

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

**ANÁLISE DOS VENTOS À SUPERFÍCIE NA AMÉRICA DO SUL E ADJACÊNCIAS
NO CLIMA PRESENTE E FUTURO**

TATIANA ROCHA AMARO

Itajubá (MG)
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

TATIANA ROCHA AMARO

**ANÁLISE DOS VENTOS À SUPERFÍCIE NA AMÉRICA DO SUL E ADJACÊNCIAS
NO CLIMA PRESENTE E FUTURO**

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Meio ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração:

Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Orientador:

Prof(a). Dra. Michelle Simões Reboita

Itajubá (MG)

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
MESTRADO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

TATIANA ROCHA AMARO

**ANÁLISE DOS VENTOS À SUPERFÍCIE NA AMÉRICA DO SUL E
ADJACÊNCIAS NO CLIMA PRESENTE E FUTURO**

Dissertação aprovada por banca em 25 de setembro de 2015, conferindo ao autor o título de Mestre em Ciências em Meio ambiente e Recursos Hídricos.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arcilán Trevenzoli Assireu

Universidade Federal de Itajubá –Unifei

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

Universidade Federal de Itajubá –Unifei

Prof^a. Dra. Michelle Simões Reboita (Orientador)

Universidade Federal de Itajubá –Unifei

Prof^a. Dra. Rosmeri Porfirio da Rocha

Universidade de São Paulo – USP

*Dedico este trabalho àqueles que estiveram
sempre ao meu lado: mãe, pai e meus irmãos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus que me sustenta e por seu amor e misericórdia que se renovam a cada manhã.

A minha orientadora Dra. Michelle Simões Reboita pelos conhecimentos transmitidos, paciência e amizade, compreensão e horas de atenção dedicadas a mim na realização deste estudo.

A Dra. Marta Llopart por ter executado às simulações no *International Centre for Theoretical Physics* (ICTP) na Itália, a Profa. Dra. Rosmeri P. da Rocha e a MSc. a Livia Dutra por ajudar na manipulação dos dados.

Aos professores Dr. Arcilan Trevenzoli Assireu e Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho por consentirem a minha liberação para fazer o mestrado junto com o exercício do meu trabalho e por contribuir com sugestões importantes para esse estudo quando da realização do exame de qualificação.

A minhas tias Zulena Amaro pelo carinho e atenção e a Dorothy Rocha pela especial atenção na reta final deste estudo.

Aos amigos de mestrado, em especial a Ana Carolina, Matheus, Maria da Penha, Luciano, e Marcelo e aos alunos de ciências atmosféricas Bruno, Diego, Igor, Gabriel e André pelos auxílios na execução deste trabalho.

RESUMO

A análise dos ventos próximos da superfície se faz importante, pois o comportamento destes influencia o clima em diferentes escalas temporal e espacial. Além disso, o vento é uma importante fonte de energia considerada renovável e limpa, e uma boa alternativa para complementaridade de outras fontes de geração de energia. Diante do exposto, o objetivo do trabalho é validar a climatologia dos ventos à superfície na América do Sul (AS) e adjacências, simulada pelo *Regional Climate Model – version4* (RegCM4), no clima presente (1979-2005) e identificar possíveis mudanças na intensidade e direção desses ventos em cenários de mudanças climáticas. O modelo utilizado foi o RegCM4 aninhado ao modelo global HadGEM2-ES, e executado no domínio sugerido no projeto *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX). Na etapa inicial do estudo, os ventos da reanálise ERA-Interim e simulados no clima presente e futuro foram extrapolados de 10 para 100 metros de altura (altura atualmente usada pelos aerogeradores). A etapa seguinte consistiu da validação da simulação no clima presente (1979 – 2005), do vento nos níveis de 10 e 100 m, através de comparação com dados da reanálise e de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Uma vez verificado que o RegCM4 é hábil em simular as principais características da circulação atmosférica próximo à superfície, comparou-se as projeções do clima futuro, futuro próximo (2020 – 2050) e futuro distante (2070 – 2198) nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, com a simulação do clima presente. Essa análise também foi realizada nos níveis de 10 e 100 m de altura e indicou as principais diferenças projetadas na direção e intensidade dos ventos nos cenários de mudanças climáticas. Entre os resultados têm-se que a intensidade dos ventos, no futuro distante (cenário RCP8.5), é a que apresenta mudanças mais expressivas em relação ao presente. No verão, os ventos alísios no Oceano Atlântico (norte do Brasil) enfraquecem (fortalecem) e o setor norte do Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) e os jatos de baixos níveis (JBNs) a leste e a oeste dos Andes se intensificam; na primavera os JBNs a leste e a oeste dos Andes, o ASPS e os alísios no norte do Brasil e Oceano Atlântico equatorial estão intensificados e o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) se intensifica e se desloca para oeste durante o inverno e primavera. Com dados de intensidade do vento foi possível calcular a Densidade de Potência (DP) do vento e, assim, foram identificadas as áreas com maior e menor potencial no clima futuro e por estação do ano. A DP no futuro distante (cenário RCP8.5) exhibe no nordeste do Brasil tendência positiva e significativa no outono, inverno e primavera e no sul do país a tendência é positiva e significativa somente no verão. Por último, realizou-se uma análise da complementaridade entre ventos e precipitação no cenário RCP8.5. Os ventos se mostram complementar para a geração de energia principalmente no nordeste do Brasil durante o inverno no clima presente. E no clima futuro no norte do Brasil durante o verão e inverno, no sul do Brasil no verão e nordeste também do Brasil durante o inverno.

Palavras-chave: Ventos, Mudanças Climáticas, Densidade de Potência, Complementaridade de energia

ABSTRACT

Analysis of near-surface winds is important because their behavior influences the climate on different temporal and spatial scales. Moreover, wind is an important source of energy considered renewable and clean, and a good alternative to complement other sources of energy generation. Given the above, the objective is to validate the weather winds to the surface in South America (SA) and surrounding areas, simulated by the Regional Climate Model - version 4 (RegCM4), in the present climate (1979-2005) and identify possible changes the intensity and direction of these winds in climate change scenarios. The model used was the RegCM4 nested to master HadGEM2-ES, and executed in the field suggested by the project Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX). In the initial stage of the study, the winds of reanalysis ERA-Interim and simulated in the present and future climate were extrapolated from 10 to 100 meters in height (height currently used by turbines). The next step was the validation of simulation in present climate (1979 - 2005), wind levels of 10 and 100 m, by comparison with data from reanalysis and meteorological stations of the National Institute of Meteorology (INMET). Once verified that the RegCM4 is able to simulate the main features of atmospheric circulation near the surface, a comparison was made of the projections of future climate, the near future (2020 - 2050) and distant future (2070-2198) in RCP4.5 and RCP8.5 scenarios with the simulation of the present climate. This analysis was also performed at levels of 10 and 100 meters high and indicated the main differences projected in the direction and intensity of wind in climate change scenarios. Among the results have been that the intensity of the winds, in the distant future (RCP8.5 scenario), is the one with the most significant changes in relation to present. In summer, the trade winds in the Atlantic Ocean (northern Brazil) are weakened (strengthened) and the northern sector of the subtropical anticyclone of the South Pacific (ASPS) and the low level jets (JBN) east and west of the Andes are more intense; in the spring JBN east and west of the Andes, the ASPS and the trade in northern Brazil and equatorial Atlantic Ocean are intensified and the subtropical anticyclone of the South Atlantic(ASAS) is more intense and moved westward during the winter and spring. With wind speed data it was possible to calculate the power density (DP) of the wind and thus the identified areas with higher and lower potential for future climate and season of the year. DP in the distant future (RCP8.5 scenario) displays in northeastern Brazil positive and significant trend in the fall, winter and spring and the south the trend is positive and significant only in the summer. Finally, there was an analysis of complementarity between winds and rainfall in RCP8.5 scenario. Winds are complementary to generate energy mainly in northeastern Brazil during the winter in present climate and in the future climate in northern Brazil during summer and winter, southern Brazil during summer and northeast of Brazil during winter.

Keywords: *Winds, Climate Change, Power Density, Power Complementarity*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistemas de circulação atmosférica de grande escala atuantes em baixos níveis (850 hPa) na AS no (a) verão e (b) inverno. A direção dos ventos é representada por setas e magnitude (m/s) (adaptado de REBOITA et al. 2012). A sigla JBNs se refere ao jato de baixos níveis a leste dos Andes, alísios aos ventos alísios, ASAS ao anticiclone subtropical do Atlântico Sul e ASPS ao anticiclone subtropical do Pacífico Sul.	16
Figura 2 - Potência do gerador em Função do Diâmetro do Rotor	22
Figura 3 - Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a $7,0 \text{ m s}^{-1}$. Os tons verdes representam velocidades médias entre $3,5$ a $\pm 5,5 \text{ m s}^{-1}$, os amarelos entre $\pm 5,5$ a $\pm 7 \text{ m s}^{-1}$, tons vermelhos entre ± 7 e 8 m s^{-1} e os tons roxos valores acima de 8 m s^{-1}	25
Figura 4 - Mapa da velocidade média anual do vento a 50m de altura	26
Figura 5 - Velocidades médias trimestrais altura de 50 metros. Os tons verdes representam velocidades médias entre $3,5$ à $\pm 5,5 \text{ m s}^{-1}$, os amarelos entre $\pm 5,5$ a $\pm 7 \text{ m s}^{-1}$, tons vermelhos entre ± 7 e 8 m s^{-1} e os tons roxos valores acima de 8 m s^{-1}	27
Figura 6 - Área do domínio do CORDEX. A cor indica a topografia (m).	29
Figura 7 - Distribuição dos pontos analisados baseada na escolha de estações meteorológicas do INMET espalhadas pelo Brasil.....	30
Figura 8 - Localização dos pontos de estudo de densidade de potência.	35
Figura 9 - Climatologia sazonal do presente (1979 -2005) da circulação atmosférica na América do Sul da ERA-Interim (a, b, c, d), RegCM4 (e, f, g, h) e a diferenças (i, j, l, m) entre estes. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude	39
Figura10 – Média mensal climatológica no presente (1979 - 2005) para cada conjunto de dados, em três estações do centro-oeste do Brasil.....	41
Figura11 - Média mensal climatológica no presente (1979 - 2005) para cada conjunto de dados, em três estações do nordeste do Brasil.....	42
Figura12 - Média mensal climatológica no presente (1979 - 2005) para cada conjunto de dados em três estações do norte do Brasil.	43
Figura13 - Média mensal climatológica no presente (1979 - 2005) para cada conjunto de dados em três estações do sudeste do Brasil.....	44
Figura14 - Média mensal climatológica no presente (1979 - 2005) para cada conjunto de dados em três estações do sul do Brasil.....	45
Figura15 - Climatologia sazonal a 100 metros do presente (1979 -2005) da circulação atmosférica na América do Sul da ERA-Interim (a, b, c, d), RegCM4 (e, f, g, h) e a diferenças (i, j, l, m) entre estes. As cores indicam a magnitude do vento	48
Figura 16 - Climatologia sazonal do vento a 10 m no futuro próximo (2020 – 2050) no cenário RCP4.5 onde (a) Verão (b) Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão : futuro próximo – presente (f) Outono: futuro próximo – presente (g) Inverno: futuro próximo – presente (h) Primavera: futuro próximo – presente. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude	51
Figura 17 - Climatologia sazonal do vento a 100 m no futuro próximo (2020 – 2050) no cenário RCP4.5 onde (a)Verão (b) Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão : futuro	

próximo – presente (f) Outono: futuro próximo – presente (g) Inverno: futuro próximo – presente (h) Primavera: futuro próximo – presente. As cores indicam a magnitude do vento.52

Figura 18 - Climatologia sazonal do vento a 10 m no futuro distante (2070 – 2098) no cenário RCP4.5 onde (a) Verão (b) Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão : futuro distante – presente (f) Outono: futuro distante – presente (g) Inverno: futuro distante – presente (h)Primavera: futuro distante – presente. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude53

Figura 19 - Climatologia sazonal do vento a 100 m no futuro distante (2070 – 2098) no cenário RCP4.5 onde (a)Verão (b)Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão: futuro distante – presente (f) Outono: futuro distante – presente (g) Inverno: futuro distante – presente (h) Primavera: futuro distante – presente. As cores indicam a magnitude do vento.....54

Figura 20- Climatologia sazonal do vento a 10 m no futuro próximo (2020 – 2050) no cenário RCP8.5 onde (a) Verão (b) Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão: futuro próximo – presente (f) Outono: futuro próximo – presente (g) Inverno: futuro próximo – presente (h) Primavera: futuro próximo – presente. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude56

