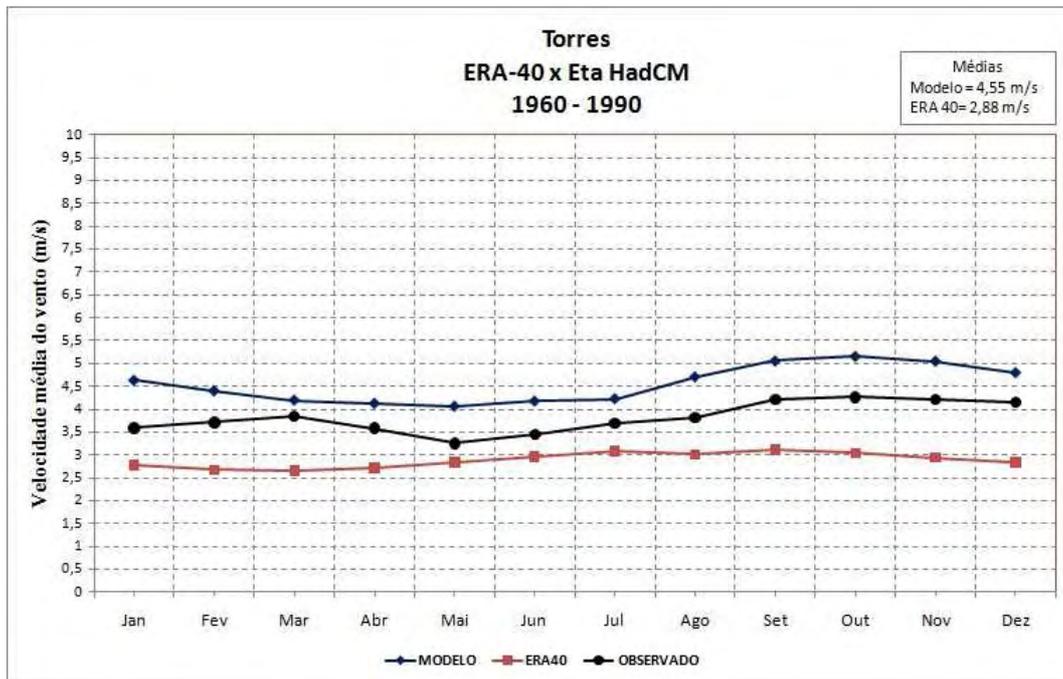


Figura 5.26 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Torres.

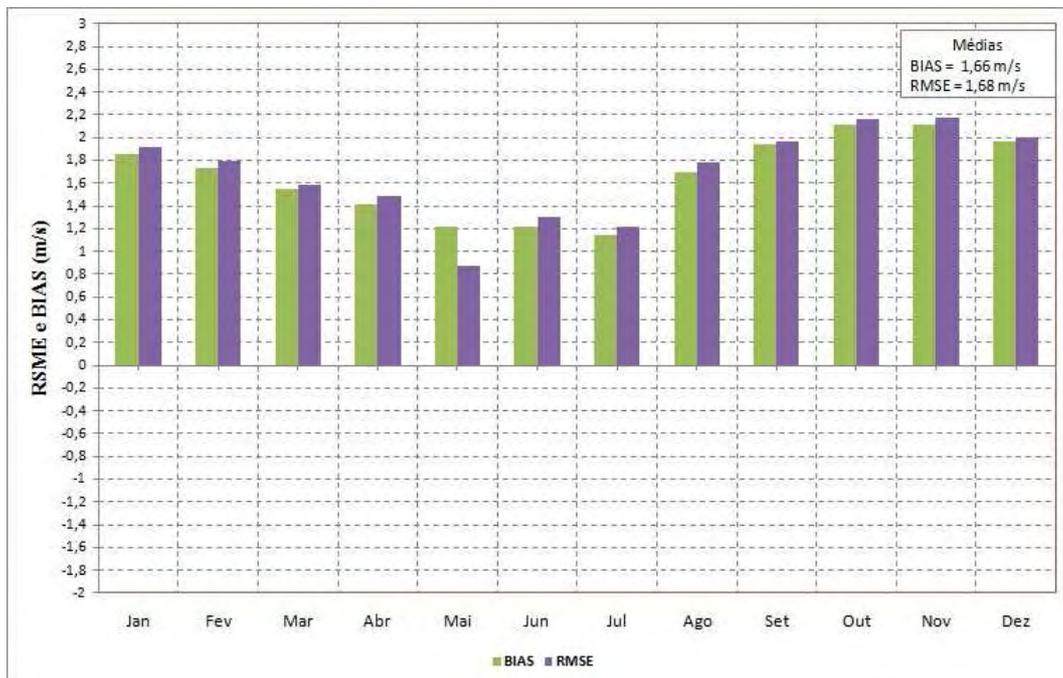


Figura 5.27 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Torres.

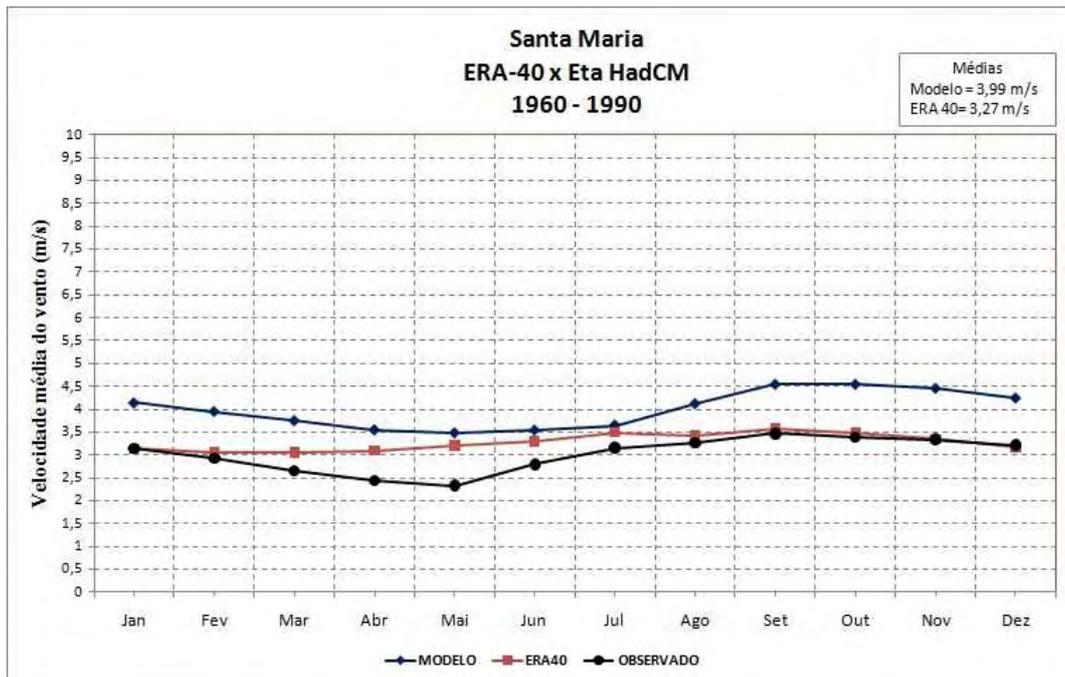


Figura 5.28 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Santa Maria.

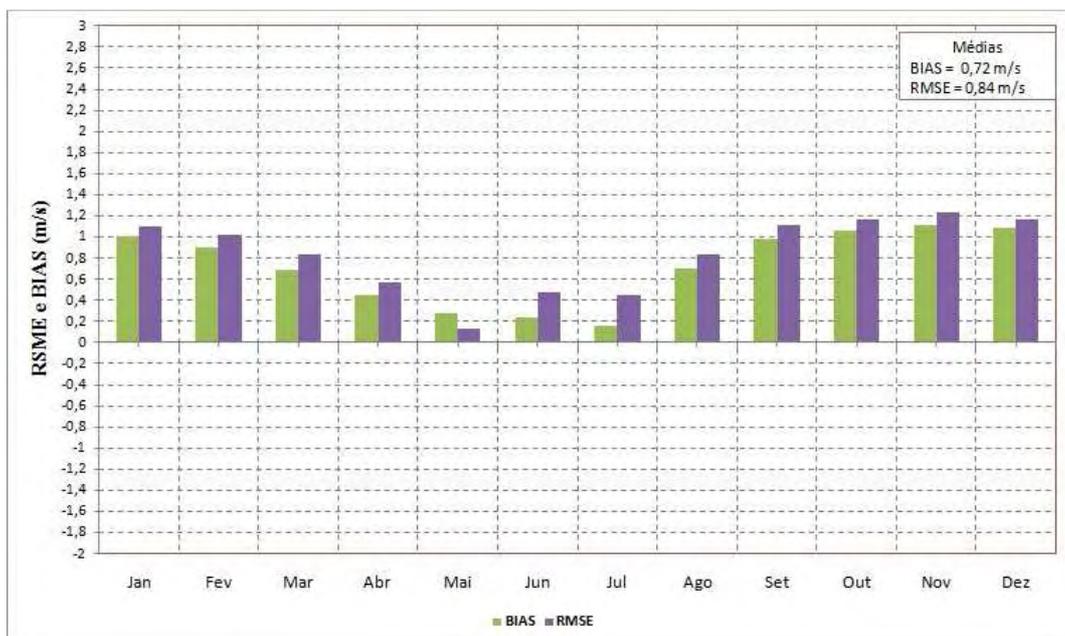


Figura 5.29 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Santa Maria.

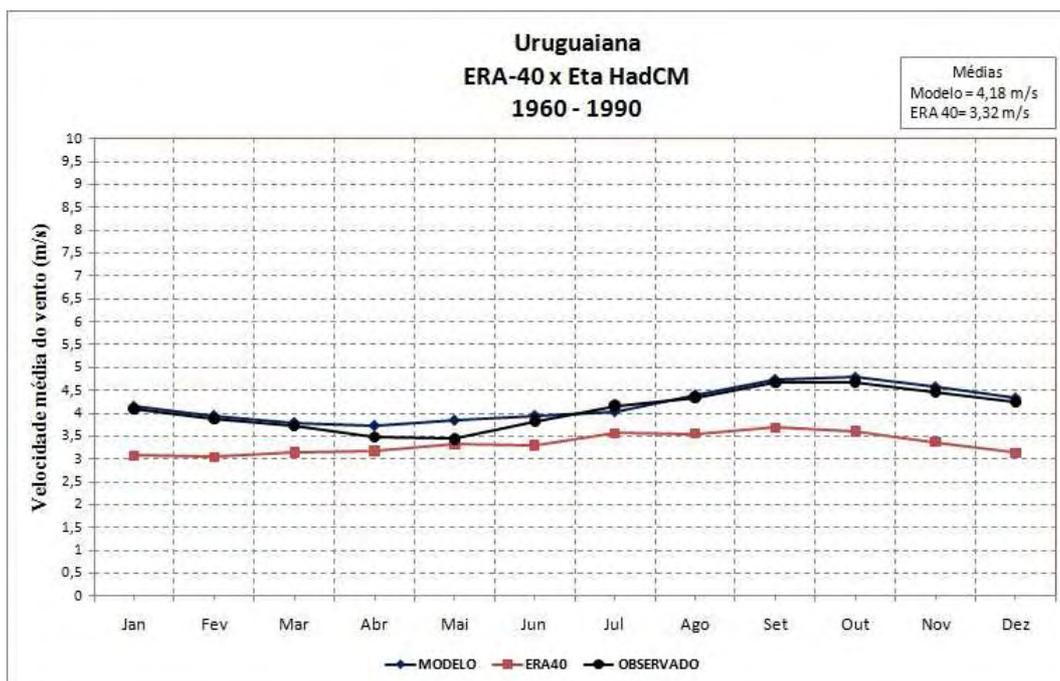


Figura 5.30 – Ciclo anual da velocidade do vento a 10 metros do modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Santa Maria.

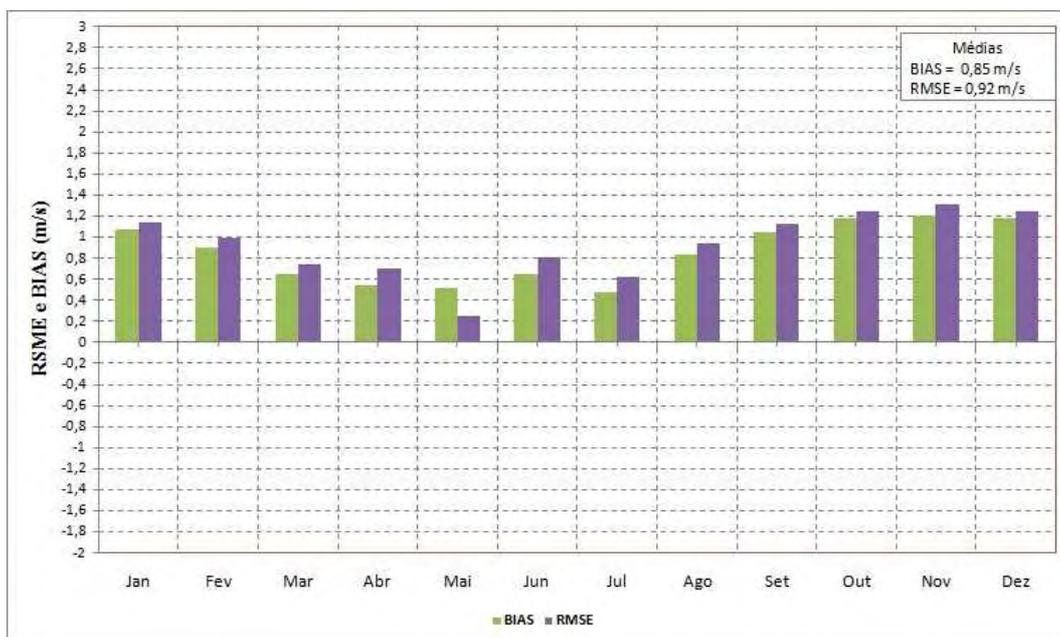


Figura 5.31 – RMSE e BIAS obtidos a partir do ciclo anual da velocidade do vento modelo Eta HadCM e reanálises ERA-40 para o período atual de Uruguaiana.

A Tabela 5.12 apresenta os erros médios percentuais do BIAS e do RMSE obtidos através da razão dos erros médios pelas médias das reanálises ($\overline{ERA-40}$).

Tabela 5.12– Valores dos erros médios relativos obtidos nos gráficos das Figuras 5.18 a 5.31.

Índices	Chuí	Mostardas	Rio Grande	Porto Alegre	Torres	Santa Maria	Uruguaiana
BIAS*	-1,36	0,41	-0,64	-1,19	1,66	0,72	0,85
RMSE*	1,54	0,92	0,92	1,28	1,68	0,84	0,92
ERA-40*	6,33	6,11	5,54	5,07	2,28	3,27	3,32
BIAS%	21%	6%	12%	23%	72%	22%	25%
RMSE%	24%	15%	16%	25%	73%	25%	27%

*Unidade: m.s⁻¹

O BIAS e RMSE apresentaram valores elevados, no caso de Torres acima de 70%, e em outros quatro casos, acima de 20%. Os menores erros ocorreram para Mostardas e Rio Grande.

Em comparação aos resultados obtidos através das observações, as séries de reanálise apresentaram valores de velocidade média do vento superiores para todas as estações variando entre 0,26 m.s⁻¹ a 2,15 m.s⁻¹ acima da média das observações, com exceção de Torres e Uruguaiana que apresentaram valores maiores para as observações. O BIAS% e o RMSE% para Rio Grande, Porto Alegre e Santa Maria também foram menores para as séries de reanálise.

5.4. Análise dos períodos do Modelo Eta HadCM para a Região Sul

Para verificar as variações no campo de vento a 10 metros para cenários futuros apresentadas pelo modelo Eta HadCM na região de estudo, foram analisados três períodos diferentes de trinta anos cada. A primeira série correspondente ao intervalo de 1960 a 1990, o qual será denominado “período atual”, ao longo deste capítulo. Esse período considera os níveis atuais de CO₂ na atmosfera. As predições futuras do modelo levam em conta o aumento nos níveis de CO₂, para o cenário A1B. Essas predições compreendem os intervalos de 2010 a 2040 e 2070 a 2100, os quais serão denominados ao longo desse capítulo como A1B (2010-2040) e A1B (2070-2100), respectivamente.

Na Figura 5.32 (a) e (b), observou-se a velocidade média do vento para o período atual e o período A1B (2010-2040), respectivamente, para a região Sul do Brasil,

com velocidades variando entre 4 m/s a 6 m/s sobre o continente e entre 6 m/s e 8 m/s sobre o oceano e na região costeira. A metade oeste do estado do Rio Grande do Sul apresenta uma variação no campo de vento do modelo Eta HadCM. O cenário A1B mostra um pequeno aumento na velocidade do vento nessa área em relação ao período atual, entre as latitude 27°S e 31°S.

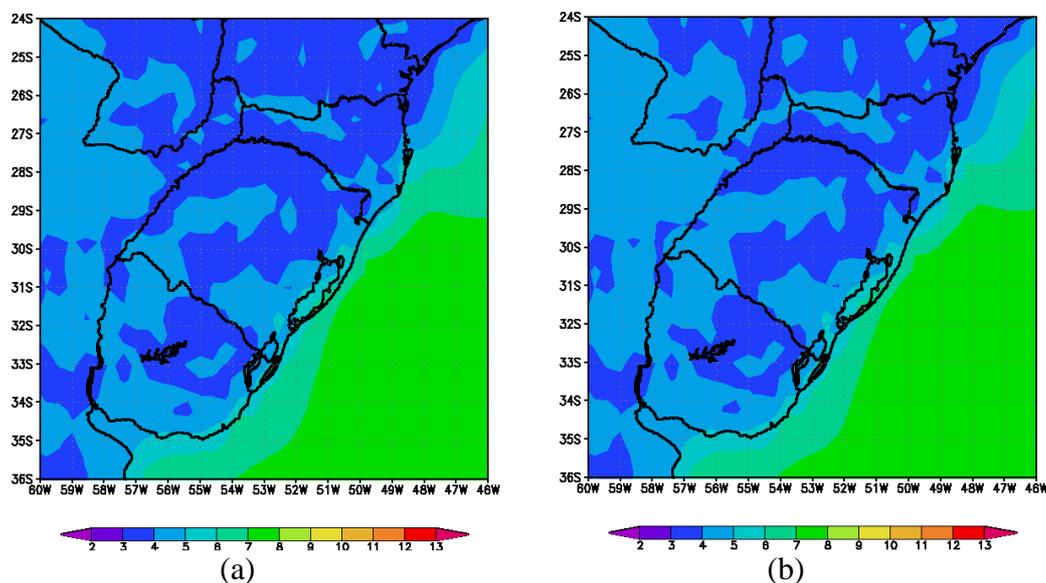


Figura 5.32 – Velocidade média do vento a 10 metros para (a) período atual (1960-1990) e (b) período A1B (2010-2040).

Na Figura 5.33, comparou-se os campos de vento para o período atual e o período A1B (2070-2100). Novamente, pode-se observar que o aumento da velocidade entre as latitudes 27°S e 31°S persiste também para esse período.

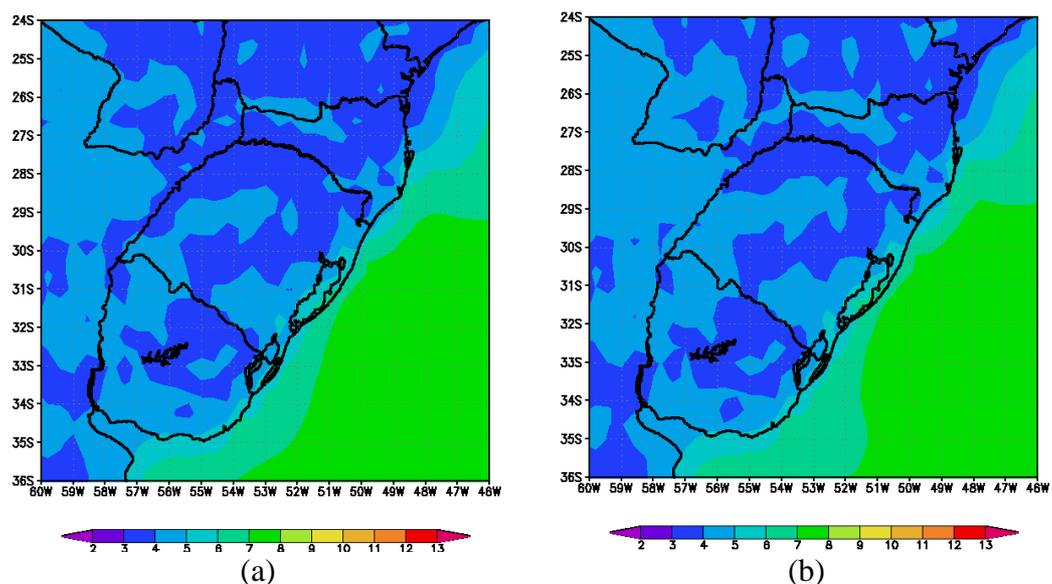


Figura 5.33 – Velocidade média do vento a 10 metros para (a) período atual e (b) período A1B (2070-2100).

Na Figura 5.34, tem-se a diferença da velocidade média do vento em 10 metros entre o período A1B (2010-2040) e o período A1B (2070-2100) em relação ao período atual. Os valores negativos no campo de vento indicam que a velocidade média diminuiu em relação ao período atual, enquanto os valores positivos significam um aumento na velocidade do vento. A Figura 5.34 (a) apresenta um aumento na velocidade média do vento na região norte e oeste do estado do Rio Grande do Sul. Na Figura 5.34 (b), o maior aumento da velocidade média dos ventos também ocorre na parte norte e oeste, entre 27°S e 31°S, e também sobre a região litorânea do estado do Rio Grande do Sul, mais exatamente entre 30°S e 33°S, e com grande intensidade sobre a região de Mostardas, entre a Lagoa dos Patos e Oceano Atlântico. Ainda, entre as latitude 34°S e 36°S, observa-se que o vento diminui sobre o Oceano Atlântico.

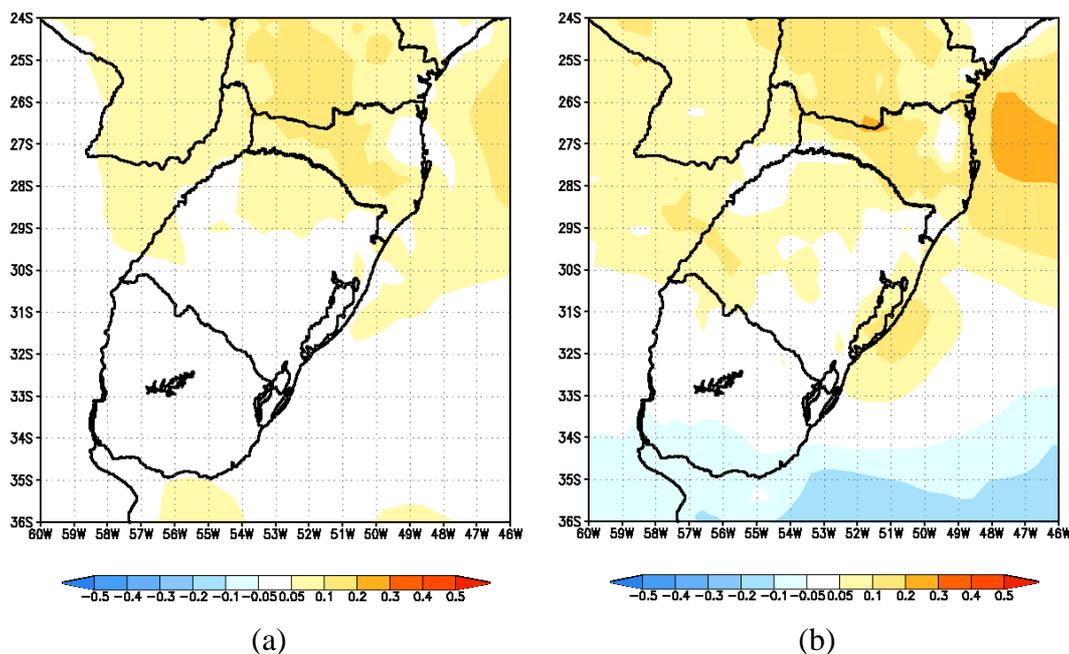


Figura 5.34 – Diferença da velocidade média do vento a 10 metros para o Período A1B (2010-2040) (a) e o Período A1B (2070-2100) (b) em relação ao período atual.

Na Figura 5.35 pode-se verificar a variação da densidade de potência do vento para a região Sul, a partir do período atual, A1B (2010-2040) e A1B (2070-2100). O campo de densidade de potência média foi gerado aplicando a Equação 2.13, a qual determina a potência do vento que é medida em W/m^2 , à saída de vento a 10 metros considerando a densidade do ar como sendo $1,1 \text{ kg}/m^3$.

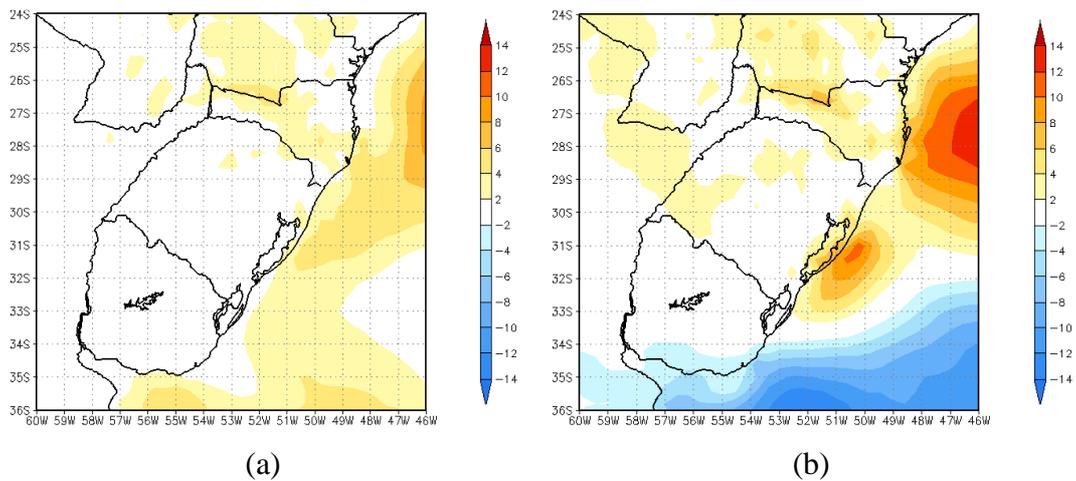


Figura 5.35– Variação da densidade média de potência entre as previsões do modelo Eta HadCM e o período atual, em W/m^2 considerando uma densidade do ar como sendo $1,10 \text{ kg}/m^3$. (a) Densidade de Potência A1B (2010-2040) menos Referência; (b) Densidade de Potência A1B (2070-2100) menos Referência.

A Figura 5.36 mostra a variação da densidade de potência eólica em porcentagem. Os prognósticos do modelo indicam um crescimento do potencial eólico em toda a região Sul, com exceção para a parte central do estado do Rio Grande do Sul, onde o modelo aponta uma não variação ou até mesmo uma possível tendência de decréscimo desse potencial com relação ao período atual.

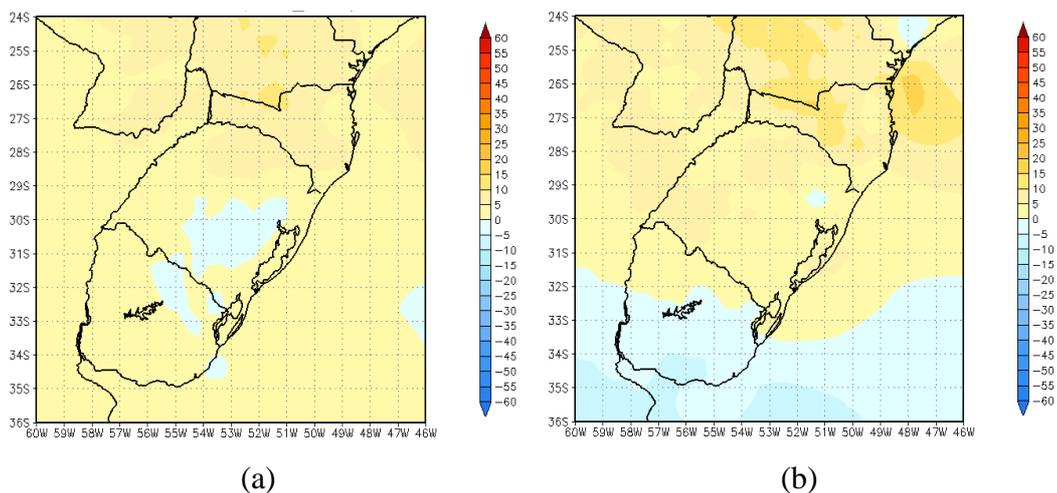


Figura 5.36 – Variação da densidade de potência média entre as previsões do Eta HadCM e o período atual, em porcentagem. (a) Variação da Densidade de Potência (%) A1B (2010-2040) menos Referência; (b) Variação da Densidade de Potência (%) A1B (2070-2100) menos Referência.

Na análise sazonal (Figura 5.37 (a) a 5.37 (d)), comparou-se a diferença na densidade média de potência do vento a 10 metros de cada um dos períodos do cenário A1B em relação ao período atual. A densidade de potência média sazonal do vento a 10 metros, no verão, de dezembro a fevereiro (DJF) apresentou uma tendência de atenuação entre 1 a 4 W.m^{-2} no centro do estado, enquanto no litoral, principalmente sobre a Lagoa dos Patos essa redução chegou a 6 W.m^{-2} para o período A1B (2010-2040). No período A1B (2070-2100), a atenuação da densidade média de potência foi mais significativa, pois abrangeu uma área maior, sobre todo o litoral e grande parte do centro estado do Rio Grande do Sul, parte do Uruguai e sobre o oceano.

A Figura 5.37 (c) mostra que o período de março a maio (MAM) do Cenário A1B, apesar de não muito significativa, houve um aumento na densidade média de potência do vento em até 2 W.m^{-2} no litoral e parte da região norte, e atenuação de 1 W.m^{-2} no centro do estado. No período de A1B (2070-2100) ocorreu um aumento mais significativo na densidade média de potência na região oeste do estado, todo o litoral, adentrando sobre a Lagoa dos Patos com aumento de até 10 W.m^{-2} .

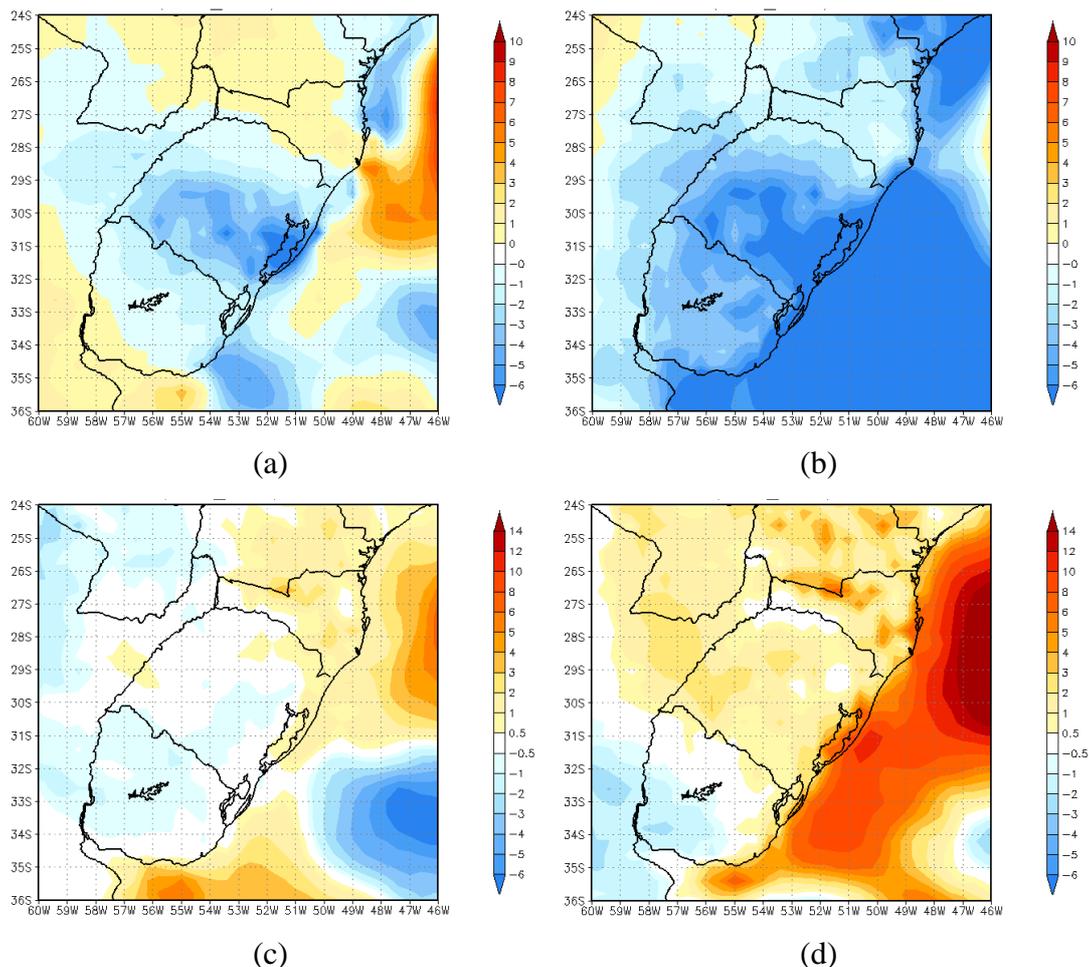


Figura 5.37 – Variação sazonal da densidade média de potência ao nível de 10 metros para os períodos do Cenário A1B em relação ao período atual; (a) DJF, A1B (2010-2040) menos Referência; (b) DJF, A1B (2070-2100) menos Referência; (c) MAM, A1B (2010-2040) menos Referência; (d) MAM, A1B (2070-2100) menos Referência.

Nos meses de junho a agosto (JJA), e de setembro a novembro (SON), respectivamente (Figura 5.38), o modelo apresenta as maiores tendências de aumento na densidade média de potência do vento para toda região Sul. Nos meses de junho a agosto do A1B (2010-2040) observa-se um aumento de até 6 W.m^{-2} no litoral centro e norte do estado. Já para A1B (2070-2100) esse aumento alcança a região central e oeste do estado, e todo o litoral, aumentando em até 14 W.m^{-2} em relação ao período atual.

O período de SON de A1B (2070-2100) apresentou aumento de 14 W.m^{-2} , e maior aumento em extensão, abrangendo toda a região de estudo. Pode-se observar que as regiões com o maior aumento na densidade média de potência do vento em são

norte, oeste e litoral do estado do Rio Grande do Sul. Ainda, em SON ocorre uma faixa de redução da velocidade do vento entre as latitudes 33°S e 36°S.