Figura 21 - Climatologia sazonal do vento a 100 m no futuro próximo (2020 – 2050) no cenário RCP8.5 onde (a) Verão (b) Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão : futuro próximo – presente (f) Outono: futuro próximo – presente (g) Inverno: futuro próximo – presente (h) Primavera: futuro próximo – presente. As cores indicam a magnitude do vento.57

Figura 22 - Climatologia sazonal do vento a 10 m no futuro distante (2070 – 2098) no cenário RCP8.5 onde (a) Verão (b) Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão : futuro distante – presente (f) Outono: futuro distante – presente (g) Inverno: futuro distante – presente (h)Primavera: futuro distante – presente. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude58

Figura 23 - Climatologia sazonal do vento a 100 m no futuro distante(2070 – 2098) no cenário RCP8.5 onde (a) Verão (b) Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão : futuro distante – presente (f) Outono: futuro distante – presente (g) Inverno: futuro distante – presente (h)Primavera: futuro distante – presente. As cores indicam a magnitude do vento...59

Figura 24 - Climatologia sazonal a 100m no futuro próximo (2020 – 2050), cenário RCP4.5, da intensidade do vento (a) Verão: futuro próximo – presente (b)Outono: futuro próximo – presente (c) Inverno: futuro próximo – presente (d) Primavera: futuro próximo – presente e da densidade de potência (e) Verão: futuro próximo – presente (f) Outono: futuro próximo – presente (g) Inverno: futuro próximo – presente (h)Primavera: futuro próximo – presente63

Figura 25 - Climatologia sazonal a 100 m no futuro distante (2070 – 2098), cenárioRCP4.5, da intensidade do vento (a) Verão : futuro distante – presente (b)Outono: futuro distante – presente (c) Inverno: futuro distante – presente (d) Primavera: futuro distante – presente e da densidade de potência (e) Verão : futuro distante – presente (f) Outono: futuro distante – presente (g) Inverno: futuro distante – presente (h)Primavera: futuro distante – presente64

Figura 26 - Climatologia sazonal a 100 m no futuro próximo (2020 – 2050), cenário RCP8.5, da intensidade do vento (a) Verão : futuro próximo – presente (b)Outono: futuro próximo – presente (c) Inverno: futuro próximo – presente (d) Primavera: futuro próximo – presente e da densidade de potência (e) Verão: futuro próximo – presente (f) Outono: futuro próximo – presente (g) Inverno: futuro próximo – presente (h)Primavera: futuro próximo – presente65

- Figura 27** - Climatologia sazonal a 100 m no futuro distante (2020 – 2050), cenário RCP8.5, da intensidade do vento (a) Verão: futuro distante – presente (b) Outono: futuro distante – presente (c) Inverno: futuro distante – presente (d) Primavera: futuro distante – presente e da densidade de potência (e) Verão: futuro distante – presente (f) Outono: futuro distante – presente (g) Inverno: futuro distante – presente (h) Primavera: futuro distante – presente66
- Figura 28** - Densidade de potência ($W m^{-2}$) dos dados da reanálise ERA-Interim, 75 km de resolução, no presente no ponto de grade na Paraíba 70
- Figura 29** - Densidade de potência ($W m^{-2}$) dos dados do modelo RegCM4, 50 km de resolução, no presente no ponto de grade na Paraíba 70
- Figura 30** - Diferença da densidade de potência ($W m^{-2}$) entre os dados do modelo RegCM4 e da reanálise ERA-Interim no presente no ponto de grade na Paraíba 70
- Figura 31** - Densidade de Potência ($W m^{-2}$) com os dados do modelo RegCM4, cenário RCP4.5, no ponto de grade na Paraíba: (a) futuro próximo (b) futuro próximo - presente (c) futuro distante (d) futuro distante - Presente 71
- Figura 32** - Densidade de Potência ($W m^{-2}$) com os dados do modelo RegCM4, cenário RCP8.5, no ponto de grade na Paraíba: (a) futuro próximo (b) futuro próximo - presente (c) futuro distante (d) futuro distante - Presente 72
- Figura 33** - Linha de tendência no ponto de grade na Paraíba no futuro distante, cenário RCP8.5..... 73
- Figura 34** - Densidade de Potência ($W m^{-2}$) dos dados da reanálise ERA-Interim, 75 km de resolução, no presente no ponto de grade no Rio Grande do Sul..... 76
- Figura 35** - Densidade de Potência ($W m^{-2}$) dos dados do modelo RegCM4, 50 km de resolução, no presente no ponto de grade do Rio Grande do Sul..... 76
- Figura 36** - Diferença da densidade de potência ($W m^{-2}$) entre os dados do modelo RegCM4 e da reanálise ERA-Interim no presente no ponto de grade do Rio Grande do Sul 76
- Figura 37** - Densidade de Potência ($W m^{-2}$) com os dados do modelo RegCM4, cenário RCP4.5, no ponto de grade no Rio Grande do Sul: (a) futuro próximo (b) futuro próximo - presente (c) futuro distante (d) futuro distante - Presente 77
- Figura 38** - Densidade de Potência ($W m^{-2}$) com os dados do modelo RegCM4, cenário RCP8.5, no ponto de grade no Rio Grande do Sul: (a) futuro próximo (b) futuro próximo - presente (c) futuro distante (d) futuro distante - Presente 78
- Figura 39** - Linha de tendência no ponto de grade no Rio Grande do Sul no futuro distante, cenário RCP8.5..... 79
- Figura 40** - Climatologia da América do Sul no presente (1979-2005) da precipitação (a) Verão (b) Inverno e dos ventos (c) Verão (d) Inverno. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude do vento81
- Figura 41** - Climatologia da América do Sul do futuro distante (2070-2098) menos o presente (1979 – 2005), cenário RCP8.5, da precipitação (a) Verão (b) Inverno e dos ventos (c) Verão (d) Inverno. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de densidade de potência eólica em 10 m, 50 m e 100 m adaptado de Elliott et al. 1986. Para o cálculo da densidade do ar foi considerado a temperatura de 15 graus. Na tabela Eq. indica o número da equação utilizada. Ver mais detalhes no texto.....	23
Tabela 2 - Características das estações meteorológicas	30
Tabela 3 - Valores da rugosidade de superfície do RegCM4 para vários tipos de terrenos (Valores usados com o esquema BATS)	32
Tabela 4 - Velocidade de vento e densidade de potência correspondente na Paraíba considerando a expressão 2 para extrapolação e a 7 para densidade de potência.	68
Tabela 5 - Velocidade de vento e densidade de potência correspondente no Rio Grande do Sul. Considerando a expressão 2 para extrapolação e a 7 para densidade de potência	75
Tabela 6 - Resultado do teste de Man-Kendall para reta de tendência. H indica o resultado do teste de significância sendo 1 significativo e 0 sem significância estatística. A inclinação da reta de tendência é dada por Sen's slope.	121

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AS	América do Sul
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
ASPS	Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul
CORDEX	<i>Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment</i>
DP	Densidade de Potência
ESP	<i>Earth System Physics</i>
GCMA	Modelos Climáticos Globais Acoplados
ICTP	<i>International Centre for Theoretical Physics</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
JBN	Jatos de Baixos Níveis
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
PRECIS	<i>Regional Climate Modelling System</i>
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
RegCM	<i>Regional Climate Model</i>
RegCM4	<i>Regional Climate Model – version 4</i>
SRES	<i>Special Report on Emissions Scenarios</i>
VV	Velocidade do Vento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA NA AS E ADJACÊNCIAS	16
2.2	ESTUDOS SOBRE SIMULAÇÕES CLIMÁTICAS REGIONAIS	18
2.3	ENERGIA EÓLICA	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	MODELOS	28
3.1.1	RegCM4	28
3.1.2	HadGEM2 –ES	28
3.1.3	Características das simulações com o RegCM4	28
3.2	DADOS DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	29
3.3	EXTRAPOLAÇÃO DO VENTO DE 10 PARA 100 METROS	31
3.4	DENSIDADE DE POTÊNCIA	33
3.5	ANÁLISE DE COMPLEMENTARIDADE	36
4	RESULTADOS	37
4.1	PRESENTE	37
4.1.1	Ventos a 10 m	37
4.1.1.1	Ventos em diferentes locais do Brasil	40
4.1.2	Ventos a 100 metros de altura	46
4.2	FUTURO	49
4.2.1	Cenário RCP4.5	49
4.2.2	Cenário RCP8.5	55
4.3	DENSIDADE DE POTÊNCIA DO VENTO	60
4.3.1	América do Sul	60
4.3.2	Densidade de potência na Paraíba	67
4.3.3	Densidade de potência do Rio Grande do Sul	73
4.4	COMPLEMENTARIDADE DE ENERGIA	79
5	CONCLUSÃO	83
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICE A - Climatologia Mensal do Vento a 10 m - Presente	90
	APÊNDICE B - Climatologia Mensal do Vento a 100 m – Presente	93
	APÊNDICE C - Climatologia Mensal do Vento a 10m (Futuro Próximo, RCP4.5)	96
	APÊNDICE D - Climatologia Mensal do Vento a 100 m (Futuro Próximo RCP4.5)	99
	APÊNDICE E - Climatologia Mensal do Vento a 10 m (Futuro Distante, RCP4.5)	102
	APÊNDICE F - Climatologia Mensal do Vento a 100 m (Futuro Distante, RCP4.5)	105
	APÊNDICE G - Climatologia Mensal do Vento a 10 m (Futuro Próximo, RCP8.5)	108
	APÊNDICE H - Climatologia Mensal do Vento a 100 m (Futuro Próximo, RCP8.5)	111
	APÊNDICE I - Climatologia Mensal do Vento a 10 m (Futuro Distante, RCP8.5)	114
	APÊNDICE J - Climatologia Mensal do Vento a 100 m (Futuro Distante, RCP8.5)	117
	APÊNDICE L - Climatologia Sazonal da Precipitação x Vento (Futuro, RCP8.5)	121
	APÊNDICE M - Resultado do teste de Mann-Kendall para reta de tendência	122

1 INTRODUÇÃO

O vento, movimento do ar na atmosfera, é gerado pela força do gradiente horizontal de pressão, sendo que o ar escoa de uma região de alta para uma região de baixa pressão. A circulação do ar ocorre em diferentes escalas espaciais e temporais. Quando se trata de movimentos com escala espacial da ordem de 10^3 km ou mais, se tem a chamada circulação geral da atmosfera.

Devido à vasta extensão latitudinal da América do Sul (AS) há diferentes sistemas de ventos, ligados à circulação geral da atmosfera, em baixos níveis que atuam ou afetam o continente (REBOITA et al., 2010). Entre eles, têm-se: os anticiclones subtropicais do Atlântico Sul e do Pacífico Sul, os jatos de baixos níveis a oeste e leste dos Andes e os ventos alísios. Tendo em vista que esses sistemas estão associados com o transporte de calor e umidade, o que influencia diretamente o clima da AS, e como são importantes para a geração de energia eólica, é de interesse conhecer suas características no clima futuro. Embora os ventos sejam uma variável atmosférica importante, em geral, os estudos que associam o aumento dos gases do efeito estufa com as mudanças climáticas não se dedicam a eles, e sim, a precipitação e temperatura.

As projeções do clima futuro podem ser realizadas através de modelos numéricos. Esses modelos correspondem a um conjunto de equações matemáticas que representam os processos físicos da atmosfera. Para o estudo do clima futuro, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) define cenários de emissões de gases de efeito estufa. O primeiro conjunto de cenários, IS92, foi publicado em 1992 (HOUGHTON e CALLANDER, 1992). Em 2000 foi lançada a segunda geração de cenários descrita no *SpecialReport on Emissions Scenarios* – SRES que inclui os cenários A1, A2, B1 e B2 (SRES, 2000). O cenário A1 expõe rápido aumento econômico, e é dividido em três grupos com alternativas de mudança no sistema de energia. O A2, o mais pessimista, fundamenta-se na autossuficiência nacional e na preservação de identidades locais. O B1, cenário menos pessimista, destaca-se em soluções para sustentabilidade econômica, social e ambiental. Já o B2, com respostas de nível intermediário entre os cenários, esboça um mundo com soluções pontuais para sustentabilidade econômica, social e ambiental, com aumento da população a uma taxa menor do que o A2 (SRES, 2000). O conjunto mais recente de cenários é o *Representative Concentration Pathways* (RCPs), que inclui os: RCP8.5, RCP6, RCP4.5 e RCP2.6. Os números que acompanham a sigla RCP indicam o aumento das forçantes

radiativas (W m^{-2}) até o ano de 2100, em relação ao período pré-industrial. Os RCPs incluem um cenário de mitigação comum com a forçante radiativa baixa (RCP2.6), dois cenários com forçantes médias (RCP4.5 / RCP6) e um cenário com emissões bastantes elevadas, o RCP8.5 (VUUREN et al., 2011).