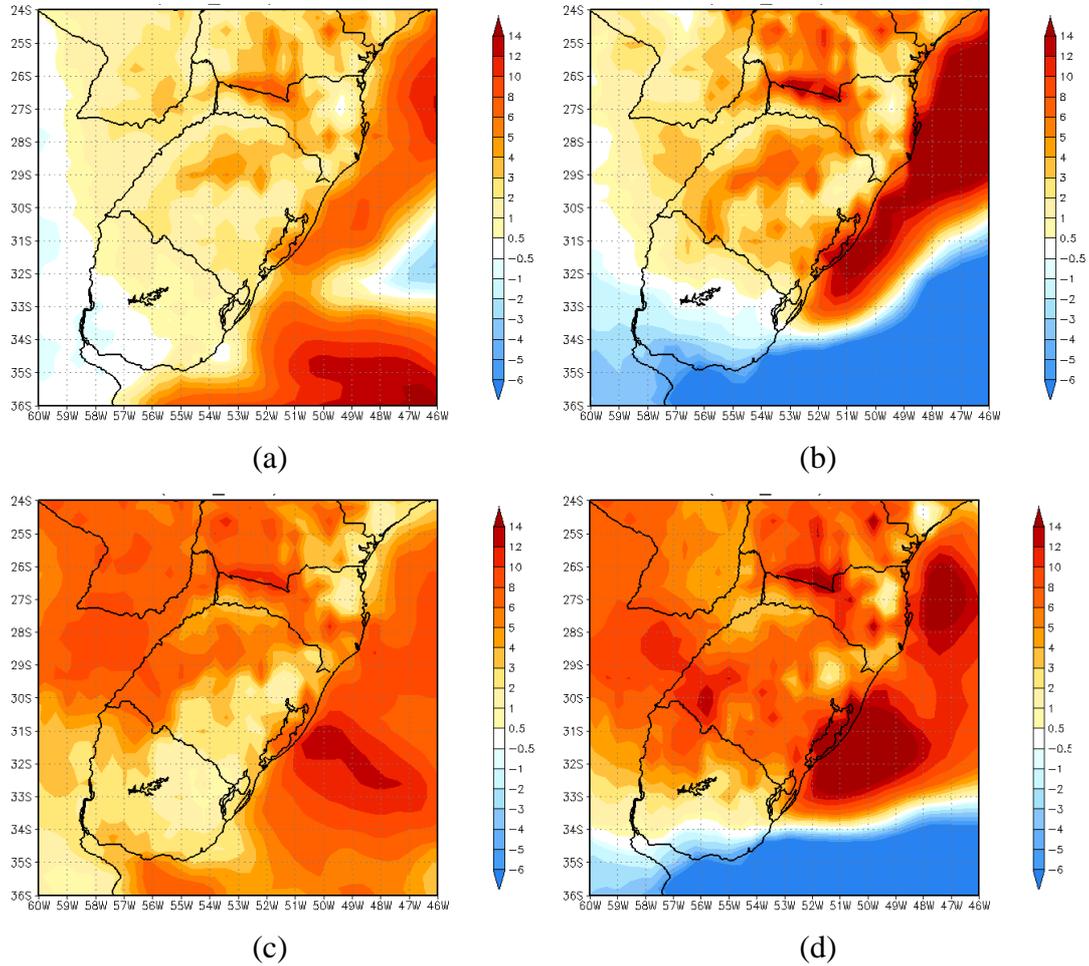


Figura 5.38 – Variação sazonal da densidade média de potência do vento ao nível de 10 metros para os dois períodos do Cenário A1B em relação ao período atual. (a) JJA, A1B (2010-2040) menos Referência; (b) JJA, A1B (2070-2100) menos Referência; (c) SON, A1B (2010-2040) menos Referência; (d) SON, A1B (2070-2100) menos Referência.

As Figuras 5.39 e 5.40 representam a variação percentual da densidade de potência média do vento. O período A1B (2010-2040) (Figura 5.39 (a)) revela uma redução entre 10 a 20% na densidade de potência no centro do estado, enquanto no A1B (2070-2100) (Figura 5.39 (b)) a redução predita é de 10 a 20% em todo o território do estado do Rio Grande do Sul incluindo litoral, com uma pequena área no centro do estado em que essa variação pode chegar a 40%.

Nos meses de março a maio do A1B (2010-2040) (Figura 5.39 (c)) observa-se um aumento de aproximadamente 10% ao longo do litoral, norte e oeste do estado. No A1B (2070-2100) (Figura 5.39 (d)), o aumento na densidade de potência é de aproximadamente 10% sobre toda a região de estudo e na parte oeste ocorre um ganho de até 20% na densidade de potência.

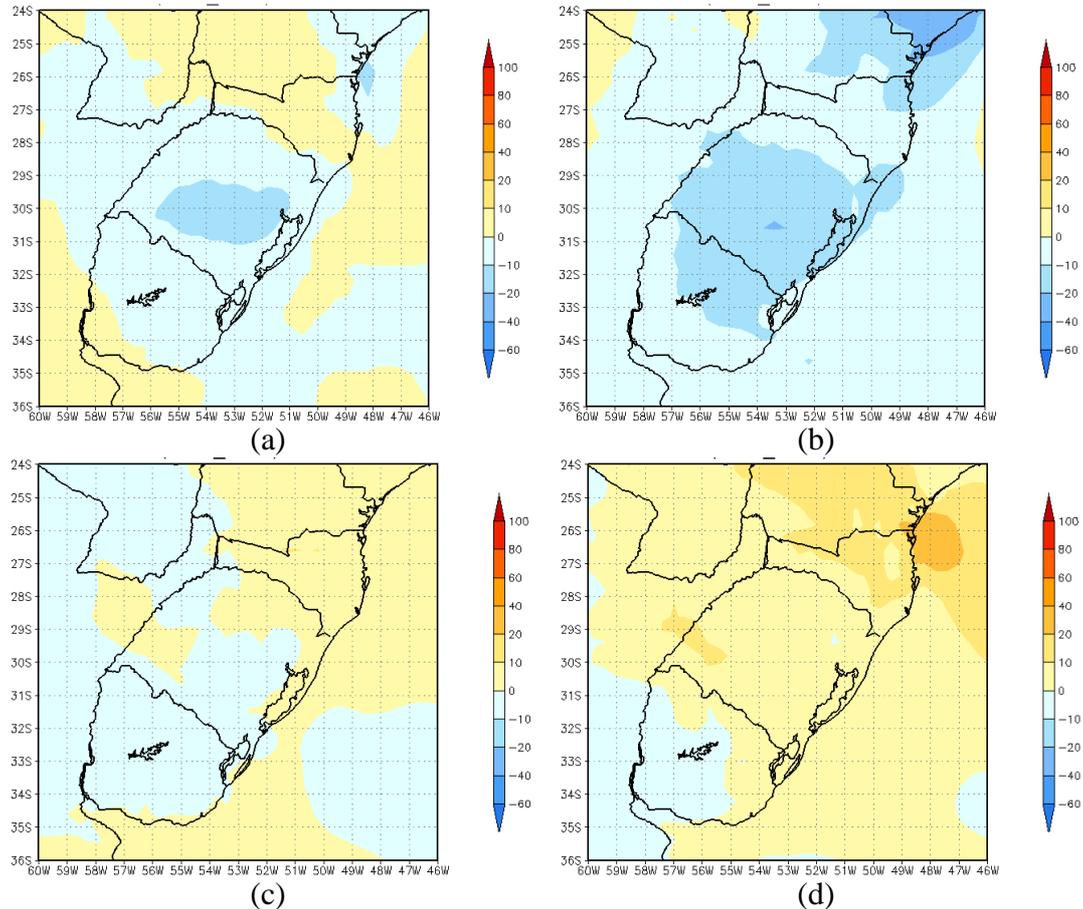


Figura 5.39 – Variação sazonal em porcentagem de densidade de potência do vento ao nível de 10 metros para os dois períodos do Cenário A1B em relação ao período atual. (a) DJF, A1B (2010-2040) menos Referência; (b) DJF, A1B (2070-2100) menos Referência; (c) MAM, A1B (2010-2040) menos Referência; (d) MAM, A1B (2070-2100) menos Referência.

Nos meses de junho a agosto do A1B (2010-2040) (Figura 5.40 (a)) o modelo apresenta um aumento de até 10% em todo o estado do Rio Grande do Sul, sobre o litoral e oceano, com uma pequena área na região norte onde o aumento pode chegar a 20%. No período A1B (2070-2100) (Figura 5.40 (b)) ocorre um aumento de até 20% principalmente no centro e litoral do estado.

Nos meses de setembro a novembro, o modelo revela um crescimento de até 20% em praticamente metade da área de estudo, principalmente na região oeste e norte do enquanto o restante do estado o aumento é de aproximadamente 10% (Figura 5.40 (c)). O período A1B (2070-2100) (Figura 5.40 (d)) apresenta um aumento de 20% em todo o território de estudo, podendo chegar a 40% na região oeste.

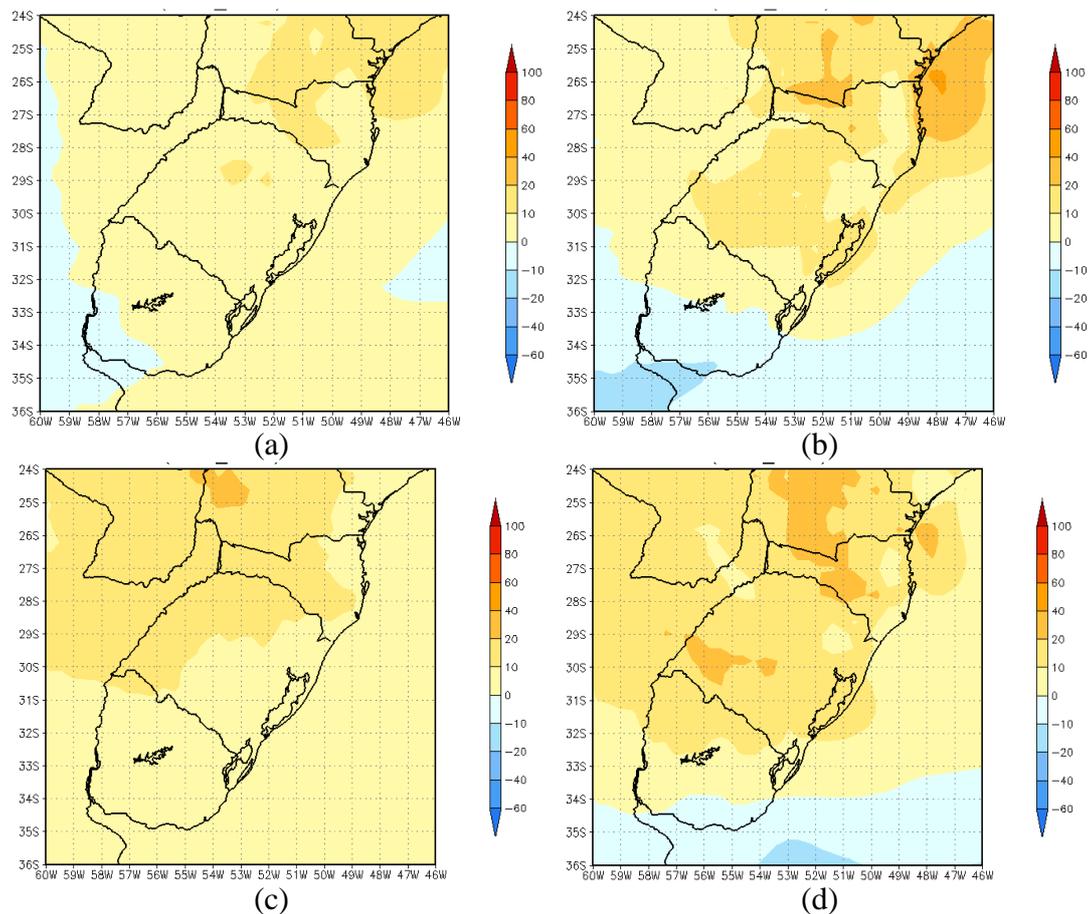


Figura 5.40 – Variação sazonal em porcentagem da densidade de potência do vento ao nível de 10 metros para os dois períodos do Cenário A1B em relação ao período atual, para inverno e primavera. (a) JJA, A1B (2010-2040) menos Referência; (b) JJA, A1B (2070-2100) menos Referência; (c) SON, A1B (2010-2040) menos Referência; (d) SON, A1B (2070-2100) menos Referência.

5.5. Análise das séries com uso do WAsP

Os dados apresentados nos capítulos anteriores se referem à altura de 10 metros padronizada pela OMM. No entanto os levantamentos dos recursos eólicos são normalmente descritos à altura das turbinas. Para avaliar os cenários de potencial eólico à altura-padrão do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (Amarante et al., 2001) foi utilizado o pacote computacional WAsP aos dados de vento ao nível de 10 metros observados, reanálises e também aos dados da saída do modelo Eta HadCM. O objetivo foi o de obter a distribuição estatística dos ventos e o potencial eólico a altura-padrão de 50 metros, tanto para as observações, para o período atual e para os períodos do cenário A1B gerados pelo Eta HadCM.

Com o emprego do WAsP, foi possível inserir os parâmetros de superfície discutidos anteriormente no Capítulo 6, tais como topografia e comprimento de rugosidade da superfície.

Inicialmente, inseriu-se no modelo WAsP as séries qualificadas de dados observados, reanálises e gerados pelo Eta HadCM,. A partir dessas séries, obteve-se os valores médios da distribuição da direção do vento e a distribuição de Weibull, com os parâmetros de escala (A), de forma (k), velocidade média (U) e potência (P), para uma área de 40x40 km. Também verificou-se que a velocidade predominante (V) a 50 metros, determinada pelo WAsP para cada série de dados, e a frequência em porcentagem ($f\%$) com que essa respectiva velocidade ocorre para cada estação. O WAsP também fornece a variação entre o ponto mais baixo e mais alto da topografia do local em relação ao nível do mar.

Para o caso das estações de Porto Alegre, Santa Maria e Uruguaiana, esses valores não foram calculados devido ao fato dos dados fornecidos serem médias climatológicas, o que torna questionável a sua inserção no WAsP, pois a resolução temporal desses dados é baixa para determinar os parâmetros de escala e forma.

No entanto, com base nessas médias, foram gerados os parâmetros que podem ser vistos no Apêndice C, assim como os demais gráficos de distribuição de Weibull em 50 metros.

5.5.1. Chuí

As observações mostram duas direções predominantes para a estação de Chuí, de Leste (E), enquanto o modelo apresenta uma direção predominante de Nordeste (NE), tanto para o período atual como para os cenários futuros. As reanálises também apresentam direção predominante de NE. A velocidade média, assim como os parâmetros de Weibull e densidade de potência em 50 metros para as observações de cada série de dados é apresentada na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Valores médios para os parâmetros de distribuição do vento, velocidade média e potência para a estação de Chuí, para uma área de 40x40 km.

Parâmetros	Observado	ERA-40	Período atual	A1B (2010_2040)	A1B (2070_2100)
A^*	7,8	9,3	7,2	7,2	7,1
k	2,02	2,81	2,64	2,6	2,61
U^*	6,94	8,3	6,36	6,36	6,27
$P_{méd}^{**}$	389	517	242	244	234
$P_{máx}^{**}$	671	899	426	427	406
$P_{mín}^{**}$	242	309	146	147	139
V^*	6,38	8,69	6,56	6,56	6,38
$f(\%)$	10,5	10,7	13,5	13,4	13,8

*m/s **W/m²

O arquivo de topografia a partir do qual o relevo é parametrizado indica uma variação no terreno entre 1 metro e 180, 4 metros, ou seja, o ponto mais baixo e mais alto do relevo, respectivamente.

O valor de potência eólica obtido para as observações foi maior do que as potências dos prognósticos do modelo como eram previstas. Os dados de reanálise ERA-40 apresentaram valores de potência e velocidade média do vento bem acima das demais séries de dados observados e prognosticados.

5.5.2. Mostardas

As observações da estação de superfície de Mostardas apresentam uma direção predominante de NE, assim como as séries do modelo Eta HadCM e os dados de reanálise. Os valores da densidade de potência tendem a aumentar gradualmente em relação às observações.

Os fatores de forma e escala, aumentam para as séries do modelo em relação às observações. O maior fator de forma das séries de dados de Mostardas é o da reanálise.

A topografia na região de Mostardas apresenta o ponto mais baixo da superfície em 1 metro e o ponto mais elevado em 40 metros.

Tabela 5.14 – Valores médios dos parâmetros de distribuição do vento, velocidade média e potência para a estação de Mostardas, para uma área de 40x40 km.

Parâmetros	Observado	ERA-40	Período atual	A1B (2010_2040)	A1B (2070_2100)
A^*	9,6	9,8	10,3	10,4	10,5
k	2,0	2,88	2,69	2,67	2,67
U^*	8,54	8,73	9,2	9,27	9,36
$P_{méd}^{**}$	738	595	726	747	769
$P_{máx}^{**}$	978	796	963	996	1018
$P_{mín}^{**}$	505	399	480	499	507
V^*	7,8	9,4	9,75	9,74	9,75
$f(\%)$	8,0	10,2	9,4	9,2	9,2

*m/s **W/m²

5. 5.3. Rio Grande

As observações da estação de Rio Grande apresentam uma direção predominante de NE. Os dados do modelo e de reanálise também mostram a mesma direção predominante de NE. A densidade de potência do vento obtido a partir das séries do modelo é maior que as observações, e aumenta gradativamente em relação a sua própria série atual, sendo que o período de 2070 a 2100 apresenta a maior densidade de potência para a região de Rio Grande. As reanálises resultaram nos

valores mais altos de velocidade média, dos fatores de escala e de forma e densidade de potência.

Os parâmetros de escala e forma são maiores para os dados de reanálise. Os valores dos parâmetros aumentam para os períodos futuros do modelo Eta HadCM em relação as observações. A velocidade média apresenta um aumento de aproximadamente 1 m.s^{-1} para os períodos futuros.

Tabela 5.15 – Valores médios dos parâmetros de distribuição do vento, velocidade média e potência para a estação de Rio Grande, para uma grade de $40 \times 40 \text{ km}$.

Parâmetros	Observado	ERA-40	Período atual	A1B (2010_2040)	A1B (2070_2100)
A^*	6,0	8,1	7,2	7,2	7,2
k	1,73	2,75	2,57	2,57	2,61
U^*	5,38	7,22	6,35	6,32	6,4
$P_{\text{méd}}^{**}$	215	344	245	245	248
$P_{\text{máx}}^{**}$	275	463	325	326	333
$P_{\text{mín}}^{**}$	130	232	161	160	163
V^*	3,19	7,8	6,56	6,74	6,74
$f(\%)$	17,8	13,1	13,4	13,3	13,3

*m **W/m²

O BIAS entre as observações e o modelo apresentou um valor grande, e uma diferença significativa entre a velocidade média das observações e do modelo, as quais foram de $3,4 \text{ m.s}^{-1}$ e $4,88 \text{ m.s}^{-1}$. No entanto essa estação possui área urbana em sua volta o que reduz a velocidade do vento devido ao efeito dos prédios. Com o WASP foi possível inserir o valor do comprimento de rugosidade que nesse caso, para regiões urbanas, é igual a 1 metro. A variação na topografia de Rio Grande apresenta o ponto mais baixo em 1 metro e o mais elevado em 25 metros de altitude.

5.5.4. Porto Alegre

A direção predominante dos dados de reanálise para a região de Porto Alegre é de NE, enquanto a direção predominante das séries do modelo Eta HadCM para a região são de E.

A densidade de potência obtida a partir dos dados do modelo apresentou valor inferior à densidade de potência obtida a partir dos dados de reanálise. Ainda, os dados do Eta HadCM apresentaram um aumento no valor de densidade de potência entre o período atual e o período A1B (2070-2100). A variação na altitude da topografia da região varia entre 1 metro a 300 metros.

Tabela 5.16 – Valores médios dos parâmetros de distribuição do vento, velocidade média e potência para a estação de Porto Alegre, para uma grade de 40x40 km.

Parâmetros	ERA-40	Período atual	A1B (2010_2040)	A1B (2070_2100)
<i>A</i> *	9,8	7,3	7,3	7,4
<i>k</i>	2,58	2,39	2,37	2,37
<i>U</i> *	8,67	6,48	6,5	6,58
<i>P_{méd}</i> **	646	287	291	303
<i>P_{máx}</i> **	3899	1761	1715	1798
<i>P_{mín}</i> **	224	103	103	108
<i>V</i> *	10,46	7,45	7,8	7,62
<i>f</i> (%)	8,8	11,4	11,1	11,0

*m/s **W/m²

5.5.5. Torres

A estação de Torres apresentou uma direção predominante de NE. Os dados do modelo Eta HadCM também apresentaram direção predominante de NE. Os dados ERA-40 apresentaram direções predominantes de E. A densidade de potência dos dados observados e dados de reanálise apresentaram valores bastante próximos, no entanto inferiores aos valores de densidade de potência do modelo Eta HadCM.

Os parâmetros de escala e de forma apresentam um aumento para os períodos futuros em relação às observações e reanálises. Os valores de densidade de potência do modelo climático apresentaram um aumento entre o período atual e os períodos do cenário futuro. A variação na altitude da topografia é de 1 metro a 235 metros.

Tabela 5.17 – Valores médios dos parâmetros de distribuição do vento, velocidade média e potência para a estação de Torres, para uma grade de 40x40 km.

Parâmetros	Observado	ERA-40	Período atual	A1B (2010_2040)	A1B (2070_2100)
<i>A</i> *	4,6	4,7	6,5	6,6	6,6

<i>k</i>	1,7	1,92	2,58	2,57	2,6
<i>U*</i>	4,1	4,16	5,78	5,83	5,84
<i>P_{méd}**</i>	99	90	187	192	191
<i>P_{máx}**</i>	525	598	989	1003	1001
<i>P_{mín}**</i>	54	28	100	104	103
<i>V*</i>	3,02	3,55	6,03	6,03	6,21
<i>f(%)</i>	16,1	19,4	15,6	15,1	15,2

*m/s **W/m²

5.5.6. Santa Maria

A direção predominante da região da Santa Maria para os dados de reanálise é de SE. Os dados do modelo Eta HadCM apresentam direção predominante de E. A densidade de potência do modelo aumenta em relação às reanálises e apresentam valores maiores para os períodos futuros do modelo.

Os parâmetros de escala e forma das series do modelo aumentam em relação aos dados de reanálise. A variação da topografia na região se Santa Maria é de 44 metros a 544 metros.

Tabela 5.18 – Valores médios dos parâmetros de distribuição do vento, velocidade média e potência para a estação de Santa Maria, para uma grade de 40x40 km.

Parâmetros	ERA-40	Período atual	A1B (2010_2040)	A1B (2070_2100)
<i>A *</i>	7,5	8,7	8,6	8,8
<i>k</i>	2,03	2,22	2,17	2,18
<i>U*</i>	6,69	7,68	7,67	7,84
<i>P_{méd}**</i>	421	564	574	610
<i>P_{máx}**</i>	6551	5206	5319	5659
<i>P_{mín}**</i>	15	21	21	22
<i>V*</i>	7,09	8,69	8,51	8,87
<i>f(%)</i>	10,1	9,4	9,2	9,0

*m/s **W/m²

5.5.7. Uruguaiana

Uruguaiana apresenta uma direção predominante de E para os dados de reanálise e para os dados do modelo Eta HadCM. A densidade de potência apresenta um aumento para os dados do modelo em relação às reanálises e também em relação ao período atual do próprio modelo EtaHadCM. Os valores do parâmetro de escala aumentam para as séries do modelo, no entanto os valores do fator de forma são

próximos, variando entre 2,41 a 2,48. A topografia da região apresenta uma elevação mínima de 40 metros e máxima de 179 metros.

Tabela 5.19 – Valores médios dos parâmetros de distribuição do vento, velocidade média e potência para a estação de Uruguaiana, para uma grade de 40x40 km.

Parâmetros	ERA-40	Período atual	A1B (2010_2040)	A1B (2070_2100)
A^*	4,7	5,9	6,0	6,1
k	2,47	2,48	2,41	2,46
U^*	4,15	5,23	5,29	5,37
$P_{méd}^{**}$	70	140	147	152
$P_{máx}^{**}$	111	218	230	238
$P_{mín}^{**}$	48	94	98	101
V^*	5,14	6,38	6,38	6,56
$f(\%)$	17,5	15,6	13,5	13,3

*m/s **W/m²

Na Tabela 5.20 pode-se observar a velocidade média anual e direção predominante do vento a 50 metros para cada uma das regiões estudadas. Chuí, Mostardas, Rio Grande e Torres são estações costeiras, e todas apresentam direção predominante de NE. Santa Maria e Uruguaiana apresentam direção predominante de E e Porto Alegre de SE.

Tabela 5.20 – Intervalo de velocidade média anual e direção do vento a 50 metros predominante das regiões de estudo, obtido a partir do Atlas Eólico Brasileiro e do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul.

	Chuí	Mostardas	Rio Grande	Porto Alegre	Torres	Santa Maria	Uruguaiana
Velocidade (m.s ⁻¹)	6,5-8,0	6,0-8,0	6,5-7,5	4,5-6,5	4,5-6,0	4,0-5,5	5,5-6,5
Direção Predominante	E-NE	E-NE	E-NE	SE	NE	E	E

Chuí e Torres revelaram valores de velocidade média do vento dentro da faixa determinada pelo atlas.

As observações de Chuí apresentaram a direção predominante E, diferente do atlas, enquanto as reanálises e o modelo resultaram em direção predominante de NE. Torres apresentou direção predominante de NE para observações e modelo,

enquanto a reanálise mostrou valores não condizentes com o atlas e os demais dados.

A estação de Mostardas revelou valores de velocidade do vento acima da velocidade do atlas para todas as séries de dados. A direção predominante para todas as séries foi de NE.

A velocidade média do vento para Rio Grande teve valor abaixo dos valores do atlas. No entanto as direções predominantes de NE foram coerentes com o atlas de direção do vento.

Os demais locais não tiveram resultados de séries observadas. As análises feitas para Porto Alegre, Santa Maria e Uruguaiana são apenas para séries de reanálises e modelo Eta HadCM. Para Porto Alegre, a velocidade média do vento resultou em valores superiores ao atlas, e a direção do vento para as reanálises diferiu do modelo e do atlas, os quais apresentaram valores compatíveis. Na região de Santa Maria apresentou valores de velocidade média do vento acima dos valores do atlas. As direções obtidas a partir das séries do modelo foram compatíveis, enquanto a reanálise não apresentou uma direção bem definida. Já em Uruguaiana, a velocidade média do vento teve valores ligeiramente abaixo do atlas. As direções predominantes para as reanálises e modelo foram de E e SE, de acordo com as direções do atlas eólico.

Em termos de densidade de potência média, Chuí teve um valor de 389 W.m^{-2} , superior aos valores obtidos através das séries do modelo Eta HadCM, que apresentaram valores entre 234 W.m^{-2} e 244 W.m^{-2} . Mostardas apresentou uma densidade de potência média de 738 W.m^{-2} , dentro da faixa de 726 W.m^{-2} e 769 W.m^{-2} , enquanto a densidade de potência das observações de Rio Grande foi de aproximadamente 13% inferior que o modelo, com valores entre 245 W.m^{-2} e 248 W.m^{-2} .

De forma contrária, Torres apresentou valores de densidade de potência das observações até 50% menores do que o modelo. O valor para as observações foi de 99 W.m^{-2} enquanto o modelo variou entre 187 W.m^{-2} e 192 W.m^{-2} .

A densidade de potência das séries do modelo para Porto Alegre revelou valores entre 287 W.m^{-2} e 303 W.m^{-2} . Para Santa Maria os valores de densidade de potência foram de 564 W.m^{-2} a 610 W.m^{-2} enquanto Uruguaiana teve valores entre 140 W.m^{-2} a 152 W.m^{-2}

Verificou-se também que a velocidade média fornecida pelo WASP apresentou valores superiores aos valores médios das séries das estações e os do modelo Eta HadCM.

Apesar dos valores de velocidade média do vento das séries serem superiores às observações na maioria dos casos e de revelarem valores de BIAS% e RMSE% menores, o que indica uma melhor aproximação dos dados do modelo Eta HadCM, os valores de densidade de potência não foram satisfatórios. Em todos os casos em que foram considerados os dados observacionais para determinar a densidade de potência, os valores foram mais aproximados comparados ao modelo Eta HadCM.

5.6. Discussões

A validação dos dados observados resultou em um número significativo de dados excluídos das séries, mostrando que as séries históricas de velocidade e direção do vento possuem valores incoerentes, de acordo com o critério de validação seguido. O caso mais crítico foi o de Mostardas, em que 17,3% dos dados foram excluídos.

Após a validação, a análise proposta para estudo das tendências existentes nas séries de velocidade do vento a 10 metros foi o Teste de Kendall. Este foi aplicado às series observadas, às séries do período atual do modelo Eta HadCM e às reanálises para o período de 1960 a 1990. Cinco estações observadas apresentaram tendência significativa a um nível de confiança de 95%. As estações de Chuí e Santa Maria apresentaram tendência positiva, enquanto Porto Alegre, Torres e Uruguaiana apresentaram tendências negativas. As reanálises apresentaram tendências para quatro locais, sendo eles Chuí com tendência negativa, Mostardas, Rio Grande e Porto Alegre com tendências positivas.

O modelo Eta HadCM apresentou tendências significativas para Porto Alegre e Santa Maria. De todas as séries analisadas para o mesmo período, nenhuma apresentou a mesma tendência para as três diferentes origens dos dados. Somente Porto Alegre teve tendência para as três séries analisadas, porém aos sinais das tendências não coincidiram. Portanto não é possível afirmar que a tendência das séries ocorreu realmente por fatores climáticos.

O que se concluiu é que existem diversos fatores que podem interferir nas observações de velocidade e direção do vento, dentre os quais podem-se citar degradação ou substituição dos anemômetros, alterações na vegetação ou urbanização em volta da estação, troca de local da estação, dentre outros.

Os dados de modelos climáticos utilizados inicialmente foram as saídas de vento a 10 metros dos modelos Eta CCS e HAdRM3P. No entanto ambos os modelos subestimaram significativamente as observações. Em virtude disso, fez-se uso da saída de vento em 10 metros do terceiro modelo, o Eta HadCM, que apresentou resultados mais consistentes com as observações.

A validação da saída de vento a 10 metros do modelo Eta HadCM a partir das observações revelou viés elevado para a maioria das estações. As estações de Rio Grande, Porto Alegre e Santa Maria apresentaram os desvios mais elevados, de 54%, 32% e 30% respectivamente. Os menores desvios sistemáticos foram obtidos para Chuí e Uruguaiana, de 4% e 2% respectivamente. Os valores percentuais do erro quadrático médio percentual (RMSE) para estações de Mostardas, Porto Alegre, Torres e Santa Maria ficaram em torno de 38% a 41%. Os menores valores de RMSE foram obtidos para Chuí e Uruguaiana, sendo 26% e 17% respectivamente, enquanto Rio Grande apresentou um valor percentual de 59%. As correlações entre o Eta HadCM e as observações, para o ciclo anual, foram iguais ou superiores a 0,75 chegando até 0,95.

Os maiores valores de velocidade média do vento a 10 metros ocorreram para as estações de Chuí, Mostardas e Uruguaiana, com valores entre 4 m.s^{-1} e 6 m.s^{-1} . Os valores das médias mais baixas ocorreram para as estações de Rio Grande, Porto Alegre, Torres e Santa Maria, com valores entre 2 m.s^{-1} e 4 m.s^{-1} . Observou-se que

esses locais apresentam características topográficas e de cobertura de solo mais complexas, com grandes variações no relevo e também área urbana mais extensa.

As estações de Chuí e Uruguaiana apresentaram a melhor correlação e os menores erros de viés e RMSE em relação ao modelo. Observou-se que essas regiões possuem um relevo com poucas variações, principalmente a estação de Uruguaiana que possui relevo e vegetação homogêneos em toda sua vizinhança. Portanto, entende-se que a saída de vento a 10 metros do modelo Eta HadCM é influenciada pelas características da superfície, ou seja, quanto mais complexa a topografia e a cobertura do solo em um determinado ponto de grade do modelo, maior será a incerteza dos prognósticos. Com base nas análises realizadas concluímos que o modelo simulou relativamente bem o vento a 10 metros, considerando que comparamos uma grade de 40x40 km do modelo com dados pontuais de estações.

As comparações do modelo Eta HadCM com dados de reanálise ERA-40 revelaram valores de viés, RMSE e R satisfatórios para o ciclo anual, em alguns casos, melhores que as observações. Os valores de viés para as estações de Chuí, Porto Alegre, Santa Maria e Uruguaiana variaram entre 21% e 25% enquanto os valores de RMSE variaram entre 24% e 27%. Mostardas e Rio Grande apresentaram os menores valores percentuais de viés e RMSE, de 12% e 6% e 15% e 16% respectivamente. Torres apresentou valores superiores a 72% para o viés e RMSE. Ainda, os valores de R foram inferiores a 0,65 chegando até 0,36 para o caso de Chuí. Apenas Porto Alegre apresentou a melhor correlação entre o modelo Eta HadCM e as reanálises ERA-40, com valor igual a 0,94.

Dessa forma, as reanálises resultaram em valores de viés e RMSE% baixos na validação do modelo Eta HadCM, inferiores aos das observações, revelando-se um meio adequado de validação do modelo. No entanto, com base nos valores dos parâmetros de A e k , e nos valores de densidade de potência obtidos, pode-se afirmar que as reanálises não são uma boa fonte para se estimar o potencial eólico. Assim, o vento a 10 metros das reanálises ERA-40 mostrou-se menos coerente com o vento do modelo Eta HadCM do que as análises realizadas a partir de dados

observados. Isso indica que mesmo com alguns valores elevados de viés e de RMSE e os dados excluídos das séries pela qualificação, as observações foram a melhor opção para validação do modelo Eta HadCM.

Nos campos de vento gerados pelo Modelo Eta HadCM, o período atual (1960-1990) apresenta um campo médio de ventos com velocidades variando entre 4 m.s⁻¹ a 6 m.s⁻¹ sobre a área continental do Rio Grande do Sul, e valores entre 6 m.s⁻¹ a 8 m.s⁻¹ sobre o oceano. Para esse mesmo período, as estações revelaram uma velocidade do vento entre 2,92 m.s⁻¹ a 5,59 m.s⁻¹. As estações de Chuí, Mostardas e Uruguaiana apresentaram os valores dentro da faixa de velocidade média do Eta HadCM. Esses locais possuem relevo mais suave e menor urbanização em volta dos locais das estações. Para os dados de reanálise ERA-40, cinco locais apresentam velocidade média menor ou maior do que a determinada pelo Eta HadCM, resultando em valores menos aproximados que os referentes às observações.