Alguns dos estudos que enfocam projeções da circulação atmosférica na AS são os de Garreaud e Falvey (2009), Marengo et al. (2010), Krüger et al. (2012) e Reboita et al. (2014). Com relação aos trabalhos citados, Krüger et al. (2012) e Reboita et al. (2014) estudaram a circulação atmosférica através do *Regional Climate Model* (RegCM). Esse é um modelo de área limitada e, por isso, possui vantagens em relação a modelos de circulação geral da atmosfera, como representar de modo mais adequado circulações de mesoescala. Ambos os autores mencionam que o RegCM é hábil em representar as principais características climáticas da atmosfera sendo adequado seu uso no estudo do clima futuro.

1.1 OBJETIVO

O objetivo do presente estudo é validar a climatologia dos ventos à superfície na AS e adjacências simulada pelo *Regional Climate Model – version4* (RegCM4) no clima presente (1979-2005) e identificar possíveis mudanças na intensidade e direção desses ventos em cenários de mudanças climáticas. Assim, tem-se como objetivos específicos:

- (a) Determinar a climatologia dos ventos a 10 m de altura no clima presente (1979-2005) na reanálise ERA-Interim e na simulação do RegCM4;
- (b) Comparar as climatologias obtidas no item (a);
- (c) Comparar os dados de ventos simulados e da ERA-Interim (em pontos de grade) com os de algumas estações meteorológicas do INMET no clima presente;
- (d) Determinar a climatologia dos ventos à superfície no clima futuro em dois períodos: futuro próximo (2020 a 2050) e futuro distante (2070-2098) e nos cenários RCP4.5 e RCP8.5;
- (e) Extrapolar as climatologias do vento a 10 m de altura, tanto no clima presente quanto futuro, para a altura de 100 m, que é a altura atualmente utilizada para a geração de energia com os aerogeradores;
- (f) Calcular a densidade de potência a 100 metros na AS e fazer um estudo mais detalhado em duas localidades: uma na região nordeste e outra no sul do Brasil;
- (g) Analisar a complementaridade entre os ventos e a precipitação na AS no clima presente e no futuro distante.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este estudo é importante para identificar a performance do modelo RegCM4 em simular a climatologia dos ventos próximo à superfície no clima presente e também para identificar possíveis modificações dessa variável em cenários de mudanças climáticas. Isto porque o vento pode acarretar impactos em outras variáveis, como na temperatura do ar e na precipitação, além de ser de grande importância para geração de energia.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA NA AS E ADJACÊNCIAS

Em termos de sistemas de grande escala, a AS é influenciada pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), pelo Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS), além de ser influenciada pelos dos ventos alísios (**figura 1**) e pelas ondas que viajam em níveis mais elevados da atmosfera, que também vão contribuir para a formação de ciclones. Além disso, há a atuação de jatos de baixos níveis (JBNs) tanto a leste quanto a oeste dos Andes (GARREAUD; FALVEY, 2009; KRÜGER et al., 2012; MARENGO et al., 2010).

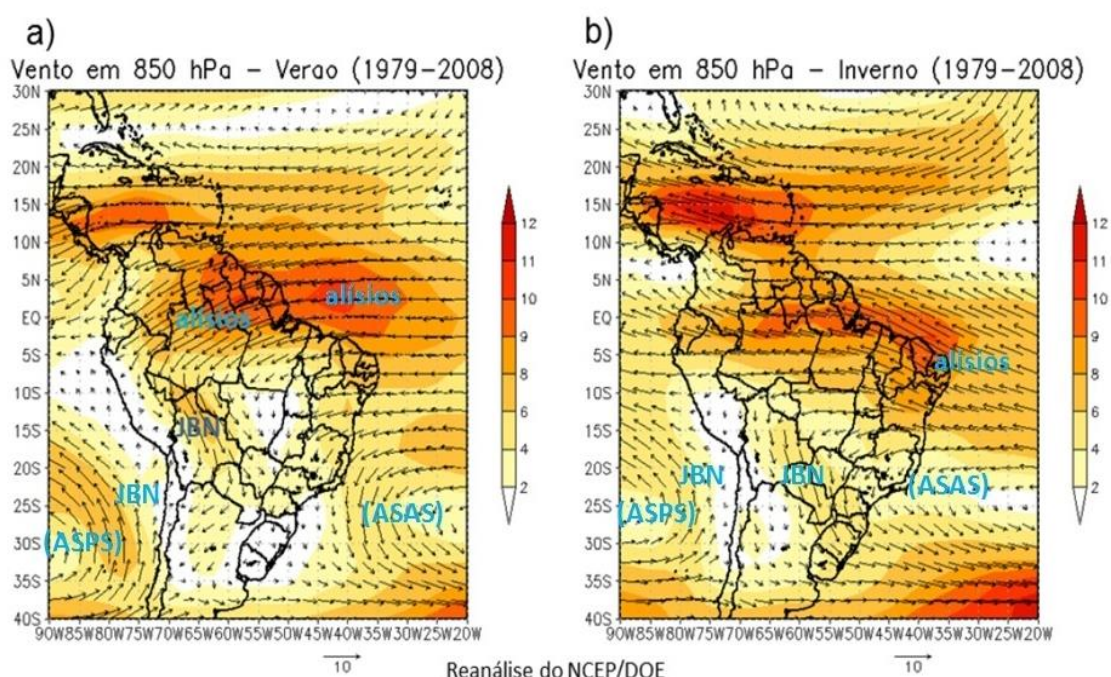


Figura 1 - Sistemas de circulação atmosférica de grande escala atuantes em baixos níveis (850 hPa) na AS no (a) verão e (b) inverno. A direção dos ventos é representada por setas e magnitude (m/s) (adaptado de REBOITA et al. 2012). A sigla JBNs se refere ao jato de baixos níveis a leste dos Andes, alísios aos ventos alísios, ASAS ao anticiclone subtropical do Atlântico Sul e ASPS ao anticiclone subtropical do Pacífico Sul.

A circulação de baixos níveis (até cerca de 850 hPa) exibe características diferenciadas entre o verão e inverno na AS. Os ventos alísios, que são ventos que ocorrem na região tropical do planeta em virtude da convergência dos ventos provenientes dos anticiclones subtropicais (por exemplo, ASAS e o anticiclone subtropical do Atlântico Norte não mostrado na **figura**), são mais intensos no Atlântico Tropical durante o verão adentrando a AS com direção nordeste (**figura 1a**). Já durante o inverno esses ventos são mais fracos, salvo a região em que este é influenciado pela aproximação do ASAS. Os ventos alísios de nordeste quando

adentram a Amazônia no verão carregam umidade e ao encontrarem a Cordilheira dos Andes adquirem uma componente meridional formando os jatos de baixos níveis a leste dos Andes (10° e 20° S; JBNs), que contribuem para a ocorrência de chuvas no sul e sudeste do Brasil (REBOITA et al., 2010). No verão, os JBNs a leste dos Andes (**Figura 1a**) está relacionado aos ventos alísios (REBOITA et al., 2010). No inverno é favorecido pelo escoamento do setor oeste do ASAS (**figura 1b**). Na AS também ocorrem JBNs a oeste dos Andes (GARREAUD; FALVEY, 2009), nesse caso, a origem dos ventos está associada com o ASPS.

Os anticiclones semi-estacionários são sistemas de alta pressão com circulação anti-horária no hemisfério sul (REBOITA et al., 2012). Esses sistemas localizam-se nas latitudes subtropicais dos Oceanos. Garreaud e Falvey (2008) apontaram que as mudanças na intensidade e posição do ASPS e as anomalias da pressão ao nível do mar, ao longo do ano, determinam a variabilidade dos ventos na costa oeste subtropical da AS. Ainda de acordo com esses autores, os ventos de sul que atingem a região são um ponto chave para o meio ambiente local, pois eles forçam a ressurgência de águas frias ricas em nutrientes, suportando assim um dos ecossistemas marinhos mais produtivos. Além disso, Reboita et al. (2010) mencionam que a variação da posição do ASPS faz com que no verão o centro sul do Chile e extremo oeste do centro sul da Argentina tenham mínimo de precipitação. Durante o inverno o ASPS (**figura 1b**) é localizado mais ao norte, por volta de 25° S, e os ventos de oeste ocasionados por este sistema atingem a Cordilheira dos Andes que os força a ascender por volta de 30° S de latitude favorecendo a precipitação na região.

As regiões sudeste, centro-oeste e parte do nordeste do Brasil são fortemente impactadas pela circulação do ASAS durante o inverno, pois nessa época o ASAS (**figura 1b**) é mais intenso e está deslocado para oeste, inibindo a convecção e a passagem de frentes frias em tais regiões e, portanto, a ocorrência de chuva (REBOITA et al., 2010; MARENGO et al., 2010). Já no verão (**figura 1a**), o ASAS está mais ao sul e a leste do que no inverno e acaba influenciando no transporte de umidade do Oceano Atlântico para o sudeste do Brasil.

2.2 ESTUDOS SOBRE SIMULAÇÕES CLIMÁTICAS REGIONAIS

Garreaud e Falvey (2009) analisaram os ventos em superfície na costa oeste subtropical da AS no final do século 21 em dois cenários do IPCC (A2 e B2), por meio de 15 modelos climáticos globais acoplados (GCMA) e do modelo regional PRECIS. Os dados observados pelo QuikScat, no presente (2000-2005), mostraram vento persistente de sul ao longo de todo o ano devido à influência do setor sudeste do ASPS na região (25° - 35°S). O centro do ASPS fica a cerca de 1000 km a oeste da costa da AS e os ventos da extremidade leste do ASPS forçam a ressurgência de águas frias ao longo da costa, o que contribui para a formação de uma intensa inversão de temperatura. A prevalência destes ventos diminui a passagem de sistemas de médias latitudes na região. Os JBNs aparecem diariamente como ventos de sul e são observados cerca de 60% do tempo durante o verão e primavera ao longo da costa. As características do campo de vento simuladas pelos GCMA no presente (1961-1990) indicam que os JBNs possuem localização similar aos observados no QuikScat, mas com menor intensidade. Já para o futuro, o GCMA simulara anomalias no ASPS como a intensificação dos ventos zonais nas latitudes subtropicais e dos JBNs. O modelo regional PRECIS para o presente (1961-1990) revelou, em concordância com os dados de observação, a estrutura do jato e no outono e no inverno um enfraquecimento desse sistema. Para o futuro (2071-2100), de modo consistente com o GCMA, o PRECIS indica intensificação do ASPS sobre o sudeste do Pacífico e um aumento dos ventos nas latitudes subtropicais e, em consequência, o tempo de duração e os eventos de JBNs aumentarão, implicando em aumento da área de ressurgência de águas frias. Nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março a direção e a intensidade dos JBNs são semelhantes a do presente.

Nuñeset al.(2009) analisaram projeções climáticas no sul da AS usando o modelo regional MM5. Nesta análise foram utilizados os cenários A2 e B2. Os autores verificaram que as mudanças na circulação de larga escala refletem mudanças na precipitação que variam substancialmente de estação para estação do ano. O aumento de precipitação que é detectado no verão e outono é causado, principalmente, pelo aumento do fluxo de umidade de norte associado com o fortalecimento da circulação ciclônica sobre o norte da Argentina e/ou extensão para sul das altas subtropicais (ASAS e ASPS).

Seth et al. (2010) estudaram as mudanças no ciclo anual da monção na AS projetadas por nove modelos do *Coupled Model Intercomparison Project version 3*, usando o cenário A2. As mudanças na circulação para o final do século 21 mostraram um deslocamento para

sul e expansão da parte polar do ASAS e um aumento de transporte de umidade para o sul da AS associado com a intensificação dos ventos a leste dos Andes durante a primavera. Logo, as mudanças dos JBNs e do ASAS podem provocar o aumento de chuvas no sul da AS. O ASAS durante o verão (fev e abr – 32°S) alcançará o extremo sul da AS e durante o inverno a sua região central estará em 25°S. Um fortalecimento de ventos provenientes da Amazônia está associado com o aumento da frequência do JBN a leste dos Andes.