Os prognósticos de vento a 10 metros do modelo Eta HadCM para o período A1B (2010-2040) revelam um aumento na velocidade média do vento nas regiões norte e oeste do estado do Rio Grande do Sul, entre as latitudes 27°S e 31°S. O período A1B (2070-2100) também apresenta um aumento para essa mesma região, comparado ao período atual. Para todos os períodos do Cenário A1B, pode-se observar aumento no campo de vento em 10 metros, com destaque das regiões norte, oeste e na região litorânea, entre oceano Atlântico e Lagoa dos Patos.

As análises da sazonalidade do modelo, em que são comparados os períodos A1B (2010-2040) e A1B (2070-2100) com o período atual, revelam que o período de dezembro a fevereiro apresenta uma densidade de potência média inferior ao período atual com destaque para a região central do estado do Rio Grande do Sul. O período de 2070 a 2100 mostra uma velocidade inferior em todo o estado e no oceano próximo ao litoral. No período de março a maio, entre 2010 e 2040, não ocorre nenhuma variação no campo de vento, no entanto, entre 2070 a 2100, pode-se observar um aumento da densidade de potência na região oeste do estado e no litoral. Em janeiro a abril observa-se o aumento da densidade de potência entre as

predições futuras do modelo e o período atual, com destaque para a região norte e litorânea. As maiores variações ocorrem no período de setembro a novembro em até 14 W.m^{-2} na densidade de potência vento ao nível de 10 metros. De forma geral, o aumento na densidade de potência em todos os períodos persistiu para a região litorânea do estado. Na latitude entre 33°S e 36°S o modelo apresenta uma atenuação da densidade de potência vento para o período AIB (2070-2100) de aproximadamente 6 W.m^{-2} .

O potencial eólico determinado pelo WASP para as séries de dados observados, ERA-40 e modelo Eta HadCM do período atual, foi comparado ao Atlas Eólico Brasileiro e Atlas Eólico do Rio Grande do Sul. O potencial eólico das estações de Porto Alegre, Santa Maria e Uruguaiana foi determinado somente para as séries de reanálise e modelo, devido à baixa resolução temporal das séries observadas.

Para a velocidade média do vento a 50 metros de altura para uma área de 40×40 km obtidos com o uso do WASP, a estação de Chuí, Mostardas, Rio Grande e Torres apresentaram valores coerentes com os atlas eólicos. Destas estações, Porto Alegre, Santa Maria e Uruguaiana apresentaram velocidade do vento superior aos dados dos atlas eólicos, chegando a uma diferença de $2,17 \text{ m.s}^{-1}$. Mostardas também revelou uma diferença na velocidade média, em torno de $0,54 \text{ m.s}^{-1}$ acima da faixa de velocidade apresentada pelos atlas de velocidade média anual e direção do vento. Chuí apresentou a melhor comparação, com velocidade média dentro da faixa de velocidade de ambos os atlas.

Em termos de densidade de potência das observações, Chuí revelou um valor 37% superior ao do modelo Eta HadCM enquanto Mostardas apresentou um valor de densidade de potência dentro dos valores previstos pelo modelo. Os valores de Rio Grande foram inferiores ao modelo, em torno de 13%, enquanto as observações de Torres resultaram em um valor 50% menor que a densidade de potência obtida pelas predições do modelo.

A densidade de potência calculada a partir das reanálises resultou em valores muito superiores às calculadas por meio das saídas do modelo. Dessa forma as

reanálises não são adequadas para esse tipo de estudo, principalmente por possuírem uma resolução espacial baixa em relação ao modelo Eta HadCM.

Embora o cenário usado nesse trabalho, o A1B, seja um cenário otimista em que se considera um crescimento no uso de fontes alternativas de energia em paralelo às fontes fósseis e uma taxa de aperfeiçoamento de todas as tecnologias de oferta de energia em escala mundial, os campos de vento do modelo mostram um aumento médio de até 10% no potencial eólico na região de estudo até o ano 2100, devido a fatores de Mudanças Globais, principalmente devido ao aumento dos níveis de concentração de CO₂ na atmosfera considerado pelo modelo.

Em termos de porcentagem da densidade de potência, as previsões médias sazonais do modelo até 2100 mostram que, de todos os trimestres do ano, o período de dezembro a janeiro apresenta a maior atenuação na densidade de potência do vento, cerca de 10% a 40% principalmente mais no interior do continente. Já o trimestre de março a maio revelou um ganho de 10% a 20% na densidade de potência média em algumas áreas da região de estudo, principalmente no setor oeste do estado do Rio Grande do Sul. O aumento torna-se sistemático até os meses de setembro a novembro, variando em intensidade de densidade de potência e aumento da área com maiores intensidades de ventos. Os meses de junho a agosto apresentam aumento de 10% em todo o estado, com uma pequena área na região norte, onde o aumento pode chegar a 20%. Já nos meses de setembro a novembro ocorre o maior aumento na densidade de potência, acima de 20% e podendo chegar a 40% na região oeste do estado.

Com o uso do WAsP pode-se determinar com maiores detalhes o potencial eólico para áreas de 40x40 km tendo como ponto central as estações de observação. A densidade de potência média das estações de Chuí, Mostardas e Rio Grande revelaram-se coerentes com o potencial das séries do modelo Eta HadCM. Torres, no entanto apresentou valores inferiores de densidade de potência e BIAS elevados.

As discrepâncias e erros entre as observações e o modelo, reveladas pelo BIAS, RMSE e análise de tendência de Kendall mostram as dificuldades de usar grandes

séries observacionais quando não se conhece o histórico das estações e dos efeitos da variação da topografia para a saída de vento a 10 metros do modelo Eta HadCM. Portanto o grau de incerteza dos resultados deve-se às possíveis imprecisões dos dados observados e aos erros de modelo.

Observamos que o modelo Eta HadCM superestima as previsões de vento a 10 metros, em regiões de topografia mais complexa. Com relação à direção do vento, o modelo consegue prever uma única direção predominante do local com bastante precisão, embora não seja capaz de determinar uma segunda predominante que possua uma frequência significativa no que se refere a aproveitamento do vento.

6. CONCLUSÕES

Os objetivos propostos para esse trabalho foram atingidos, embora nem todas estações pudessem ser totalmente analisadas devido a resolução temporal das séries de dados observacionais disponíveis, como o caso de Porto Alegre, Santa Maria e Uruguaiana. Essas estações foram utilizadas apenas para validar o modelo Eta HadCM. No entanto, foram determinados o período atual e futuro do potencial eólico na altura de 50 metros, com uso do WAsP, para períodos de trinta a cinquenta anos de dados observados, dados do modelo Eta HadCM e reanálises.

Os campos médios de densidade de potência ao nível de 10 metros indicam um aumento de até 10% na densidade de potencia no estado do Rio Grande do Sul até o ano de 2100.

O teste de Kendall revelou discrepâncias entre as diferentes fontes de dados utilizadas. A divergência na tendência de diferentes séries para um mesmo local indica a existência de erros na aquisição e processamento dos dados. São necessárias mais séries climatológicas.

Os dados de modelo apresentaram-se coerentes com as observações, de forma que as correlações tiveram valores acima de 0,75 chegando a 0,95.

Os menores valores de Viés e RMSE e maiores valores de R ocorreram em regiões em que há topografia e vegetação mais homogênea, indicando que o modelo climático usado não reproduz bem as condições de ventos em 10 metros em locais com topografia mais complexa.

Existem diversos fatores que podem interferir nas observações de velocidade e direção do vento, dentre os quais pode-se citar depreciação ou substituição dos anemômetros, alterações na vegetação ou urbanização próximas da estação e troca de local dos equipamentos de medida.

Os campos sazonais mostram uma variação na amplitude de densidade de potência, onde as estações de verão e outono apresentam uma redução enquanto as estações inverno e primavera revelam um aumento na densidade de potência.

O WAsP mostrou variações na densidade de potência do vento em todas as áreas alvo. Em alguns casos essa variação foi pequena, e na maioria delas houve aumento na densidade de potência.

Os valores de k do modelo mostraram-se superiores aos das observações, o que indica uma distribuição mais apropriada para a exploração do potencial eólico. No entanto, deve-se levar em consideração que as séries do modelo não reproduzem bem eventos extremos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização deste trabalho e análises dos resultados, observou-se a necessidade de estudos complementares e ações que podem ser realizadas para melhorar a previsão e a estimativa do potencial eólico para regiões mais específicas.

Uso de séries de dados com maior resolução temporal para estudar efeitos de brisa: O efeito da brisa é de extrema importância para o setor de geração eólica, pois, o efeito desta na geração de eletricidade em um determinado período do dia pode ser de extrema importância.

Uso de topografia mais detalhada: a topografia GTOPO30 utilizada neste trabalho possui uma resolução de aproximadamente 1 km. Alguns dados continham erros como: curvas de nível descontínuas e matrizes de dados com erros, os quais precisaram de correções. O uso de arquivos com resolução espacial maior poderia melhorar a parametrização da superfície, fornecendo resultados mais precisos.

Dados de cobertura de superfície mais detalhados: os dados de vegetação utilizados apresentam uma grande variação de classes de vegetação, porém não consideram as regiões urbanas. Observou-se a necessidade de um mapeamento das áreas urbanas, principalmente aquelas em que houver alguma estação de dados observados. Esse fato aconteceu principalmente para as cidades de Rio Grande e Porto Alegre em que as estações de observação a 10 metros estão situadas dentro da cidade e fez-se necessária uma análise do local a partir de imagens de satélite para determinar a rugosidade em volta das estações.

Dados de modelo de vento em superfície mais precisos: o modelo Eta HadCM é um modelo de meso escala, e que este possui certas limitações quando se refere a superfície, neste caso a 10 metros. O que pode ser sugerido é que o modelo possua uma saída de velocidade de vento a uma altitude de 200 metros, diminuindo os efeitos da influência da orografia. O WAsP possui uma de suas saídas a 200

metros e pode, a partir dos dados do modelo, fornecer valores de potencial eólico e distribuição do vento mais confiáveis para uma altura de 50 metros.

Uso de dados de temperatura e umidade do observadas e de modelo: Usar valores de temperatura e umidade do modelo para a mesma altura do vento. Os valores de temperatura e umidade interferem diretamente na densidade do ar, causando variações na conversão de energia contida no vento pelos aerogeradores. Portanto o uso de estações com dados de temperatura e umidade do ar é importante para melhorar os resultados do WAsP.

Estudo de efeitos de fenômenos climáticos: o estudo de possíveis efeitos de fenômenos como El Niño e La Niña também podem ser considerados importantes tendo em vista que esses fenômenos causam variações nas temperaturas e precipitação média de determinados locais do Brasil, podendo vir a causar impactos sobre o setor de geração eólica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVISSAR, R.; PIELKE, R. A Parameterization of Heterogeneous Land Surfaces for Atmospheric Numerical Models and its Impact on Regional Meteorology. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 2113-2136, 1989.

ACKERMAN, S. A.; KNOX, J. A. **Meteorology: Understanding the Atmosphere**. Second edition. Toronto: Thomson Brooks/Cole, 2007 486 p. ISBN 0-534-37199-X.

ARAKAWA, A.; LAMB, V.R. **Computational design of the basic dynamical process of the UCLA general circulation model**. Methods in Computational Physics, v.17, p. 173-265, 1977.

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. San Diego: Academic Press, 1988, 303 p. ISBN 9780120644902.

Agência Nacional de Energia Elétrica, Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2008: ano base 2007**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2008. 52 p. Disponível em:
< https://ben.epe.gov.br/downloads/Sum_Executivo_BEN_2008.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2008.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; DE SÁ, A. L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: e-dea Technologies, 2001. 45 p CD-ROM.

BACK, J. A., Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. **Weather and Forecasting**, v.9, n.2, p. 265-278, 1994.

BOWEN, A. J. AND N. G. MORTENSEN. **WAsP prediction errors due to site orography**. Roskilde: Risø National Laboratory, 2004.. 65 p. ISBN 87-550-2320-7.

BRESLOW, P. B.; SAILOR, D. J. Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States. **Renewable Energy**, v. 27, p. 585-598, 2002.

CAO, XIA. Climate change and energy development: implications for developing countries. **Resource Policy**, v. 29, p. 61-67, 2003.

Carvalho, P. **Geração Eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003. 146 p. 2003. ISBN 85-7485-039-X.

CHOU, S. C.; TANAJURA, C. A. S.; XUE, Y.; NOBRE, C. A. Validation of the coupled Eta/SSiB model over South America. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. art. 8088, Oct. 2002. (INPE-9969-PRE/5529). Disponível em: <<http://urlib.net/cptec.inpe.br/walmeida/2003/05.23.14.29>>. Acesso em: 15 mai. 2008.

COLLE, S.; PEREIRA, E. B. **Atlas de irradiação solar do Brasil; 1ª versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície**. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 1998. 58 p.

COMPAGNUCCI, R. H.; SALLES, M. A. Surface pressure patterns during the year over southern South America. **International Journal of Climatology**, v. 17, p. 635-653, 1997.

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **Predições Numéricas – Modelo Eta**. On-line. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/prevnum/exp_eta.shtml>. Acesso em março de 2008.

DERECZYNSKI, C. P.; ROZANTE, J. R.; CHOU, S. C. Avaliação do desempenho do modelo regional Eta utilizando uma topografia de 30 segundos. In: Congressos Brasileiros de Meteorologia, n. 11, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. p. 1599-1608. Disponível em: <http://www.cbmet.com/edicoes.php?pageNum_Recordset_busca=1&totalRows_Recordset_busca=551&cgid=12>. Acesso em: 11 mai. 2008.

Energy Information Administration. **International Energy Outlook 2008**. Washington: National Energy Information Center, 2008. 245 p. Disponível em <[http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2008\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2008).pdf)>. Acesso em: 6 out. 2008.

FEARNSIDE, P. M. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's Curuá-Una dam. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 10, n. 4, p. 675-691, 2005.

FEDOROVA, N. **Meteorologia Sinótica. v 2.** Pelotas: Editora Gráfica Universitária, 2001. 242 p.

GAN, M. A. AND V. B. RAO. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 19, n. 5, p. 1293-1302, 1991.

GAURREAD, R. Cold Air Incursions over Subtropical South America: Mean Structure and Dynamics. **Department of Geophysics**, v. 128, n. 2, p. 2544-2559, 1999.

GASCH, R.; TWELE, J.; Wind Power Plants – Fundamentals, Design, Construction and Operation. Germany: Earthscan Publications Ltd, 416 p., 2002. ISBN: 978-1902916385

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L. D. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento.** São Paulo: EDUSP, 2003. 225p. ISBN 8531404525.

GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. **Annales Geophysicae**, v. 4, n. B4, p. 385-400, 1986.

HARTMANN, D. L. **Global Physical Climatology.** San Diego: Academic Press, 1994. 411 p. ISBN 0-12-328530-5.

HENRY, A. J. J. Bjerknes and H. Solberg On The Life Cycle of Cyclones and the Polar Front Theory of Atmospheric Circulation. **Monthly Weather Review**. 1922, v. 50 , n. 9, p. 468–473, Set.1922.

HOLTON, J. **An Introduction to Dynamic Meteorology.** Fourth edition. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004. 535 p. ISBN 0123540151.

HOUGHTON, J. **Global warming: the complete briefing.** Third edition. New York: Cambridge University Press, 2004. 340 p. ISBN 0521817625.

Intergovernmental Panel on Climate Change. **Special Report on Emissions Scenarios**, 2001. On-line. Disponível em: <http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/>. Acesso em: 21 fev. 2008.

Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Marquis, M.; Averyt, K.; Tignor, M.M.B.; Miller, H.L.; Chen Z. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. In: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press, Cambridge, New York, 2007. 996 p. On-line. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm>. Acesso em: 25 jul. 2008.

LEMOS, C. F.; CALBETE, N. O. Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987 a 1995. **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v. on line, n. Especial 10 anos, 1996. (INPE-12801-PRE/8091). Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliensp10a/14.html>>. Acesso em: mai. 2009.

LEE, R. Environmental impacts of energy use. In: Bent, R.; Orr, L.; B, Randall. **Energy: Science, Policy, and the Pursuit of Sustainability**. Washington, DC: Island Press. 2002. 257 p.

LIU, K. On the absorption, reflection and transmission of solar radiation in cloudy atmospheres. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 33, n. 5, p. 798-805, 1976.

LUTGENS, F. K.; TARBUCK E.J. **The Atmosphere: an introduction to Meteorology**. Sixth Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 462 p. ISBN 0133506126.

MORTENSEN, N.G.; LANDBERG, L.; TROEN, L.; PETERSEN, E.L. **Wind Atlas Analysis and Application Program – WAsP**, Vol. 2. Roskilde, Risø National Laboratory, 1993. 126 p.

MORTENSEN, N. G.; HEATHFIELD, D. N.; MYLLERUP, L.; LANDBERG, L.; RATHMANN, O. **Getting started with WAsP 8**. Second edition. Roskilde: Risø National Laboratory, 2004. 88 p. ISBN 87-550-3311-3.

PEREIRA, E.B., COLLE, S. A energia que vem do sol. **Ciência Hoje**, v. 22, n. 130, p. 24-35, 1997.

PEREIRA, E. B. O desafio das energias renováveis e suas implicações ambientais. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 36-47, Abril 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.03.11.41>>. Acesso em: 2 out. 2007.

PEZZI, L. P.; ROSA, M. B.; BATISTA, N. M. A Corrente de Jato Sobre a América do Sul. . **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v. on-line, n. Especial 10 anos, 1996. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/jatclim.html>>. Acesso em: 21 mai. 2009.

QUADRO, M. L.; MACHADO, R. L.; CALBETE, S.; BATISTA, N. M.; OLIVEIRA, G. S. Climatologia de precipitação e temperatura. **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v. on-line, n. Especial 10 anos, 1996. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/chuesp.html>>. Acesso em: 10 mai. 2009.

ROZANTE, J. R. **O impacto do aninhamento no modelo Eta nas previsões de tempo**. 2001. 130 p. (INPE-11432-TDI/953). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/11.23.15.00>>. Acesso em: 7 jun. 2008.

SANSIGOLO, C. A.; PEREIRA, C. S.; SILVA, I. R. Relações entre as precipitações regionais no sul do Brasil e as temperaturas da superfície dos oceanos Atlântico e Pacífico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.1, p. 5-11, 2004.

SNEYERS, R. **Sur l'analyse statistique des series d'observations**. Genève: Organisation Météorologique Mondial, 1975. 192 p.

SATYAMURTY, P.; MATTOS, L. F. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 6, p. 1355–1364, 1989. On-line. Disponível em: <[http://ams.allenpress.com/perlserv/?request=get-abstract&doi=10.1175%2F1520-0493\(1989\)117%3C1355%3ACLTFIT%3E2.0.CO%3B2](http://ams.allenpress.com/perlserv/?request=get-abstract&doi=10.1175%2F1520-0493(1989)117%3C1355%3ACLTFIT%3E2.0.CO%3B2)> . Acesso em: 17 mai. 2009.

SILVA, N. F.; ROSA, L. P.; ARAÚJO, M. R. The utilization of wind energy in the Brazilian electric sector's expansion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.9, p. 289-309, 2005.

SILVA, I. R. **Variabilidade sazonal e interanual das precipitações na região sul do Brasil associadas às temperaturas dos oceanos atlântico e pacífico**. 2001. 98 p. (INPE-11267-TDI/949). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/06.02.15.12>>. Acesso em: 23 jun. 2008.

Secretaria de Energia, Minas e Comunicações – SEMC. **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul**. On-line. Disponível em: <http://www.semc.rs.gov.br/atlas/INDEX_geral.htm>. Acesso em: 3 jun. 2005.

TOHM, A. S. Momentum, Mass and Heat Exchange of Plants Communities. In: J.L Monteith. **Vegetation and the atmosphere**. V.1. London: Academic Press 1975. 298 p.

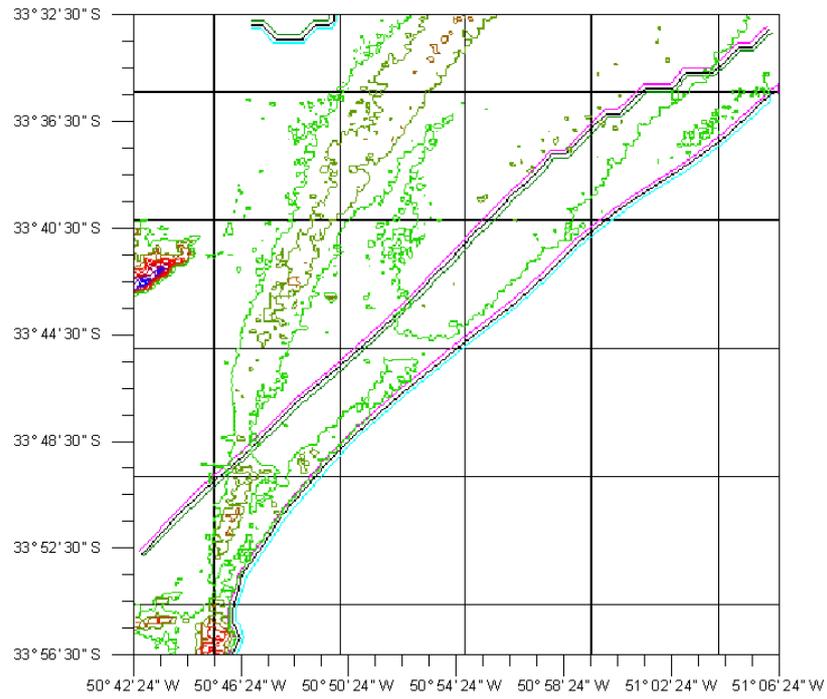
U. S. Geological Survey. **GTOPO Documentation**. On-line. Disponível em: <<http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/README.html>>. Acesso em: maio de 2008.

VIEIRA, R. M. S.; ALVALÁ, R. C. S.; CARVALHO, V. C.; FERRAZ NETO, S. Melhoria no mapeamento do uso da terra da região nordeste do Brasil para utilização em modelos meteorológicos e hidrológicos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, n. 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p. 1923-1930. On-line. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.12.01.21/doc/1923-1930.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2008.

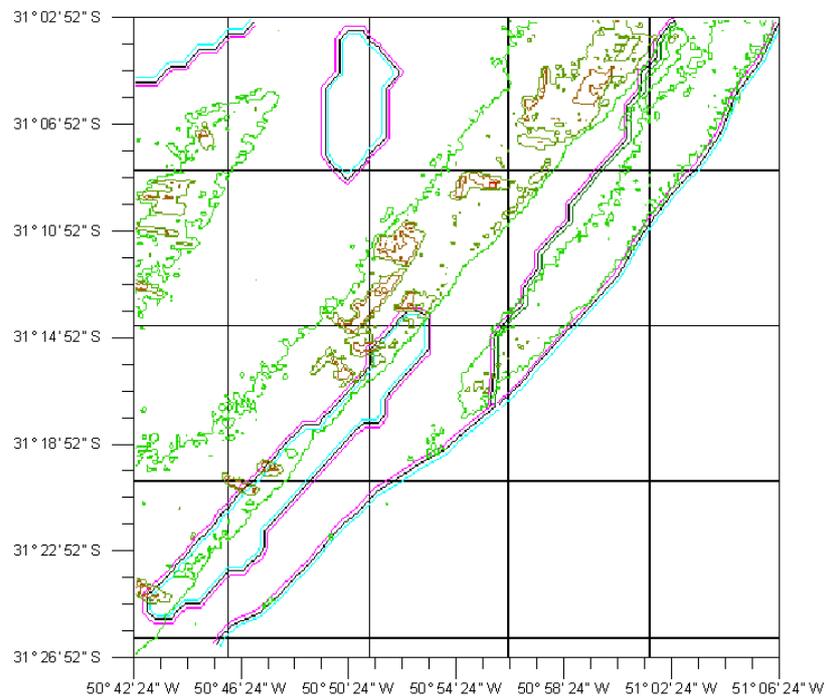
WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science: An Introductory Survey**. San Diego: Academic Press, 1977. ISBN 0127329501.

WebMET.com. **Met Monitoring Guide**. Disponível em:
<http://www.webmet.com/met_monitoring/toc.html>. Acesso em: 15 abr. 2008.

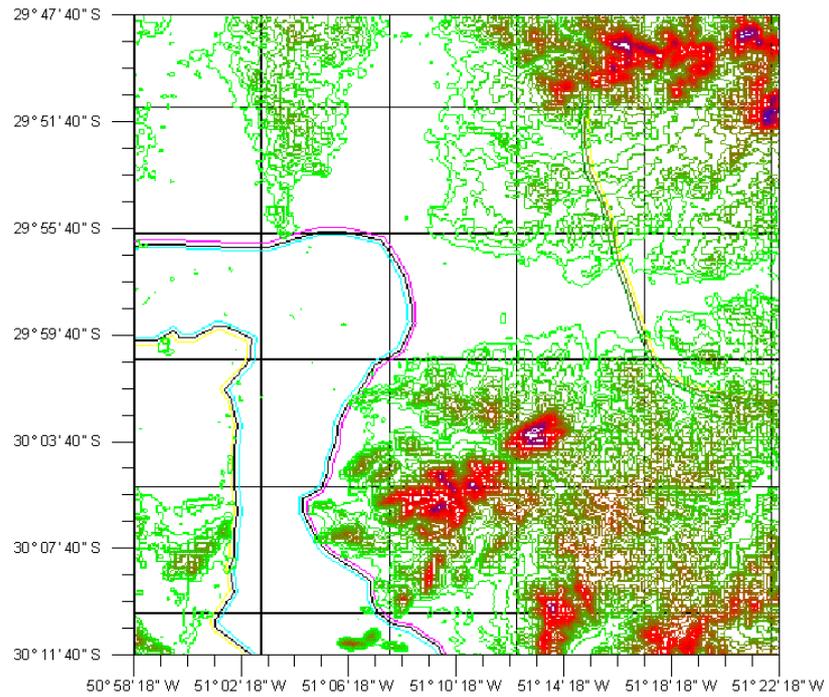
APÊNDICE A



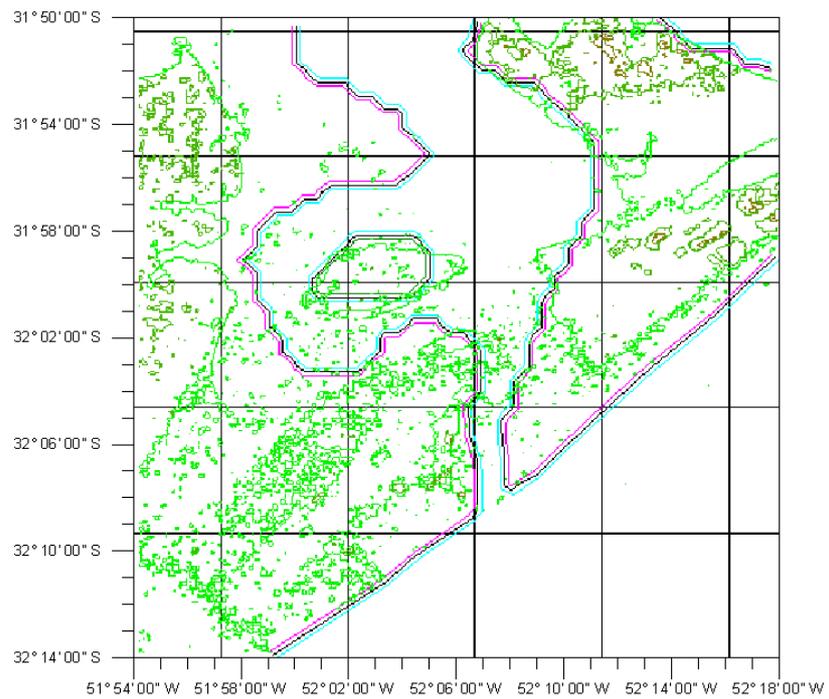
Área de 40x40 km de topografia e vegetação para a estação de Chuí.



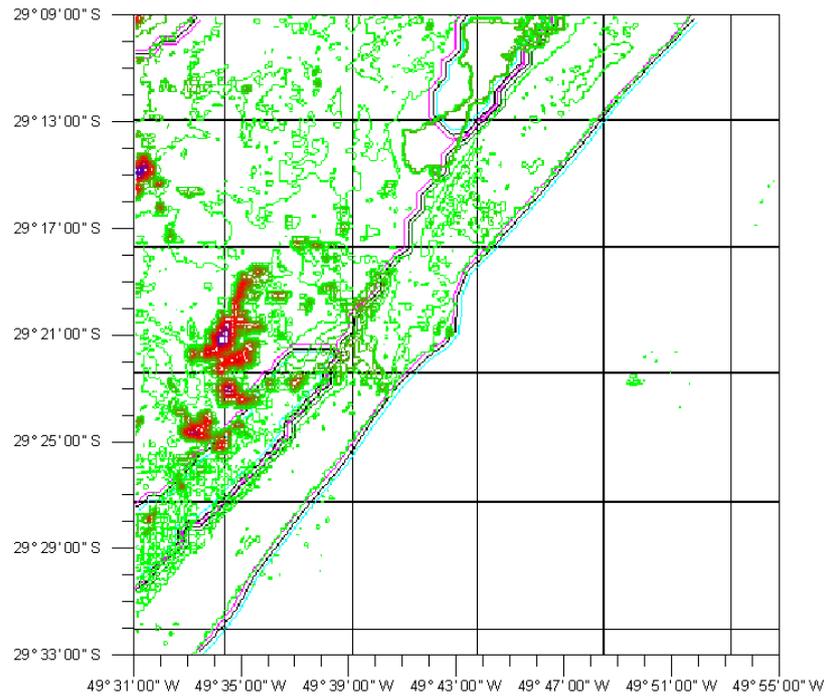
Área de 40x40 km de topografia e vegetação para a estação de Mostardas.



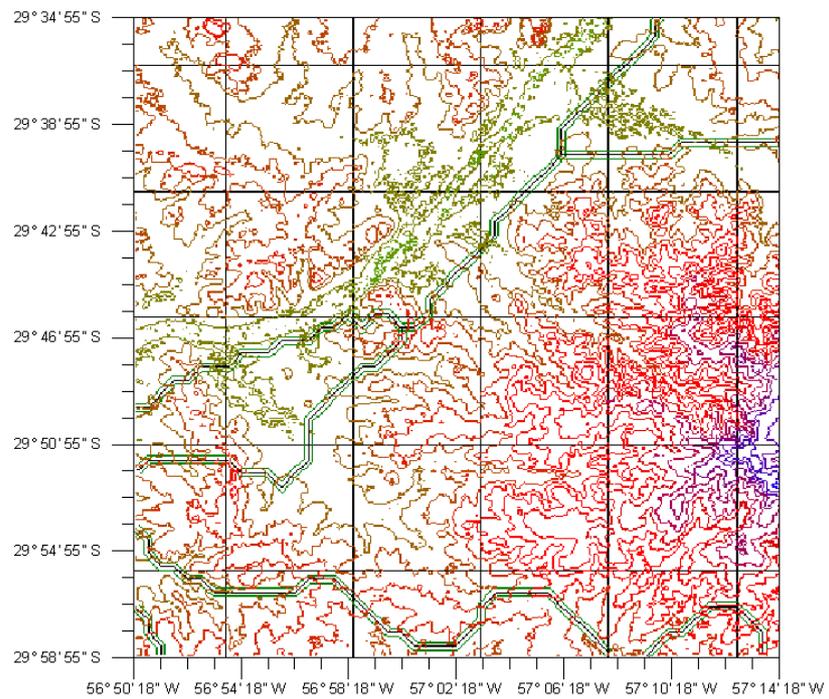
Área de 40x40 km de topografia e vegetação para a estação de Porto Alegre.



Área de 40x40 km de topografia e vegetação para a estação de Rio Grande.



Área de 40x40 km de topografia e vegetação para a estação de Torres.



Área de 40x40 km de topografia e vegetação para a estação de Uruguaina.