Marengo et al. (2010) realizaram uma comparação entre três RCMs (Eta CCS, RegCM3 e o HadRM3P) para avaliar o clima no final do século 21 usando cenário A2. O HadRM3P mostrou intensificação e um deslocamento mais para sul do ASPS e um aumento da intensidade dos ventos na costa do Chile até 30°S, enquanto o Eta CCS (RegCM3) projetou um padrão de intensificação (enfraquecimento) durante verão (inverno). O RegCM3 simulou o ASAS mais intenso e deslocado para leste no inverno enquanto o ASPS, mais fraco durante todo o ano. Os modelos Eta CCS e RegCM3 também simularam o ASAS mais intenso no verão.

Krüger et al. (2012) utilizando o modelo RegCM3 investigaram mudanças na temperatura do ar, precipitação, circulação de baixos níveis e ciclogêneses no futuro (2071-2085) usando o cenário A2 e B2. Em geral, o modelo simulou bem a posição dos ventos e da precipitação, porém subestimou a intensidade dessas variáveis. No presente, os JBNs a leste dos Andes estão deslocados para sul no inverno e o ASAS abrange uma área menor no verão e também está deslocado para sul do inverno. A precipitação, no presente, durante o verão tem maior ocorrência no noroeste, sudeste e centro-oeste do Brasil, menor ocorrência no Paraguai e nordeste da Argentina, sendo que os lugares mais secos são nordeste do Brasil, centro norte do Chile e sudeste da Argentina. No inverno há menor precipitação na AS em parte da área central do sul do Brasil, na costa do nordeste e norte da Amazônia. Para o futuro, os autores verificaram um deslocamento do ASAS para sul no cenário A2. No verão há aumento de precipitação no Peru, oeste do Brasil, Uruguai, sul do Brasil e centro norte da Argentina, locais esses onde ocorre enfraquecimento dos ventos. No inverno há redução de precipitação no sul do Brasil, Paraguai e sobre o Oceano na costa leste do Brasil.

Marengo et al. (2012) utilizaram o modelo regional Eta CPTec para avaliar as projeções climáticas para a AS e para três grandes bacias hidrográficas no Brasil: Amazônia, São Francisco e Paraná. Para o futuro, no cenário A1B, fortes gradientes de pressão entre o continente e o Oceano estão associados ao forte aquecimento da área continental da AS em relação ao Oceano Atlântico Sul; sendo que os ventos em baixos níveis refletem estas

mudanças, levando há variações no transporte de umidade e precipitação. As projeções apresentaram enfraquecimento (fortalecimento) da circulação na região tropical (subtropical); na região subtropical as alterações são marcadas pela intensificação da baixa do Chaco e dos ASAS e ASPS, e ligada com ao enfraquecimento dos alísios está a mudança no transporte de umidade e chuva no Atlântico tropical. Dessa forma, é projetada redução de chuvas na Amazônia e nordeste do Brasil. Marengo et al. (2012) constataram ainda que todas as mudanças (precipitação, temperatura e circulação atmosférica) serão mais intensas depois de 2040 e, que além de mais intenso, o ASAS estará deslocado para nordeste por volta de 10°S – 20°S e avança ainda mais sobre o sudeste do Brasil.

Reboita et al. (2014) estudaram projeções climáticas no cenário A1B, para temperatura do ar e precipitação sobre a AS, usando o modelo regional RegCM3 aninhado a dois modelos climáticos globais: o ECHAM5 e o HadCM3. Para o futuro próximo (2010 - 2040) as duas simulações sugerem que há um enfraquecimento dos ventos alísios no Oceano Atlântico Tropical e que tal fato faz com que o norte da AS seja mais seco. O RegCM3 aninhado ao ECHAM5 mostra uma intensificação dos JBNs a leste dos Andes que está associado à intensificação dos alísios sobre a Amazônia. Essa característica implica num aumento de precipitação na parte central da AS. O ASAS é projetado de forma diferente nas duas simulações: o RegCM3 aninhado ao ECHAM5 projetou no verão (inverno) um fortalecimento (enfraquecimento) do ASAS, enquanto aninhado ao HadCM3, o contrário. Já para o futuro distante (2070-2100), o enfraquecimento dos alísios é ainda maior o que faz com que o norte da AS se torne ainda mais seco; os JBNs a leste dos Andes são mais intensos o que contribui para o aumento de precipitação na Bolívia e Paraguai. O ASAS é mais intenso no inverno apenas quando o RegCM3 é aninhado ao HadCM3 e os ventos a oeste do ASAS podem intensificar as chuvas no sul do Brasil.

Llopart et al. (2014) analisaram as mudanças climáticas projetadas pelo cenário RCP8.5, na precipitação sobre a AS focando as bacias da Amazônia e do Prata através do RegCM4 aninhado ao HadGEM2-ES, GFDL e MPI. Para o futuro (2070-2099), o enfraquecimento dos ventos alísios implica em anomalias negativas de precipitação na Amazônia e, em consequência, o fluxo de umidade diminui junto com o período de monção. Entretanto, há um aumento do fluxo de umidade de leste proveniente do Atlântico, o que aumenta a precipitação sobre a bacia do Prata.

2.3 ENERGIA EÓLICA

Além da importância dos ventos para o clima do planeta, estes podem ser usados para geração de energia elétrica - energia eólica. A disponibilidade de energia eólica não é constante ao longo do ano, pois esse recurso eólico apresenta variações temporais: variações anuais (em função de alterações climáticas, como por ocorrência de um episódio de El Niño que altera a circulação global), variações sazonais (em função das diferentes estações do ano), variações diárias (causadas por alteração nos sistemas de pressão, por exemplo, atuação de uma frente fria), variações horárias (brisa terrestre e marítima e aquecimento radiativo, por exemplo) e variações de curta duração (rajadas) (ROSSI et al., 2014). A variação espacial da energia eólica também é grande (**figuras 3, 4**). Além disso, há variação da intensidade do vento com o aumento da altura. Os ventos mais próximos da superfície são influenciados por topografia e rugosidade do solo, o que impacta a direção dos ventos e a redução da intensidade desses próximo da superfície.

De acordo Martins et al. (2008), há mais de 3000 anos a energia cinética dos ventos é utilizada como energia mecânica, todavia, nos últimos anos ocorreu uma aceleração tecnológica dos aerogeradores. A quantidade de energia gerada depende da velocidade do vento, do diâmetro do rotor e do rendimento de todo o sistema (MARTINS et al., 2008, ROSSI et al., 2014). No Brasil, o número de usinas para geração de energia eólica também tem aumentado. Em 2009 eram apenas 44 usinas instaladas, enquanto na atualidade são 265 usinas espalhadas pelo país com capacidade de gerar 6,46 GW (ANEEL, 2015).

Nos dias atuais, os aerogeradores têm sido instalados em alturas de 80 e 100 metros ou até em alturas maiores. Estas alturas, principalmente a de 100 metros, são compatíveis com os avanços tecnológicos dos aerogeradores (ATLAS EÓLICO, 2013; ATLAS EÓLICO, 2014). Quanto mais distante da superfície menor é a influência da rugosidade na intensidade do vento. Também é interessante mencionar que quanto maior a dimensão de um aerogerador, maior é a potência de energia por ele gerada (**figura 02**).

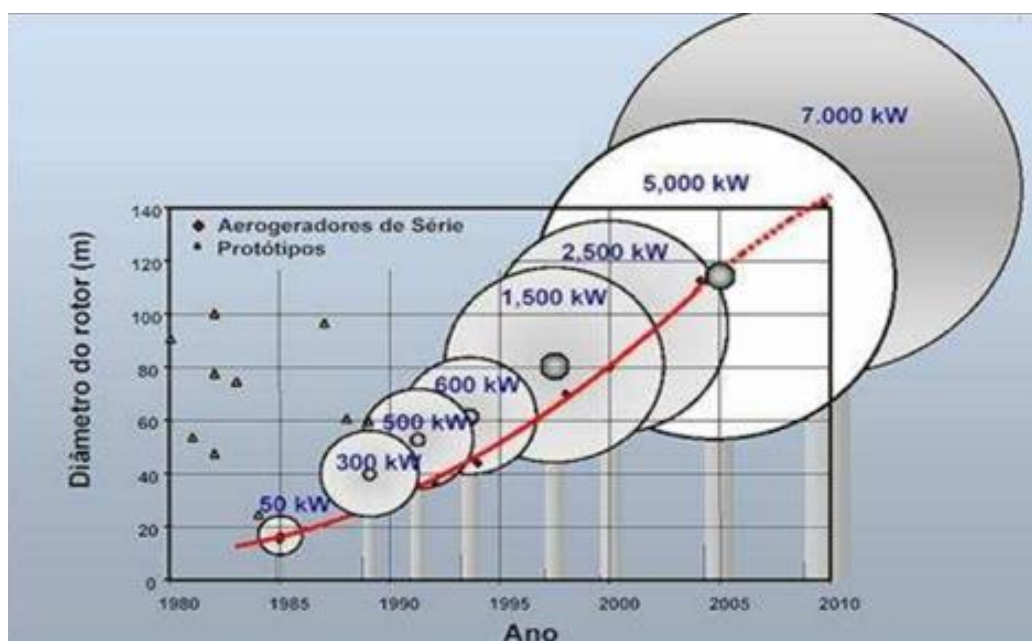


Figura 2 - Potência do gerador em Função do Diâmetro do Rotor

Fonte: MOLLY (2006)

Como um dos objetivos do presente estudo consiste na análise dos ventos a 100 metros, a **Tabela 1**, adaptada de Elliot et al. (1986), que é usada como indicativo se um determinado local é propício ou não para a instalação de aerogeradores, mostra a classificação da intensidade do vento e da densidade de potência (DP). Na versão original da tabela é apresentada apenas a intensidade do vento e a densidade de potência em 10 e 50 metros de altura e considerando uma equação adaptada para a obtenção da densidade de potência (mais detalhes em Cliff, 1997; Elliot et al., 1986 e Grubb e Meyer, 1993). Para tornar a tabela mais informativa, a intensidade do vento também foi extrapolada para 100 metros (expressão 1 na seção 3.3; a mesma usada por Elliot et al., 1986). Além disso, inclui-se na tabela a densidade de potência calculada com a expressão de Elliot et al. (1986) (equação 9 que leva em consideração a frequência de velocidade adota a distribuição Rayleigh, seção 3.4) e com a expressão mostrada por Custódio (2009) (equação 7, seção 3.4). Para o caso dos ventos a 100 m de altura, se esses apresentarem as características da classe 3 (**Tabela 1**), significa que o local é propício à instalação de aerogerador.

Tabela 1 - Classes de densidade de potência eólica em 10 m, 50 m e 100 m adaptado de Elliott et al. 1986. Para o cálculo da densidade do ar foi considerado a temperatura de 15 graus. Na tabela Eq. indica o número da equação utilizada. Ver mais detalhes no texto.

Energia Eólica Classe	10 m			50 m			100 m		
	VV (ms ⁻¹)	DP (Wm ⁻²)	DP (Wm ⁻²)	VV (ms ⁻¹)	DP (Wm ⁻²)	DP (Wm ⁻²)	VV (ms ⁻¹)	DP (Wm ⁻²)	DP (Wm ⁻²)
	Eq. 1	Eq. 9	Eq. 7	Eq. 1	Eq. 9	Eq. 7	Eq. 1	Eq. 9	Eq. 7
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,4	100	52	5,6	200	107	6,2	276	145
2	5,1	150	81	6,4	300	160	7,0	399	209
	5,6	200	108	7	400	209	7,7	531	278
3	6	250	132	7,5	500	258	8,3	665	348
	6,4	300	161	8	600	313	8,8	794	414
4	7	400	210	8,8	800	416	9,7	1060	555
	9,4	1000	509	11,9	2000	1029	13,14	2640	1380

A intensidade de vento pode ser medida em diferentes alturas diretamente com o uso de anemômetros, mas nem sempre se tem este instrumento à disposição. Assim, há métodos matemáticos para estimar a velocidade do vento em diferentes alturas. De acordo com Custódio (2009), o comportamento vertical da velocidade do vento até a camada limite planetária pode ser representado por uma função logarítmica ou por uma exponencial. Estas funções foram desenvolvidas por Hellman em 1915, sendo que, o método logaritmo é o mais usado entre os estudos científicos. Mais detalhes sobre o método logarítmico será fornecido no item Metodologia (seção 3.3).

Três dos estudos que utilizaram a lei logarítmica foram o de Schumann (2014) que analisou a região do entorno do reservatório da Usina Hidroelétrica de Estreito como estudo de caso e elaborou um procedimento para avaliação do potencial eólico; o de Lima, Cavalcante e Souza (2010), que fez uma avaliação do potencial eólico em

cinco regiões do estado do Paraíba e o de Archer e Jacobson (2005) descrito na sequência.

Archer e Jacobson (2005) estudaram os ventos em todos os continentes e fizeram a extrapolação de 10 para 80 metros de altura. Esses autores constataram que, aproximadamente, 13% das estações estudadas apresentam, em média anual, velocidade do vento igual ou maior do que $6,9 \text{ m s}^{-1}$ a 80 metros. Esta velocidade é considerada classe 3, ou seja, classe mínima a ser adotada para um baixo custo para geração de energia eólica nesta altura. Os mesmos autores consideraram ainda que apenas a parte sul e um ponto no nordeste da AS tem potencial para a geração de energia eólica e que as demais regiões estão classificadas como classe 2, no entanto, relatam que os poucos dados analisados podem ter mascarado os resultados.

Embora Archer e Jacobson (2005) tenham mostrado apenas um ponto no nordeste do Brasil com ventos $\geq 6,9 \text{ m s}^{-1}$, o atlas do potencial eólico anual do Brasil mostrou que os ventos a 50 m de altura possuem intensidade superior a 7 m s^{-1} em mais pontos. Entretanto, ressalta-se que esse atlas foi elaborado com base em simulação numérica (AMARANTE; ZACK; SÁ, 2001; ATLAS EÓLICO, 2014). As regiões sul, sudeste e nordeste são as que se destacam em relação às outras áreas por ter um alto potencial eólico (**figura 3**). Os parques eólicos no Brasil se encontram nestas regiões, estando a maioria no nordeste, como o Complexo Eólico Alto Sertão I (no semi-árido baiano), a Usina de Energia Eólica de Praia Formosa (Camocim - Ceará), o Parque Eólico Eco Energy, instalado na cidade de Beberibe (Ceará).

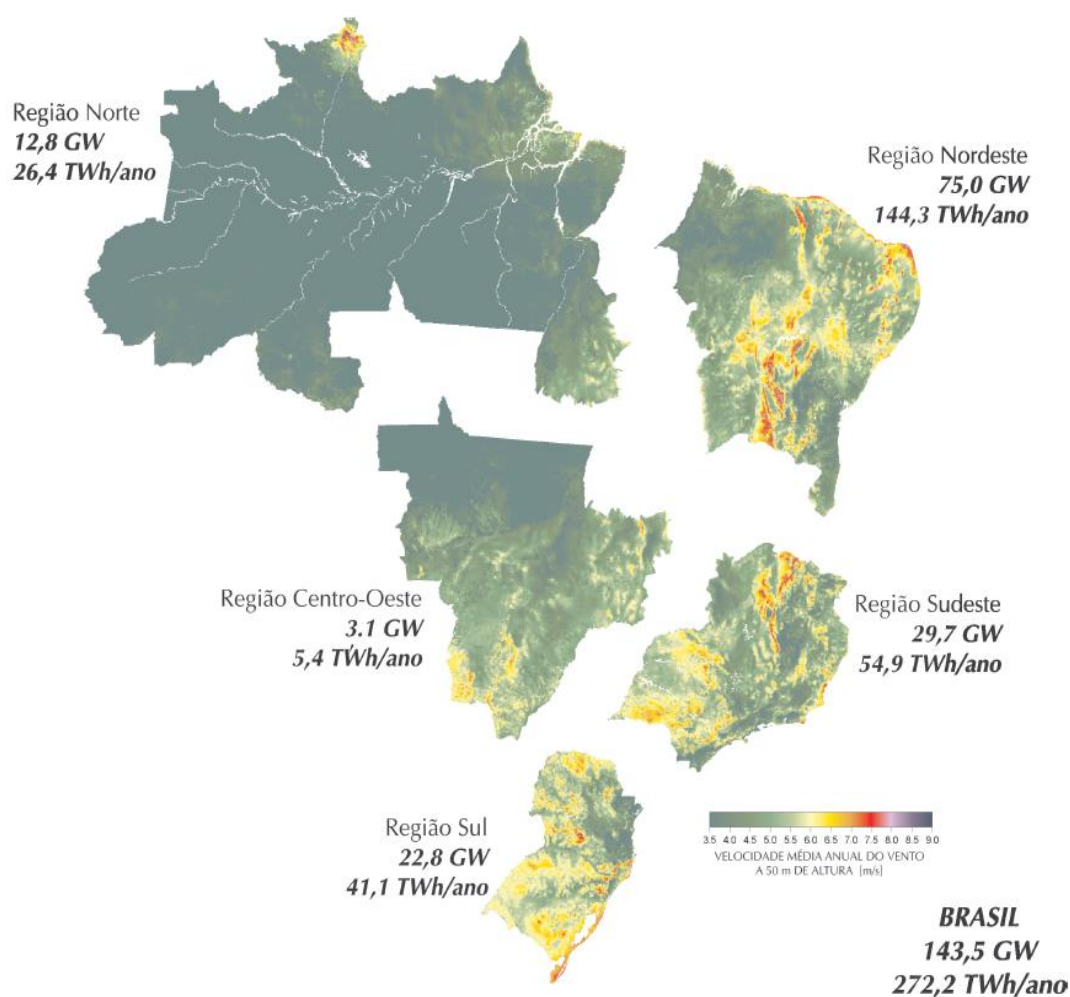


Figura 3 - Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a $7,0 \text{ m s}^{-1}$. Os tons verdes representam velocidades médias entre $3,5$ a $\pm 5,5 \text{ m s}^{-1}$, os amarelos entre $\pm 5,5$ a $\pm 7 \text{ m s}^{-1}$, tons vermelhos entre ± 7 e 8 m s^{-1} e os tons roxos valores acima de 8 m s^{-1}

Fonte: AMARANTE; ZACK; SÁ, 2001

De forma semelhante à **figura 3**, a **figura 4**, elaborada por Feitosa et al. (2003), mostra as regiões nordeste, sul e sudeste como propícias para a energia eólica. Tais autores, além de mostrarem o vento médio anual a 50 metros, indicam as velocidades em cinco condições topográficas, mata, campo aberto, zona costeira, morros e montanhas. As cores da **figura 4** representam classes de vento, sendo que a classe 4, em azul e preto, corresponde a áreas com potencial eólico e regiões de classe 1, em dois tons de verde claro, corresponde a áreas sem potencial algum.



Velocidade média do vento (m/s) 50 m acima do nível da superfície					
	Mata	Campo Aberto	Zona Costeira	Morro	Montanha
4	> 6,0	> 7,0	> 8,0	> 9,0	> 11,0
3	4,5 - 6,0	6,0 - 7,0	6,0 - 7,0	7,5 - 9,0	8,5 - 11,0
2	3,0 - 4,5	4,5 - 6,0	4,5 - 6,0	6,0 - 7,5	7,0 - 8,5
1	< 3,0	< 4,5	< 4,5	< 6,0	< 7,0

NOTAS:
Mata indica áreas de vegetação nativa, com arbustos e árvores altas.
Campo aberto refere-se a áreas planas de pastagens, plantações e/ou vegetação baixa, sem muitas árvores altas.
Zonas costeiras são áreas de praia, normalmente com larga faixa de areia, onde o vento incide predominantemente no sentido mar-terra.
Morros são áreas de relevo levemente ondulado, relativamente complexo e de pouca vegetação ou pasto.
Montanhas representam áreas de relevo complexo com altas montanhas. O potencial eólico é dado para locais nos topos das montanhas em condições favoráveis para o fluxo de vento.

Figura 4 - Mapa da velocidade média anual do vento a 50m de altura
Fonte: FEITOSA, et al., 2003

A **figura 5** mostra os mapas sazonais da média da intensidade do vento no Brasil. É possível verificar que o inverno e a primavera austral no nordeste, sudeste, sul e parte do centro-oeste são os períodos em que os ventos possuem maior intensidade. O setor noroeste do Brasil é o que não apresenta potencial eólico em nenhuma estação, com exceção do norte de Roraima que apresenta um alto potencial no verão, outono e primavera.

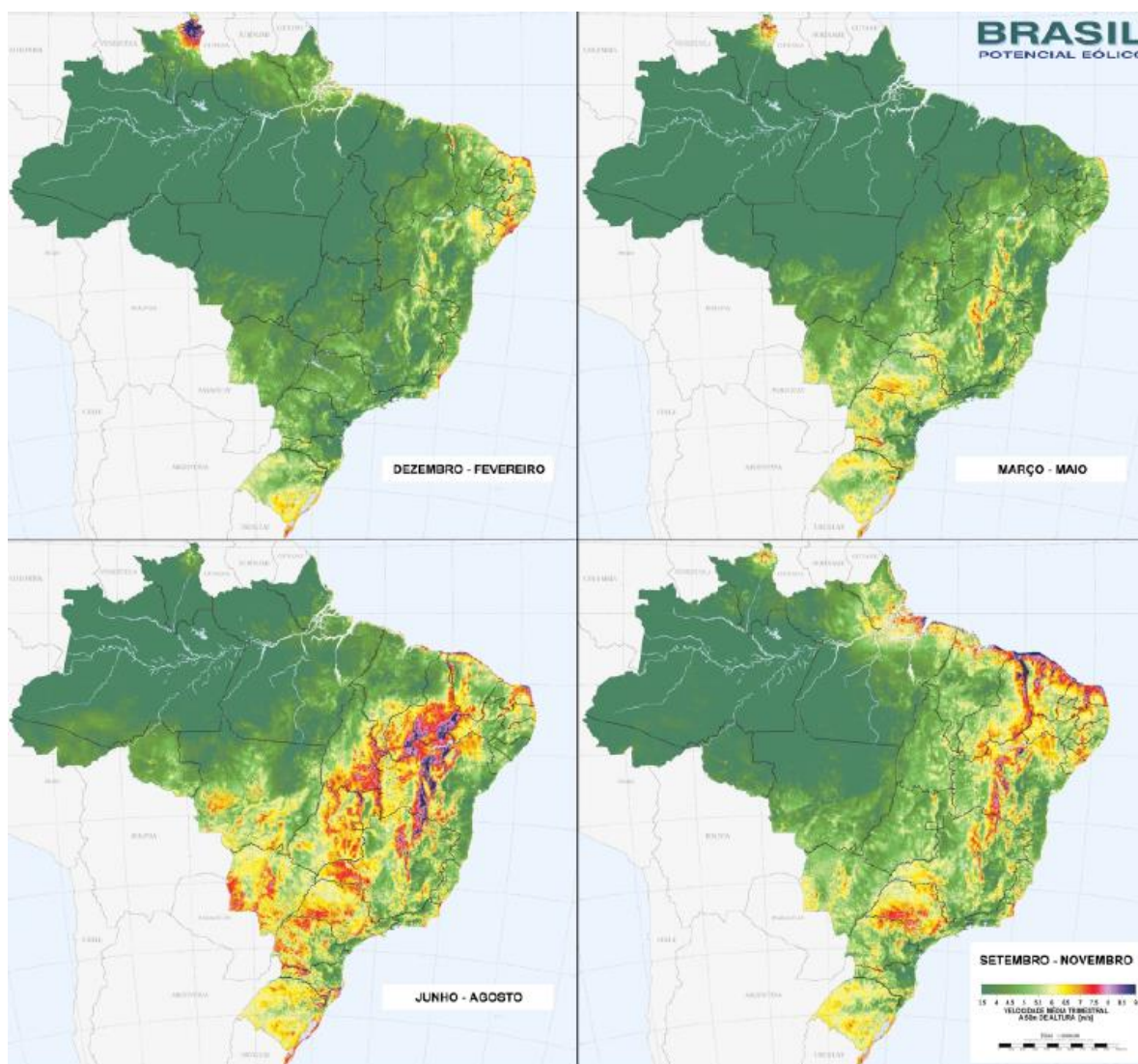


Figura 5 - Velocidades médias trimestrais altura de 50 metros. Os tons verdes representam velocidades médias entre $3,5$ à $\pm 5,5 \text{ m s}^{-1}$, os amarelos entre $\pm 5,5$ a $\pm 7 \text{ m s}^{-1}$, tons vermelhos entre ± 7 e 8 m s^{-1} e os tons roxos valores acima de 8 m s^{-1}

Fonte: AMARANTE; ZACK; SÁ, 2001

Pereira et al. (2012) estudaram o impacto das mudanças climáticas globais na densidade de energia eólica no Brasil, usando o modelo Eta e o cenário A1B. Foi obtido para o futuro (2070 – 2100) um aumento da densidade de energia eólica por volta de 15 a 30 % para grande parte do nordeste com alguns pontos do norte desta região ultrapassando 100%, principalmente no outono. Já ao longo da costa na maior parte do ano há decréscimo da densidade. Para a região sul a tendência de crescimento indicada pelo modelo é de $\sim 10\%$, com picos de 20% em algumas áreas. Entretanto, o verão desta região é marcado pelo decréscimo da densidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MODELOS

3.1.1 RegCM4

O *Regional Climate Model* (RegCM) foi desenvolvido pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) e agora é mantido pelo *Earth System Physics* (ESP) do *International Centre for Theoretical Physics* (ICTP), sendo que sua última versão é o RegCM4 (GIORDI; MARINUCCI; BATES, 1993). O RegCM4 é um modelo de área limitada, hidrostático, que resolve as equações para uma atmosfera compressível e em coordenada vertical sigma-pressão. O modelo usa a grade B de Arakawa-Lamb (GIORGI et al., 2012) para calcular as equações.