APÊNDICE B

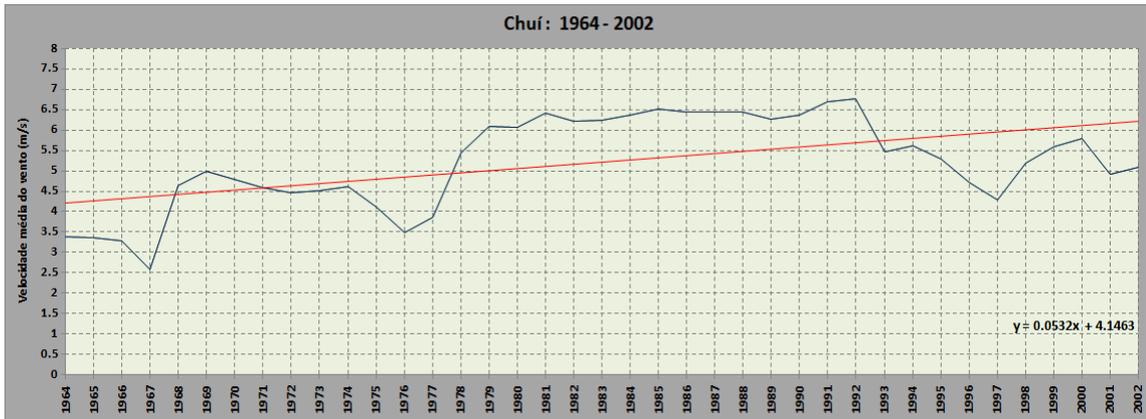


Gráfico de tendência da série observacional da estação de Chuí

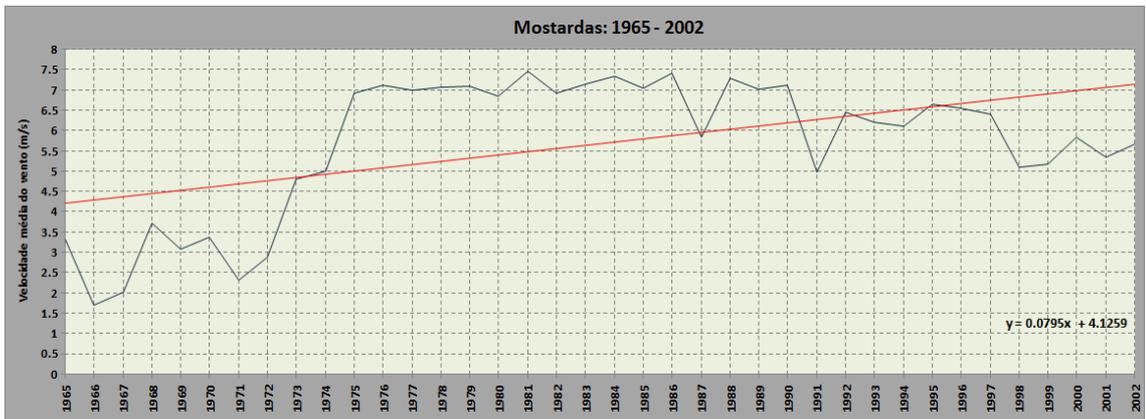


Gráfico de tendência da série observacional da estação de Mostardas

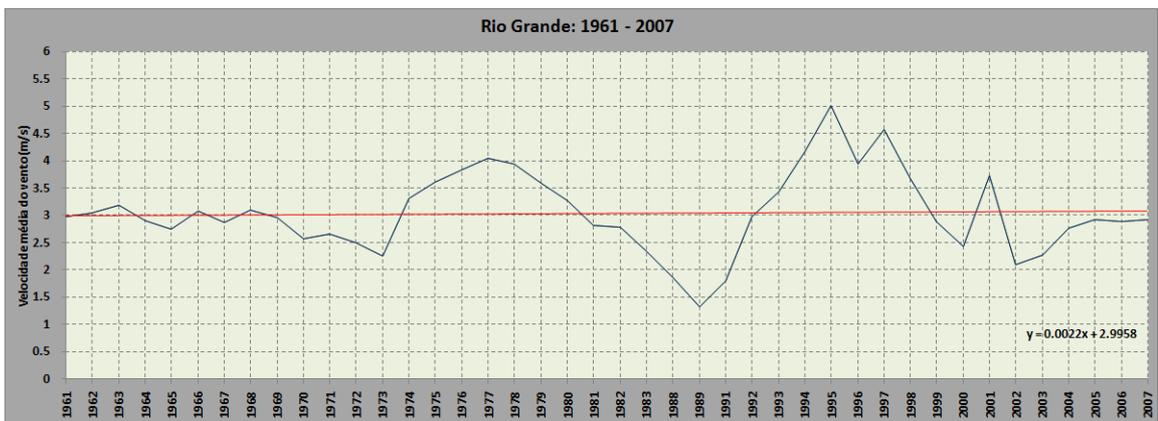


Gráfico de tendência da série observacional da estação de Rio Grande

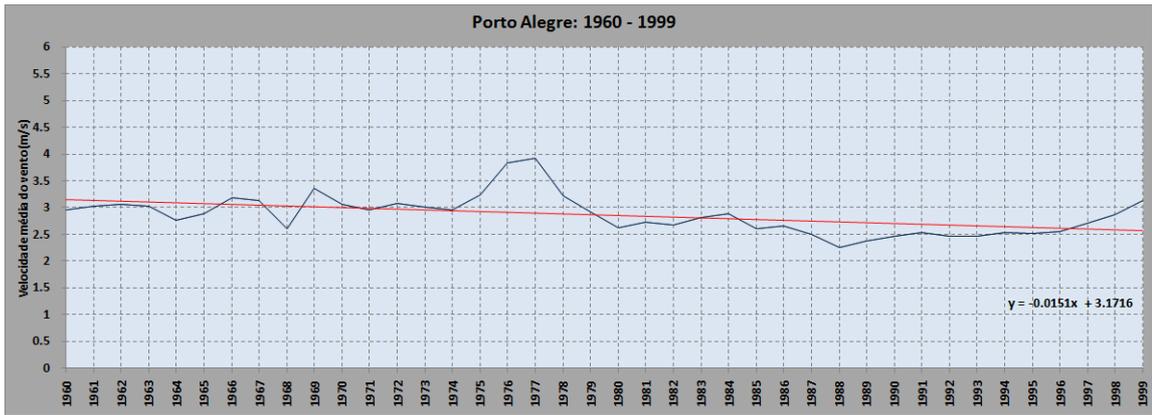


Gráfico de tendência da série observacional da estação de Porto Alegre

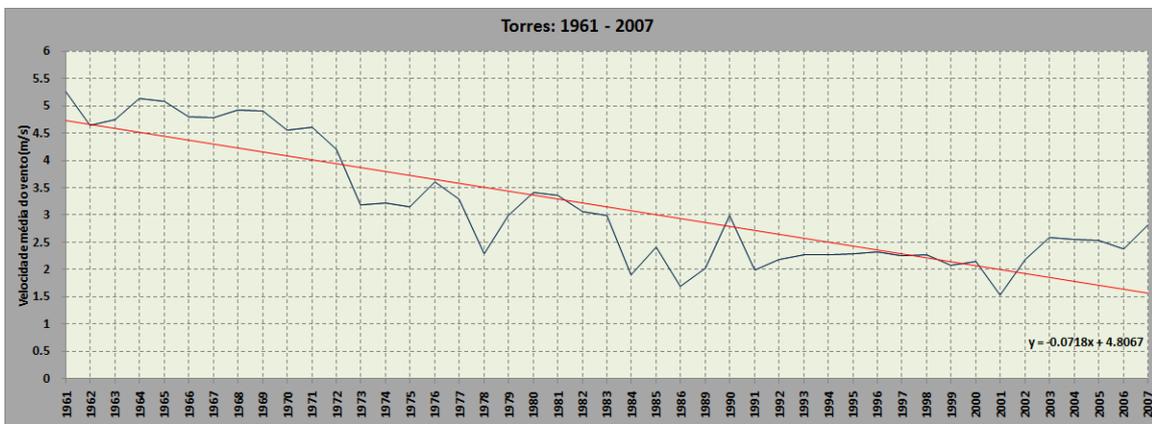


Gráfico de tendência da série observacional da estação de Torres

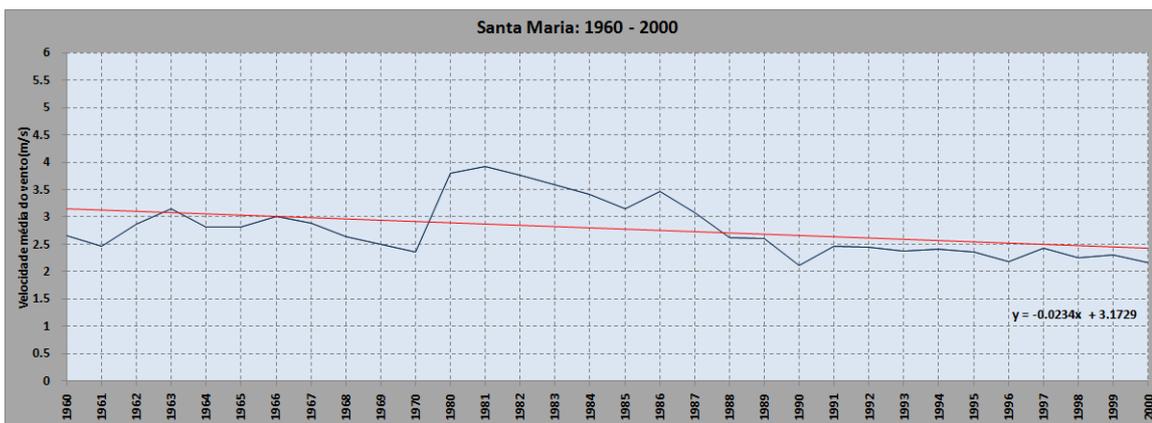


Gráfico de tendência da série observacional da estação de Santa Maria

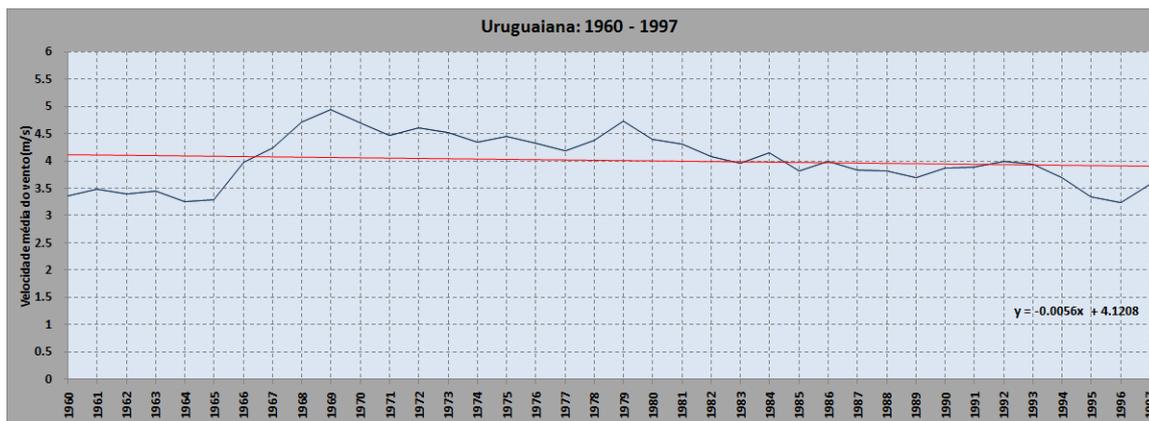
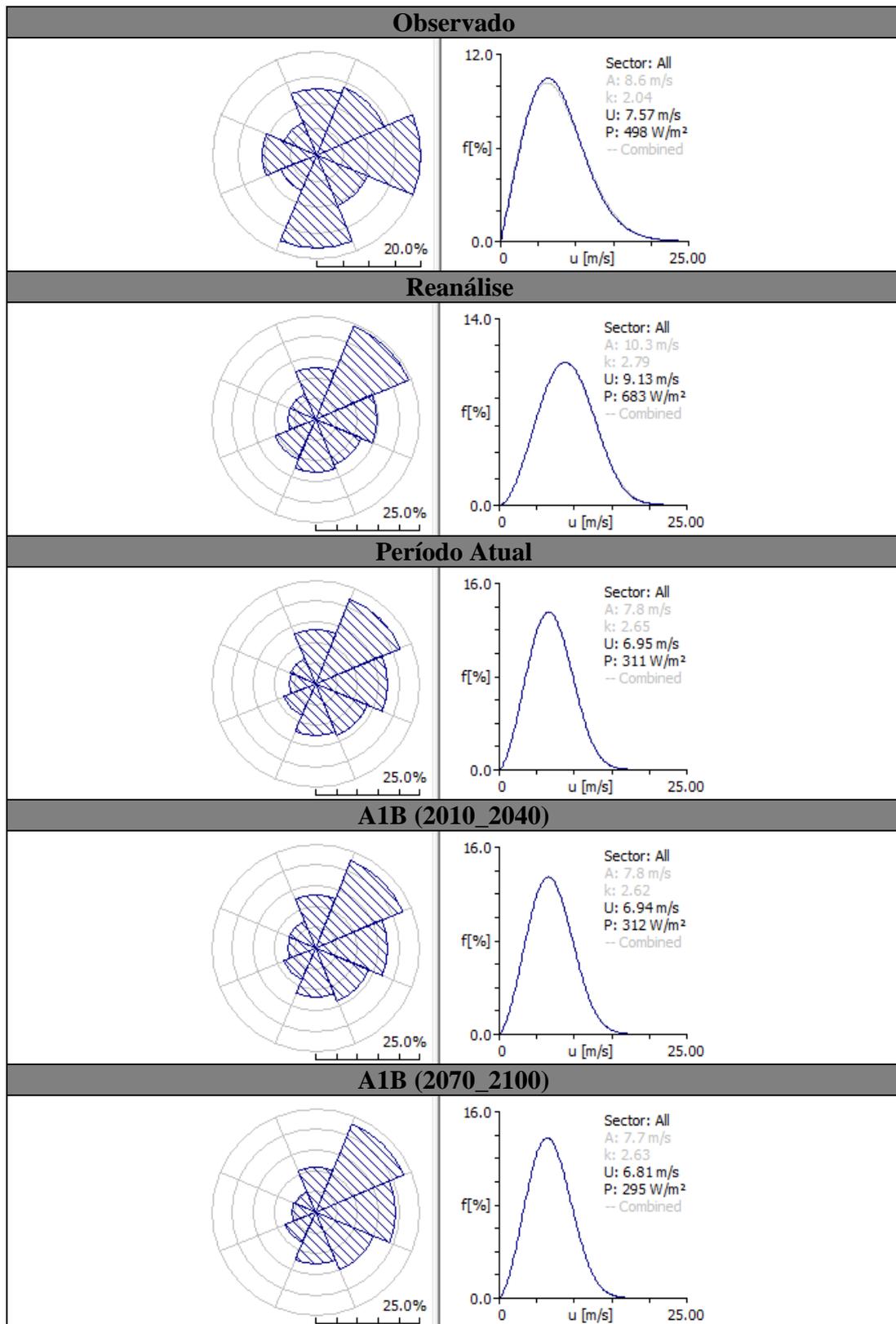
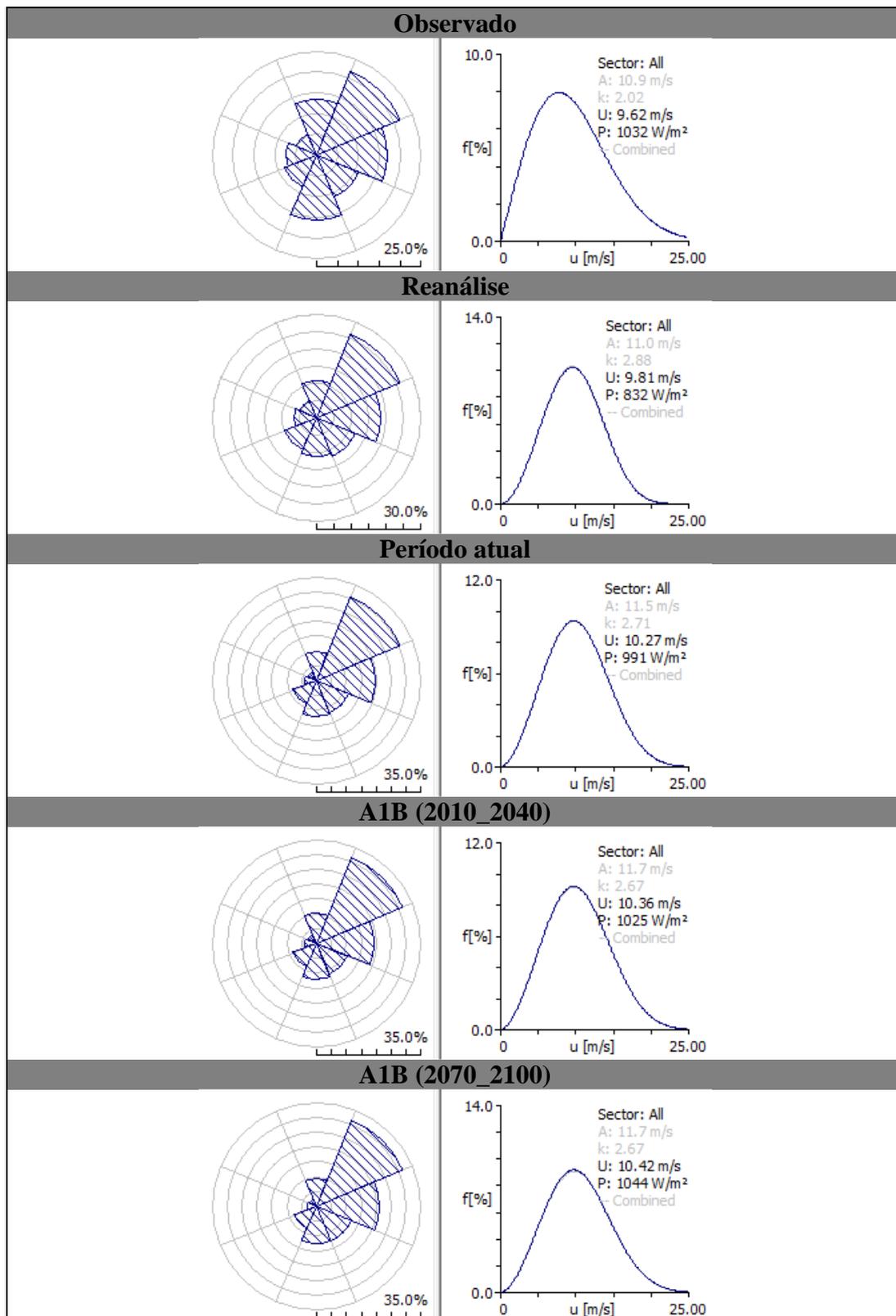