3.1.2 HadGEM2 –ES

Neste estudo, a simulação do modelo global HadGEM2–ES é utilizada como condição de fronteira do RegCM4. O HadGEM2-ES é um modelo climático global acoplado de interação Oceano-atmosfera com resolução espacial N96 (1.875° x 1.25°) e com 38 níveis verticais. Este modelo também inclui a interação entre o ciclo de carbono na superfície e no Oceano e dinâmicas da vegetação com uma opção de prescrever tanto as concentrações atmosféricas de CO₂ como as emissões antropogênicas de CO₂ (JONES et al., 2011).

3.1.3 Características das simulações com o RegCM4

O RegCM4 foi executado no domínio do projeto *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX, DA ROCHA et al., 2012), que cobre a AS e parte dos Oceanos adjacentes, com resolução horizontal de 50 km e 18 níveis sigma-pressão (**figura 6**). Na simulação foi usado o esquema de parametrização cumulus Mixed: Grell sobre o continente e Emanuel sobre o Oceano e o esquema de interação solo-atmosfera de *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme*(BATS). As simulações foram realizadas para dois cenários: o RCP 4.5 e RCP 8.5 (da ROCHA et al., 2014; LLOPART et al., 2014). No presente estudo são avaliados três períodos: o presente representado pelo anos de 1979 – 2005, o futuro próximo (*Near Future*) representado pelos anos de 2020 – 2050 e o futuro distante (*Far Future*) representado pelos anos 2070 – 2098. A

simulação do clima presente é validada com dados da reanálise ERA-Interim (DEE et al., 2011). Já as simulações do futuro são comparadas com a do presente.

Foram criados mapas mensais e sazonais do vento para cada conjunto de dados no presente, futuro próximo e futuro distante o vento nas alturas de 10 e 100 metros (seção 4.1 e 4.2).

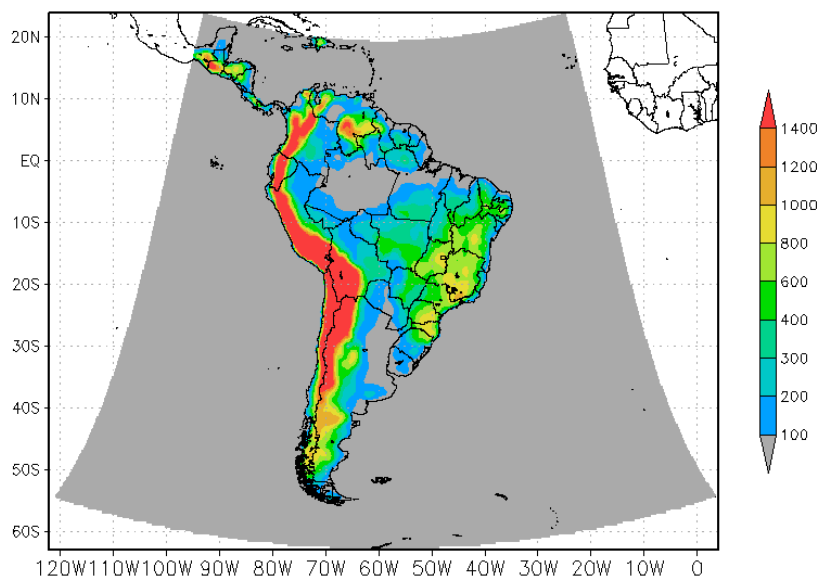


Figura 6 - Área do domínio do CORDEX. A cor indica a topografia (m).

3.2 DADOS DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

Foram escolhidas 3 estações meteorológicas com anemômetros a 10 metros de altura por região brasileira pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), consistindo num total de 15 estações, para validar a simulação no presente (1979 a 2005). Além disso, tais dados ainda são comparados com os da ERA-Interim. É mostrado na **Tabela 2** o nome, posição geográfica e altitude das estações selecionadas, já na **figura 7** mostra a distribuição espacial das estações meteorológicas.

Tabela2 - Características das estações meteorológicas

	Nome	Posição Geográfica		Altitude (m)
		Latitude (°)	Longitude (°)	
Sul	Santa Vitória do Patamar - RS	-33,51	-53,35	24,01
	Porto Alegre - RS	-30,05	-51,16	46,97
	Florianópolis - PN	-27,58	-48,56	1,84
Sudeste	Rio de Janeiro - RJ	-22,88	-43,18	11,10
	São Carlos – SP	-21,96	-47,86	856,00
	Belo Horizonte - MG	-19,93	-43,93	915,00
Norte	Barcelos – AM	-0,96	-62,91	40,00
	Eirunepe – AM	-6,66	-69,86	104,00
	Itaituba – PA	-4,28	-56	45,00
Nordeste	Barra da Corda	-5,5	-45,23	153,00
	Cruzeta	-6,43	-36,58	226,46
	Recife Curado - PE	-8,05	-34,95	-10,00
Centro-Oeste	Diamantino - MT	-14,4	-56,45	286,30
	Goiania – GO	-16,66	-49,25	741,48
	Matupa – MT	-10,25	-54,91	285,00

**Figura 7-** Distribuição dos pontos analisados baseada na escolha de estações meteorológicas do INMET espalhadas pelo Brasil

3.3 EXTRAPOLAÇÃO DO VENTO DE 10 PARA 100 METROS

Existem diferentes expressões para a extrapolação vertical do vento, a empregada na **Tabela 1**, adaptada de Elliot et al. (1986), é:

$$U(Z) = U(Z_r) \left(\frac{Z}{Z_r} \right)^{1/7} \quad (\text{m s}^{-1}) \quad (1)$$

onde $U(Z)$ representa a velocidade do vento na altura desejada, $U(Z_r)$ a velocidade do vento medida ao nível da estação meteorológica (altura de referência), Z a altura desejada e Z_r a altura da estação em relação ao solo. O expoente $1/7$ é um coeficiente empiricamente derivado aplicado para condições de estabilidade neutra da atmosfera (ELLIOTT et al., 1986).

Entretanto os trabalhos atuais têm empregado a expressão logarítmica. Esta expressão é também empregada no presente estudo (CUSTÓDIO, 2009):

$$U(Z) = U(Z_r) \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_r}{Z_0}\right)} \quad (\text{m s}^{-1}) \quad (2)$$

onde $U(Z)$ representa a velocidade do vento na altura desejada, $U(Z_r)$ a velocidade do vento medida ao nível da estação meteorológica (altura de referência), Z_0 a rugosidade da superfície, Z a altura desejada e Z_r a altura da estação em relação ao solo.

Para a criação dos mapas de intensidade do vento a 100 m de altura empregou-se a equação 2 usando dados a 10 metros de altura da ERA-Interim e do RegCM4. Esta equação pode ser aplicada quando a atmosfera apresenta condições de neutralidade. Bezerra et al. (2013) verificaram que no nordeste do Brasil em 95% dos casos analisados há essa situação. Como essa é uma das regiões de interesse do presente estudo e como o mesmo é climático, torna-se consistente o uso da equação. A altura de 100 metros usada no presente estudo justifica-se por ser a altura média em que se encontram os aerogeradores na atualidade.

Para obter o comprimento de rugosidade da superfície (Z_0) foi utilizada a **Tabela** disponibilizada no RegCM4, **tabela 3**, que relaciona a cobertura de solo/vegetação e os valores de comprimento de rugosidade.

Tabela 3 - Valores da rugosidade de superfície do RegCM4 para vários tipos de terrenos (Valores usados com o esquema BATS)

Cobertura da Terra / Vegetação	Comprimento de rugosidade (m)
1. Produção agrícola/culturas variadas	0,08
2. Forrações/vegetação rasteira	0,05
3. Florestas coníferas sempre verdes	1,0
4. Florestas coníferas decíduas	1,0
5. Floresta tropicais sempre verdes	0,8
6. Florestas tropicais decíduas	2,0
7. Vegetação herbácea	0,1
8. Deserto	0,05
9. Tundra: planície das regiões árticas	0,04
10. Cultivo irrigado	0,06
11. Área semi-desértica	0,1
12. Cobertura de gelo/geleira	0,01
13. Brejo ou pântano	0,03
14. Corpos d'água	0,0004
15. Oceano	0,0004
16. Arbusto sempre verde	0,1
17. Arbusto decíduo	0,1
18. Floresta mista	0,8
19. Floresta/mosaico com campo	0,3
20. Área alagada	0,3

3.4 DENSIDADE DE POTÊNCIA

Segundo Custódio (2009), a potência é definida como sendo a derivada da energia por tempo, e a energia é definida pela equação:

$$E = \frac{m v^2}{2} \quad [\text{J}] \quad (3)$$

onde m é a massa de ar (kg) e v é a velocidade do vento (m s^{-1}). Portanto, a potência é definida como:

$$P = \dot{E} = \frac{dE}{dt} = \frac{\dot{m} v^2}{2} \quad [\text{W}] \quad (4)$$

onde E é a energia cinética do vento (J), $\dot{E}$ é o fluxo de energia (J s^{-1}), t é o tempo (s), $\dot{m}$ é o fluxo de massa de ar (kg s^{-1}). O fluxo da massa mostra quanto de ar em massa passa por tempo, sendo definido pela equação:

$$\dot{m} = \rho A v [\text{kg s}^{-1}] \quad (5)$$

onde ρ a massa específica do ar (kg/m^3), A é a área de seção transversal (m^2). Substituindo a equação (5) na equação (4) tem-se:

$$P = \frac{\rho A v^3}{2} [\text{W}] \quad (6)$$

Como a densidade de potência (equação 7) é definida como sendo potência dividida por área (MANWELL, MCGOWAN E ROGERS, 2002 e CUSTÓDIO, 2009) tem-se:

$$\frac{P}{A} = DP = \frac{1}{2} \rho v^3 [\text{W m}^{-2}] \quad (7)$$

onde v é a velocidade do vento (m) e ρ a massa específica do ar (kg/m^3) no local e na altura de interesse.

Como é possível observar na equação (7) para o cálculo da densidade de potência é preciso conhecer a densidade do ar e, essa pode ser aproximada pela expressão (CUSTÓDIO, 2009).

$$\rho \cong \frac{353,4 \left(1 - \frac{z}{45271}\right)^{5,2624}}{273,15 + T} \quad [\text{kg m}^{-3}] \quad (8)$$

onde z é a altitude do local (m) e T é a temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$).

Para definição da temperatura a 100 metros, fez-se uma aproximação considerando a taxa de variação vertical adiabática seca da atmosfera, em que a temperatura do ar decresce 1°C a cada 100 m (WALLACE E HOBBS, 2006). Já para definir z , somou-se a altitude local a altura de 100 m.

Para o cálculo da densidade de potência da terceira coluna da **Tabela 1**, foram utilizadas as expressões 8 e 7. Já na segunda coluna da **Tabela 1**, a densidade de potência calculada por Elliot et al. (1986), utilizou a expressão:

$$DP = 0,955 \rho v^3 [\text{W m}^{-2}] \quad (9)$$

Esta expressão é estimada considerando que a distribuição de frequência de velocidade adota a distribuição Rayleigh (mais detalhes em Cliff, 1977).

Para a análise da densidade de potência foram criados, utilizando a expressão (7), mapas sazonais para cada conjunto de dados do futuro próximo e distante subtraído do presente, para a altura de 100 metros e cenários RCP4.5 e RCP8.5 (seção 4.3.1).

Como as regiões nordeste e sul do Brasil são as que apresentam grande potencial para geração de energia eólica (como visto nas **figuras 3, 4**), além dos mapas sazonais, foram selecionados dois pontos de grade do modelo (**figura 8**): um ponto na localidade de um parque eólico na Paraíba, latitude $06^{\circ} 36' 03'' \text{ S}$ e longitude $35^{\circ} 03' 03'' \text{ O}$ e outro na localidade de um parque eólico no Rio Grande do Sul, latitude $32^{\circ} 13' 46'' \text{ S}$ e longitude $52^{\circ} 12' 41'' \text{ O}$, para o cálculo da densidade de potência a 100 metros. Com isso, é possível verificar mais detalhadamente a densidade de potência em cenários futuros.



Figura 8 - Localização dos pontos de estudo de densidade de potência.
 Fonte: Google Earth (2014)

Para os pontos de grade na Paraíba e no Rio Grande do Norte foram calculadas as tendências sazonais e verificaram-se os resultados para saber se estes são estatisticamente significativos. Para isso foi utilizado o teste não- paramétrico de Man-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975):

$$s = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sin}al(x_i - x_j)$$

onde x_j é a sequência de valores dos dados estimados e n são os elementos da série temporal.

Sendo assim quando:

$$\text{sin}al(x) = \begin{cases} +1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

logo, quando (x) é maior que zero a tendência será positiva e significativa, quando menor que zero é negativa e significativa e quando igual a zero é não é significativa.

Mais detalhes sobre o teste não-paramétrico de Man-Kendell em Mann (1945), Kendall (1975) ou em Hipel e McLeod (1994).

3.5 ANÁLISE DE COMPLEMENTARIDADE: VENTO X PRECIPITAÇÃO

A complementaridade eólica ocorre quando a energia eólica pode ser usada a fim de auxiliar na energia gerada por outras fontes. Torna-se, então, uma fonte de energia de apoio ou permanente, em determinadas épocas, que pode fazer uma conexão com o principal sistema de geração de energia no Brasil, as hidroelétricas.

O uso desta complementaridade é de grande importância para a gestão de energia, pois enquanto há geração de energia eólica há uma redução da atividade dos geradores hidrelétricos, possibilitando que os reservatórios ainda permaneçam com bons níveis de água mesmo em períodos de condições de clima mais seco (ASSIREU; PIMENTA; SOUZA, 2011)

No presente estudo é realizada uma análise em que a intensidade do vento é comparada com a precipitação. Busca-se identificar áreas em que numa dada estação do ano a intensidade do vento seja fraca, mas que haja precipitação e vice-versa.

Neste contexto foram gerados mapas de precipitação no presente (1979 – 2005) e futuro distante (2070 – 2198) no cenário RCP8.5 para verão e inverno e estes foram comparados com os dados de intensidade do vento para o mesmo período. Os dados de precipitação utilizados são também do modelo RegCM4 dirigido pelo HadGEM2-ES sobre o domínio CORDEX na AS. Um estudo detalhado dessa variável é apresentado em Llopart et al. (2014).

4 RESULTADOS

4.1 PRESENTE

4.1.1 Ventos a 10 m

Aqui é apresentada a climatologia sazonal da circulação atmosférica do presente (1979 – 2005; **Figura 09**) sobre a AS, com dados da ERA-Interim e simulada pelo RegCM4, a 10 metros de altura. As principais diferenças entre estes dois conjuntos de dados são ressaltadas.

Embora a nomenclatura de JBNs seja utilizada para os níveis entre 700 – 850 hPa, nesse estudo para facilidade da descrição dos resultados os ventos intensos a leste e oeste dos Andes serão denominados JBNs.

Os ventos na ERA-Interim (**figura 9a, b, c, d**) mostram que a oeste da AS, o ASPS está mais ao sul (norte) e intenso (enfraquecido) durante o verão (inverno), como também discutido em com Garreaud e Falvey (2009) e Reboita et al. (2010). A leste da AS, tem-se a presença do ASAS, que de forma semelhante ao ASPS se apresenta posicionado mais ao sul no verão e mais a norte no inverno. Além disso, está posicionado distante do continente durante o verão e mais próximo (atingindo o sul e sudeste do Brasil) durante o inverno. Este último aspecto contribui com a inibição dos movimentos ascendentes e dificulta a passagem de sistemas meteorológicos que transportam umidade para o sudeste do Brasil (REBOITA et al., 2010).

Ainda com relação à reanálise ERA-Interim (**figura 9a, b, c, d**), os ventos alísios adentram o continente com direção leste e nordeste durante o verão e primavera, e com direção de sudeste durante o inverno e primavera. No inverno e primavera, tais ventos são altamente influenciados pelo setor norte do ASAS (concordando com Reboita et al. 2010) e adentram o continente carregando umidade. Já os JBNs que ocorrem a leste da Cordilheira dos Andes direcionam-se do Acre para o norte da Argentina no verão, e sobre o sul do Peru, Bolívia e Argentina no inverno.

As diferenças entre o RegCM4 e a ERA-Interim podem ser vistas na **figura 9** (i, j, l, m): o ASPS é mais intenso na simulação durante o inverno, e o setor norte deste sistema no verão. Já na primavera o ASPS é mais fraco na simulação, com exceção do setor nordeste, e no outono poucas diferenças ocorrem. Com relação ao ASAS, este sistema está mais intenso em todas as estações do ano na simulação, especialmente, nos setores norte, oeste e sudoeste do sistema. A menor diferença do ASAS em relação à

reanálise ocorre no inverno, exceto no setor sudoeste do sistema que é mais intenso em 3 m s^{-1} .

O RegCM4 simula os ventos alísios mais intensos do que a ERA-Interim entre o equador e 10°N no verão e no Oceano Atlântico no outono. Porém, no norte e nordeste do continente os ventos alísios são mais fracos. Os JBNs se mostram mais intensos no RegCM4 tanto a leste quanto a oeste dos Andes. A oeste eles são mais intensos no inverno e a leste no verão e inverno.

As diferenças na intensidade do vento entre o RegCM4 e a Era-Interim sobre a maior parte do continente estão entre -1 a 1 m s^{-1} . Já as diferenças mais evidentes, $\pm 3 \text{ m s}^{-1}$, ocorrem a oeste e a leste dos Andes em todas as estações, no setor leste da Argentina, sul do Brasil sobre o Oceano Atlântico (principalmente durante o inverno) e na região norte da AS (também mais forte no inverno).

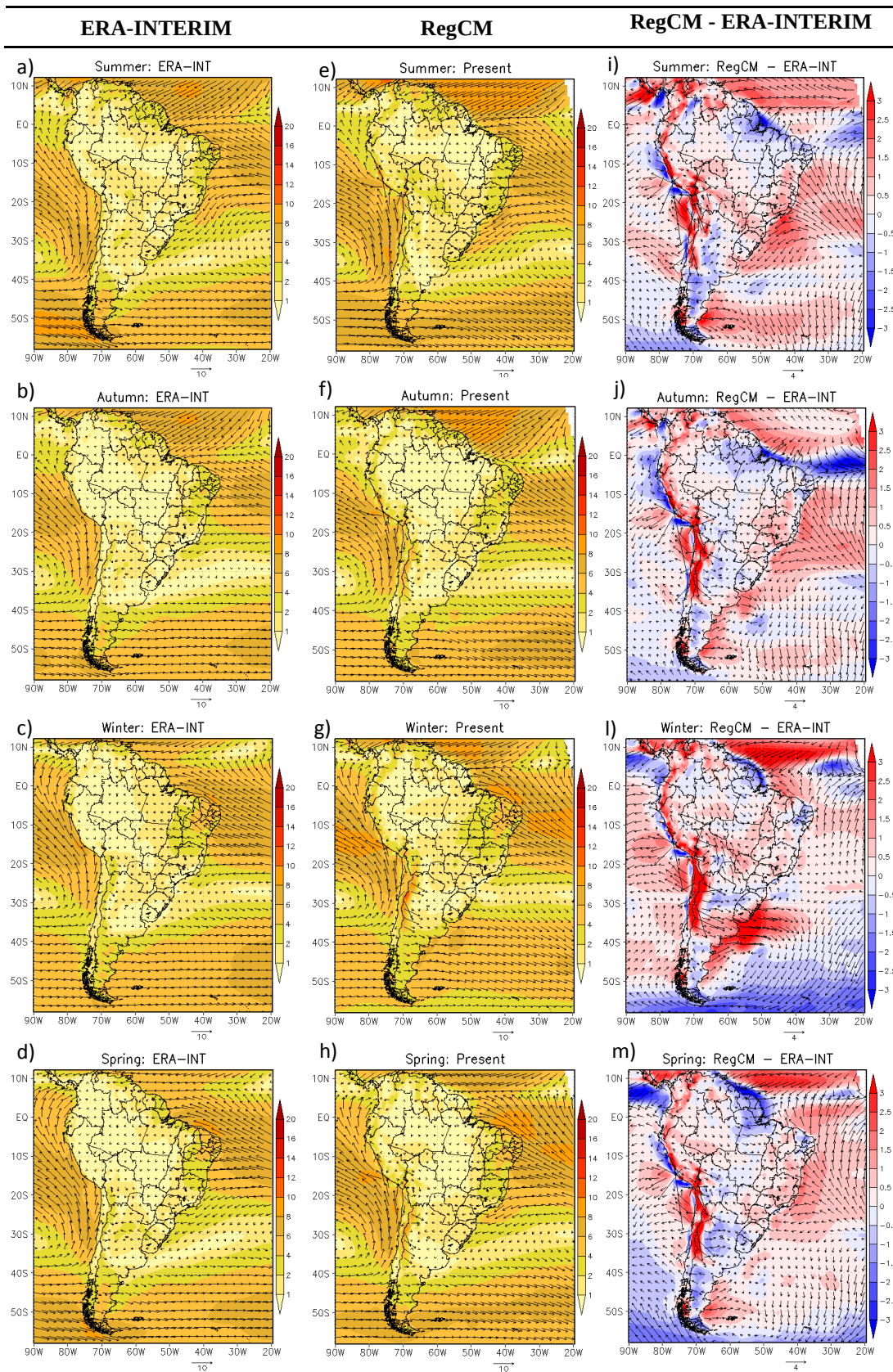


Figura 9 - Climatologia sazonal do vento no presente (1979 -2005) da circulação atmosférica na América do Sul obtida a 10 metros de altura da ERA-Interim (a, b, c, d), RegCM4 (e, f, g, h) e a diferenças (i, j, l, m) entre estes. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude

4.1.1.1 Ventos em diferentes locais do Brasil

Neste item são realizadas comparações entre os ventos medidos em estações meteorológicas convencionais do INMET, dados da reanálise ERA-Interim e da simulação do RegCM4, a fim de verificar a similaridade entre eles.

Das 15 estações meteorológicas analisadas, cinco delas apresentam velocidades mais intensas que o modelo e ERA-Interim. As regiões norte, nordeste e centro-oeste são as regiões onde o RegCM4 mais se aproxima dos dois outros conjuntos de dados.

No centro-oeste do Brasil (**figura 10**), os valores da intensidade do vento são baixos e próximos entre os três conjuntos de dados. O ciclo anual também é próximo entre eles, exceto no inverno (**figura 10a e b**) em que o INMET é menos intenso do que os outros conjuntos.

A **figura 11**, com dados do nordeste, exibe valores médios de intensidade do vento e do ciclo anual próximos nos três conjuntos em cada uma das estações analisadas. No Rio Grande do Norte (**figura 11**), os valores são mais intensos em comparação com Pernambuco e Maranhão (**figura 11 a e c**) respectivamente. Os valores apresentados na **figura 11** são similares aos encontrados por Amarante, Zack e Sá (2001), os quais mostram que o nordeste é uma região propícia à produção de energia eólica. E Archer e Jacobson (2005) mencionam que as áreas costeiras são as que apresentam, normalmente, as maiores intensidades do vento.

Na região norte (**figura 12**) são encontrados baixos valores de intensidade do vento, menos de 2 m s^{-1} em Itaituba e Eirunepé. Em Barcelos apresenta valores abaixo de 2 m s^{-1} para os dados da ERA-Interim e do RegCM, enquanto os dados do INMET os valores estão entre 2 e 4 m s^{-1} .

As cidades de Belo Horizonte, São Carlos e Rio de Janeiro (**figura 13**), no sudeste do Brasil, apresentam ciclo anual semelhante nos três conjuntos de dados. Belo Horizonte tem valores médios de intensidade do vento abaixo de 3 m s^{-1} . No Rio de Janeiro os maiores valores de intensidade ocorrem na primavera e no verão, e em São Carlos, embora os dados de INMET estejam mais afastados e intensos dos que os outros, os conjuntos de dados apresentam ciclo semelhante. O RegCM4 tem velocidade média mais intensa do que o INMET e a ERA-Interim em Belo Horizonte e no Rio de Janeiro.