Gráfico de tendência da série observacional da estação de Urugaiana

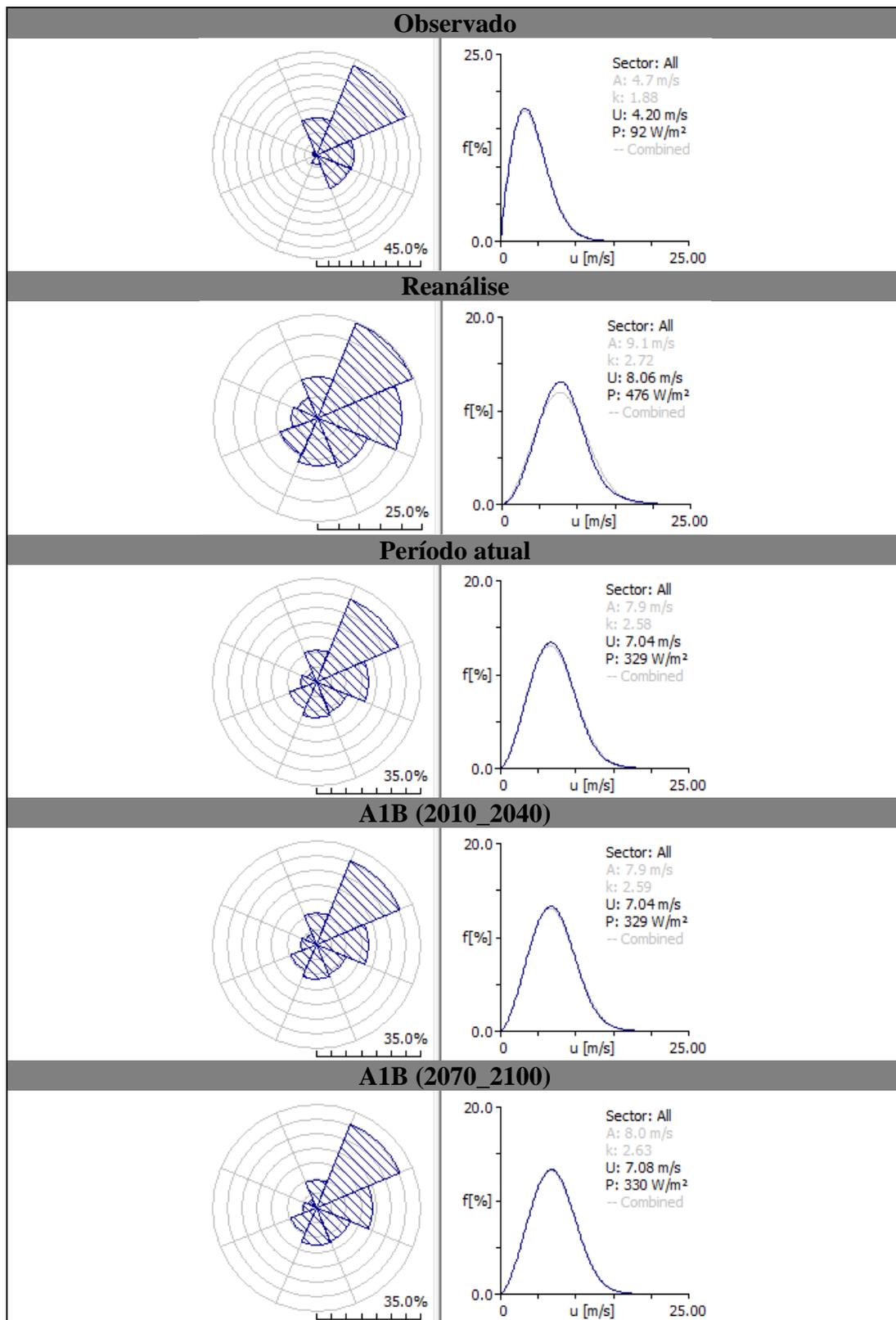
APÊNDICE C



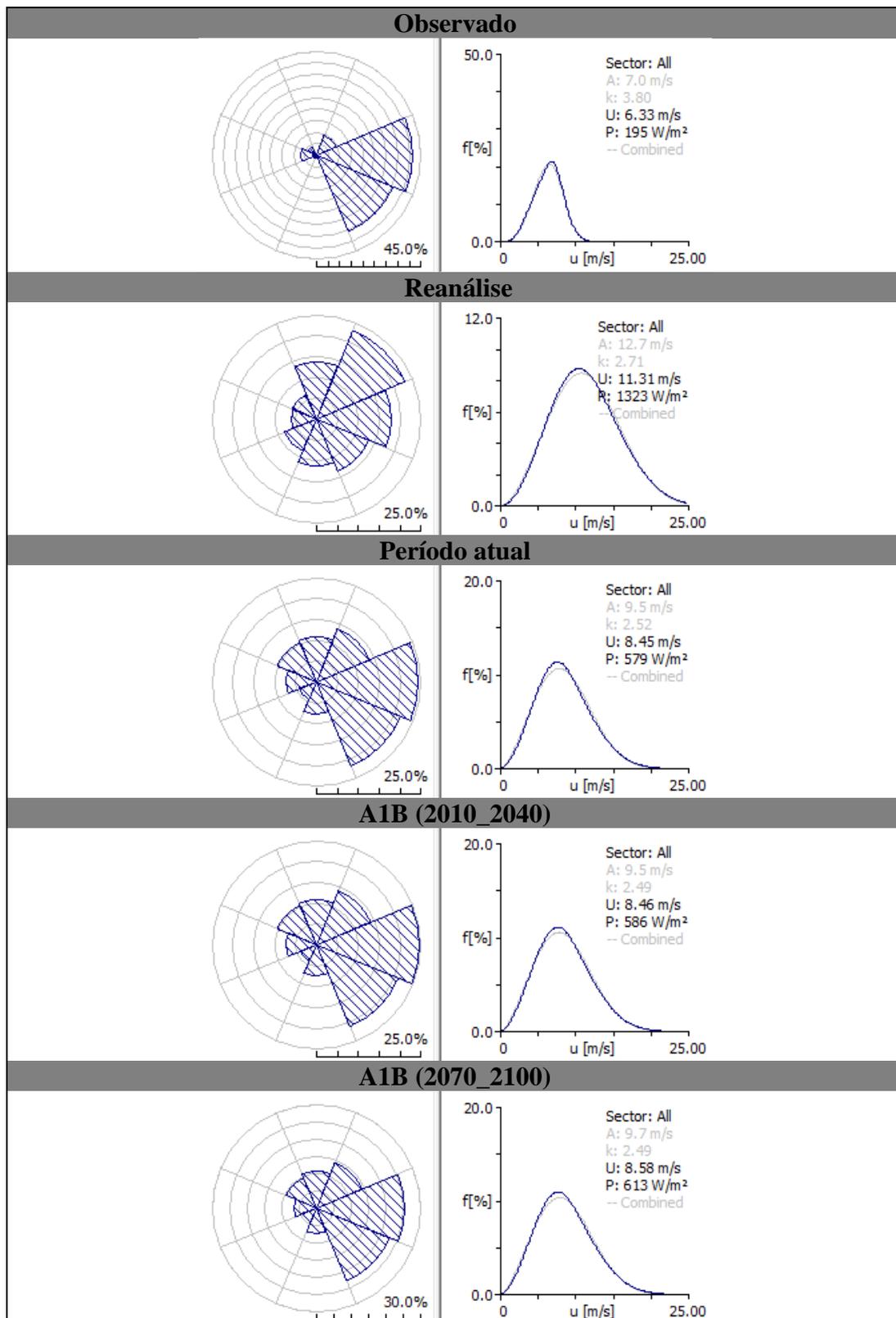
Histograma com direção e distribuição de Weibull para a estação de Chuí (Lat 33°44'30"S / Lon 053°22'18"W).



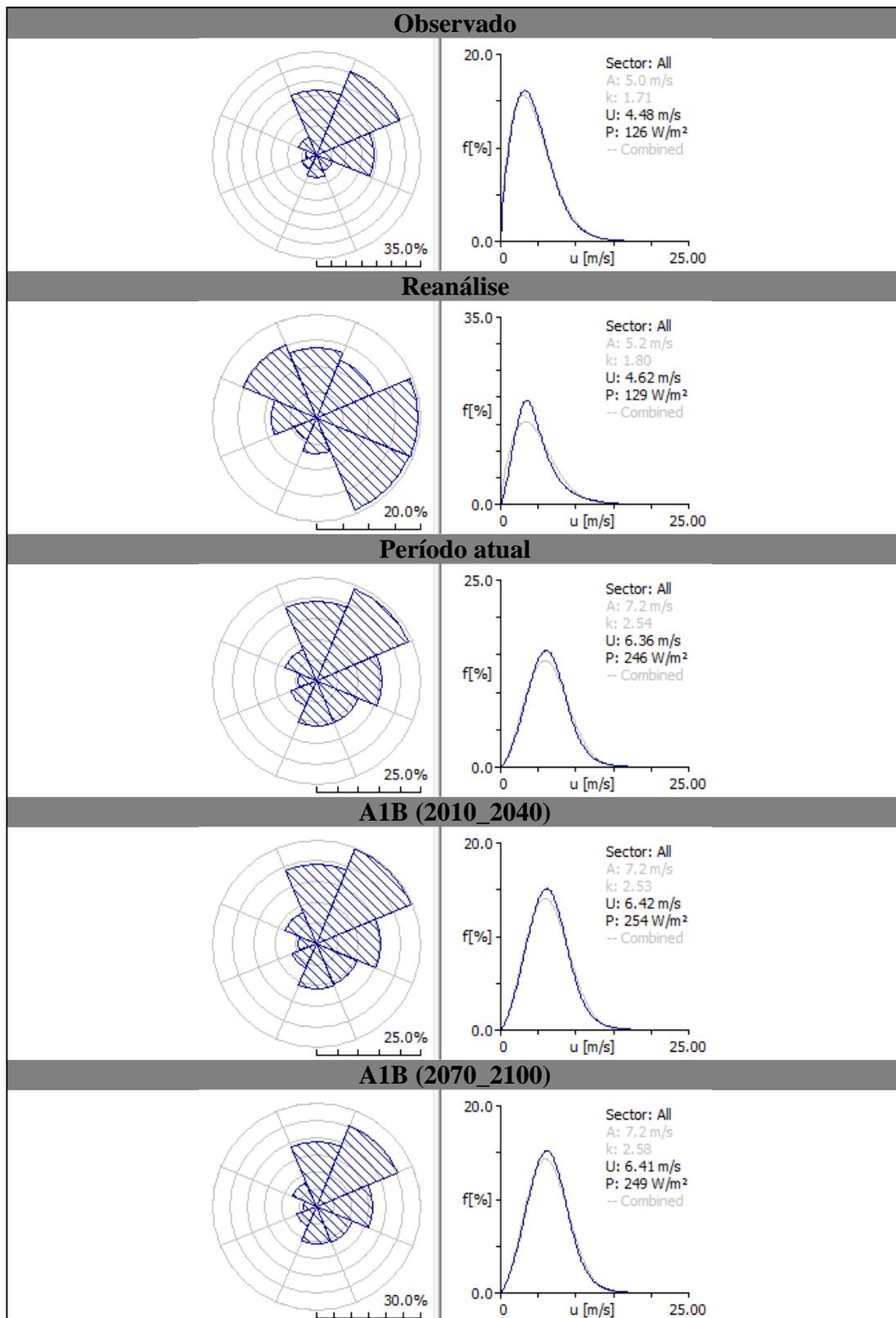
Histograma com direção e distribuição de Weibull para a estação de Mostardas (Lat 31°14'52"S / Lon 050°54'24"W).



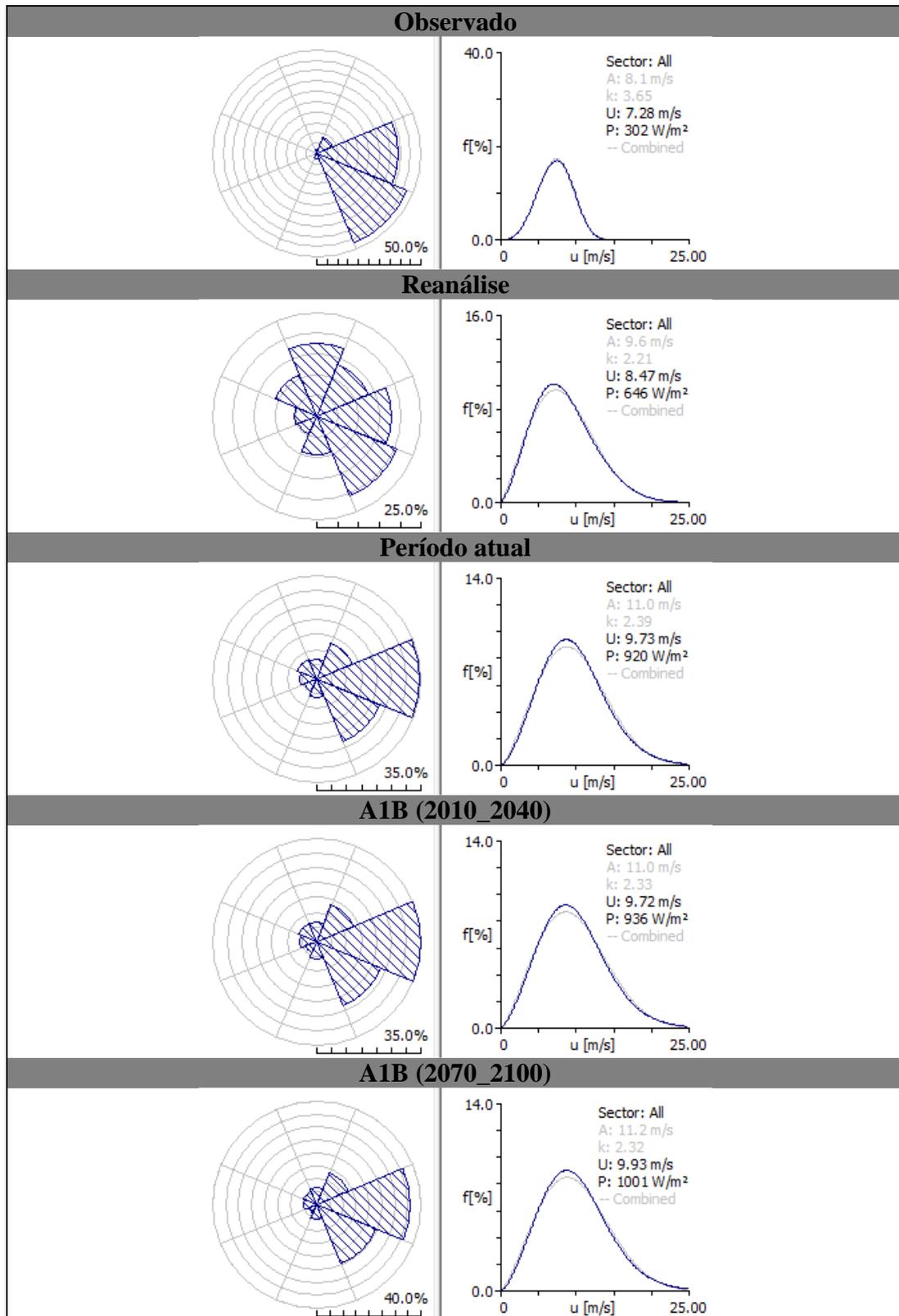
Histograma com direção e distribuição de Weibull para a estação de Rio Grande (Lat 032°02'S / Lon 052°06' W).



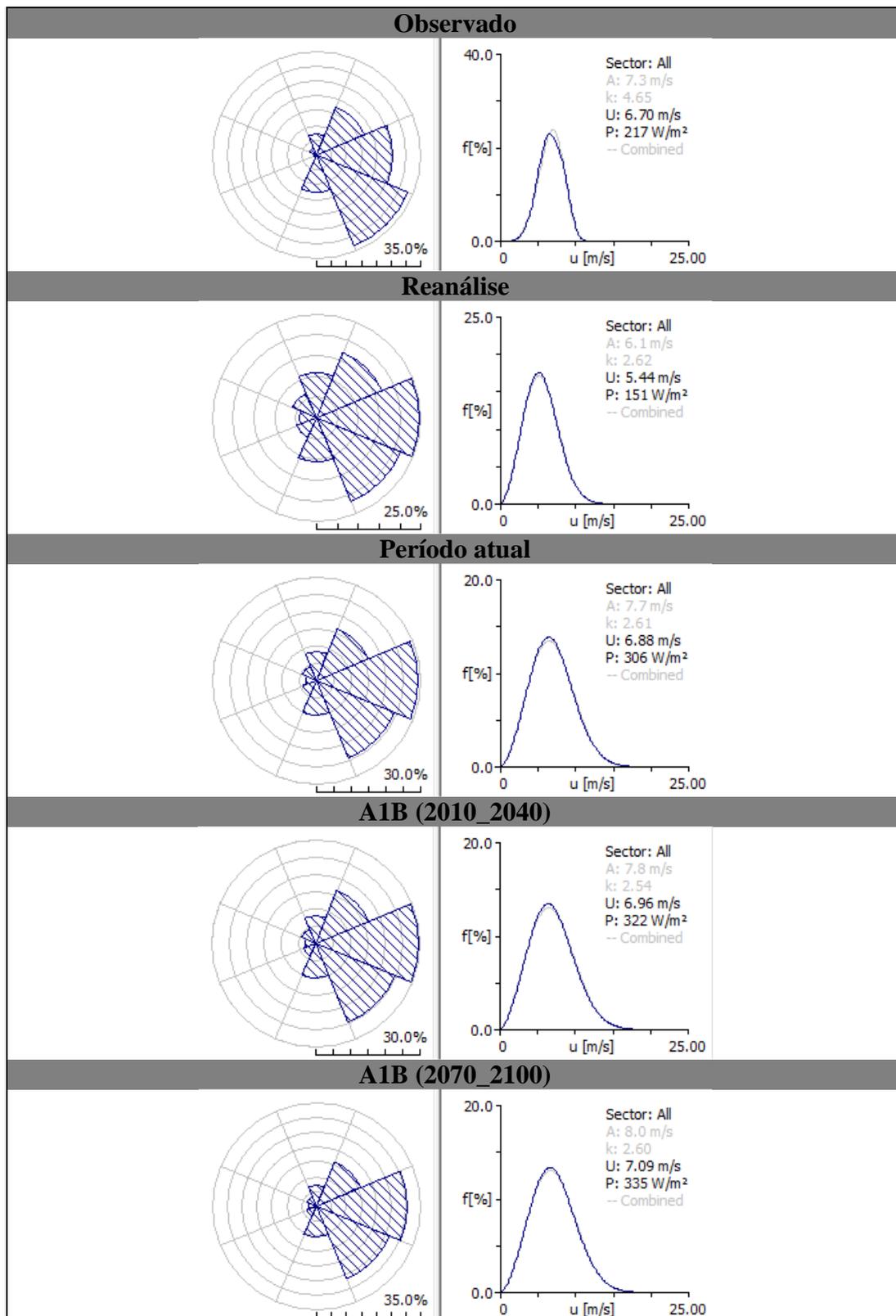
Histograma com direção e distribuição de Weibull para a estação de Porto Alegre (Lat 29°59'40"S / Lon 051°10'18"W).



Histograma com direção e distribuição de Weibull para a estação de Torres (Lat 029°21'S / Lon 049°43' W).



Histograma com direção e distribuição de Weibull para a estação de Santa Maria (Lat 29°42'39"S / Lon 053°41'32"W).



Histograma com direção e distribuição de Weibull para a estação de Uruguiana (Lat 29°46'55"S / Lon 057°02'18"W).