A última região analisada é a sul (**figura 14**), onde o INMET é mais intenso do que os demais conjuntos de dados nas três estações meteorológicas. No entanto, em Santa Vitória do Palmar e Porto Alegre (**figura 14a e c**), o RegCM4 apresenta intensificação dos ventos no inverno, apresentando valores de velocidade do vento mais intensos do que os do INMET. Em Florianópolis o ciclo anual dos dados se apresenta semelhante.

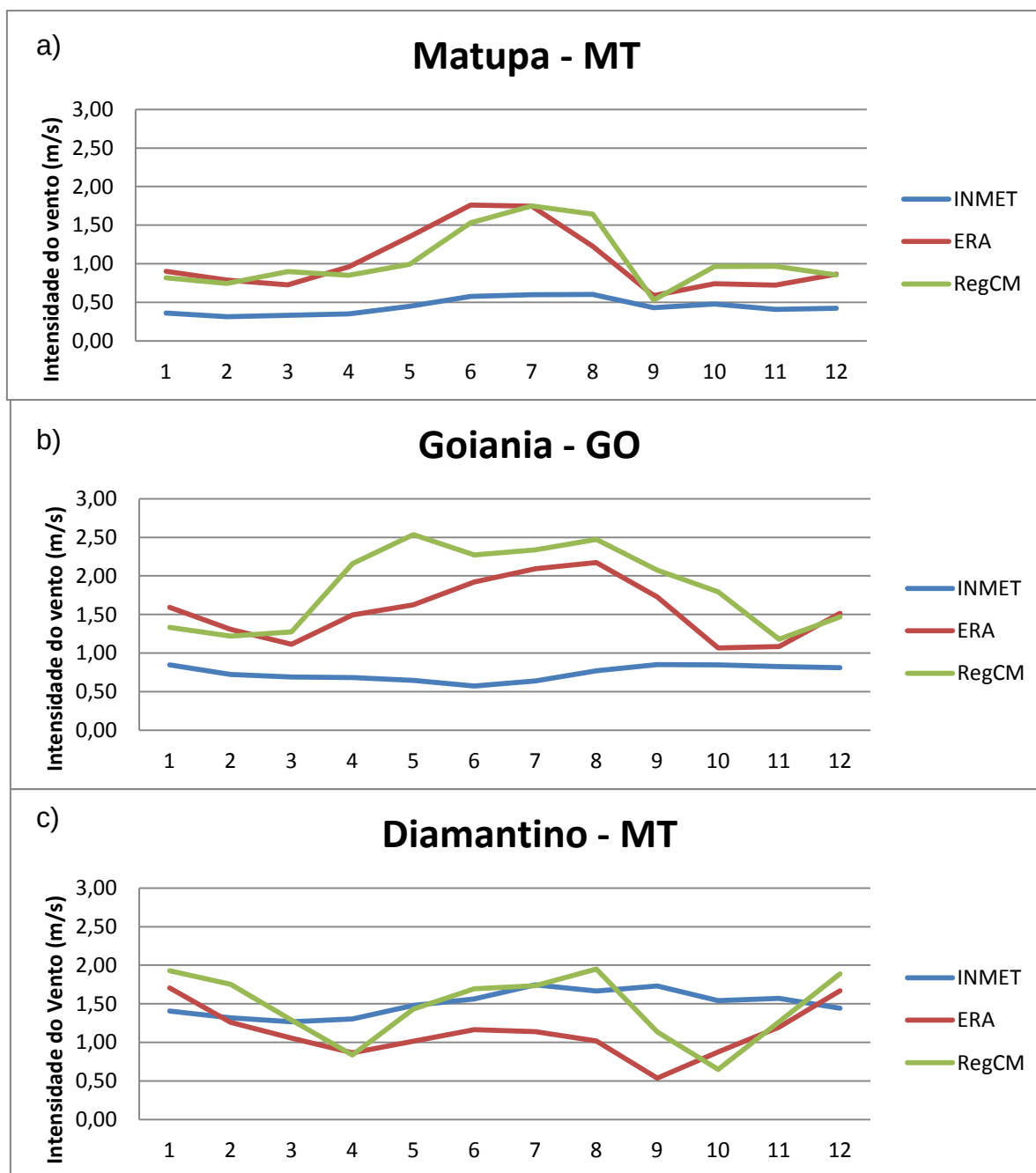


Figura 10 -Média mensal climatológica no presente (1979 - 2005) para cada conjunto de dados, em três estações do centro-oeste do Brasil.

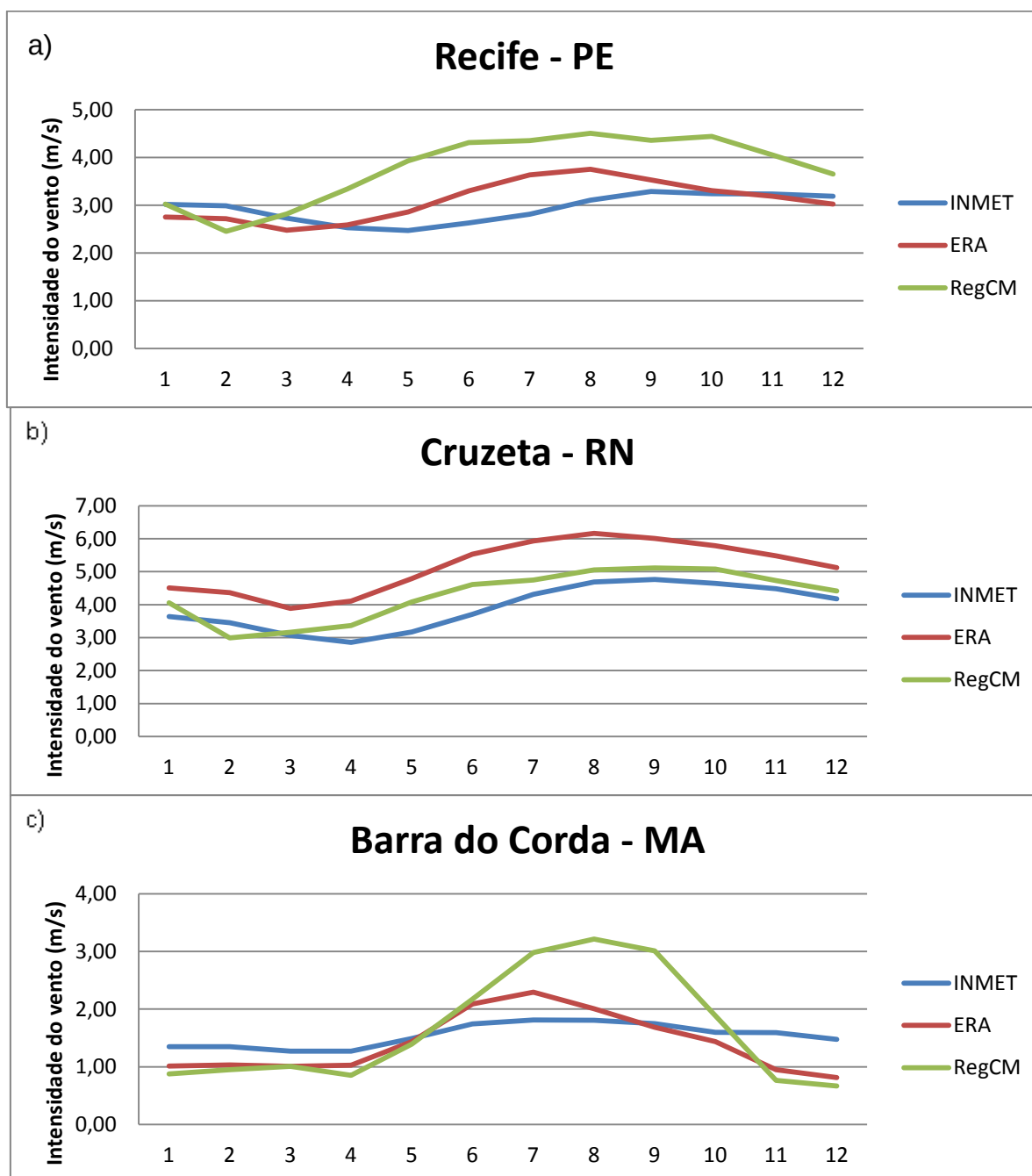


Figura 11 - Média mensal climatológica no presente (1979 - 2005) para cada conjunto de dados, em três estações do nordeste do Brasil.

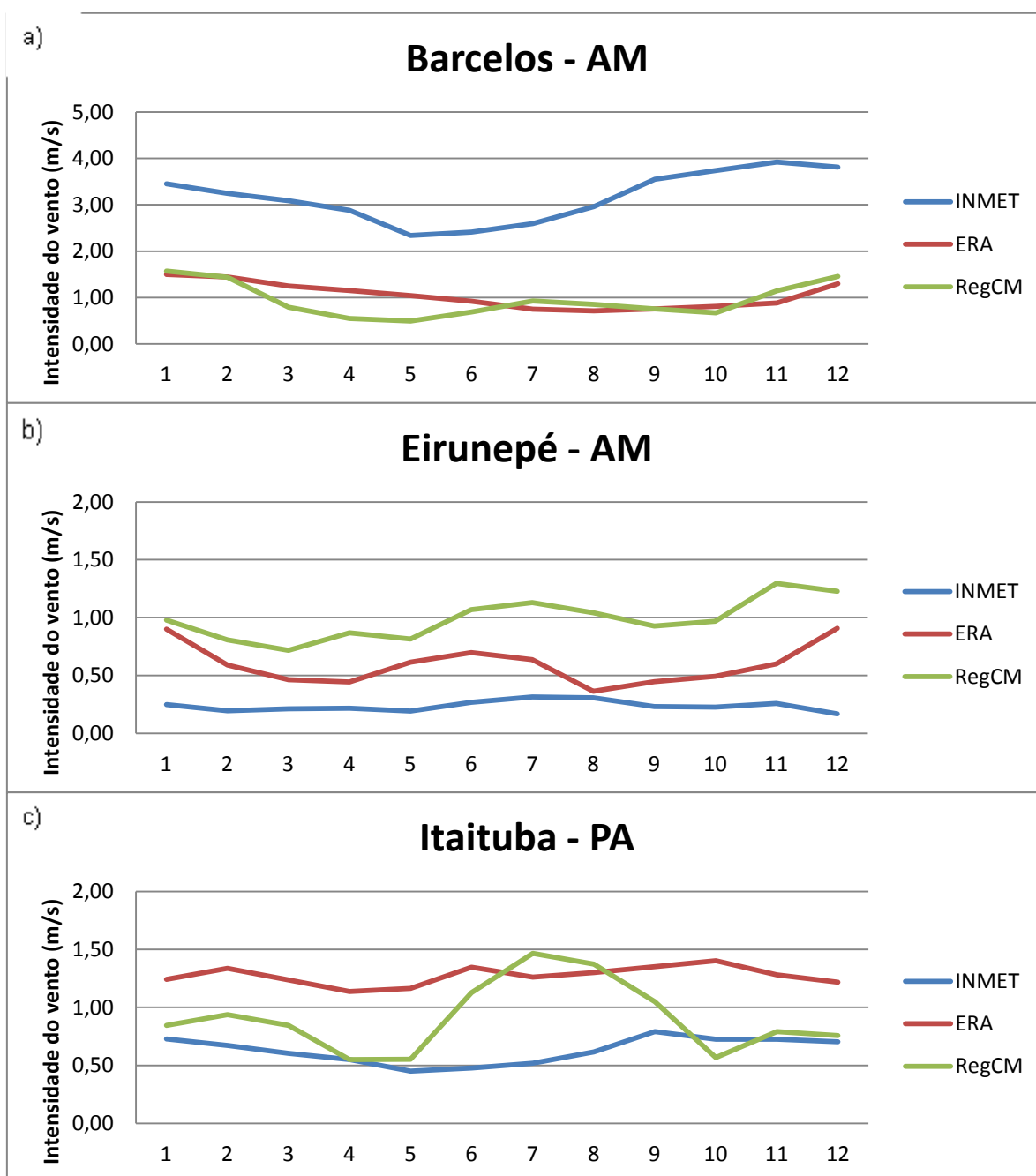


Figura 12 - Média mensal climatológica no presente (1979 - 2005) para cada conjunto de dados em três estações do norte do Brasil.

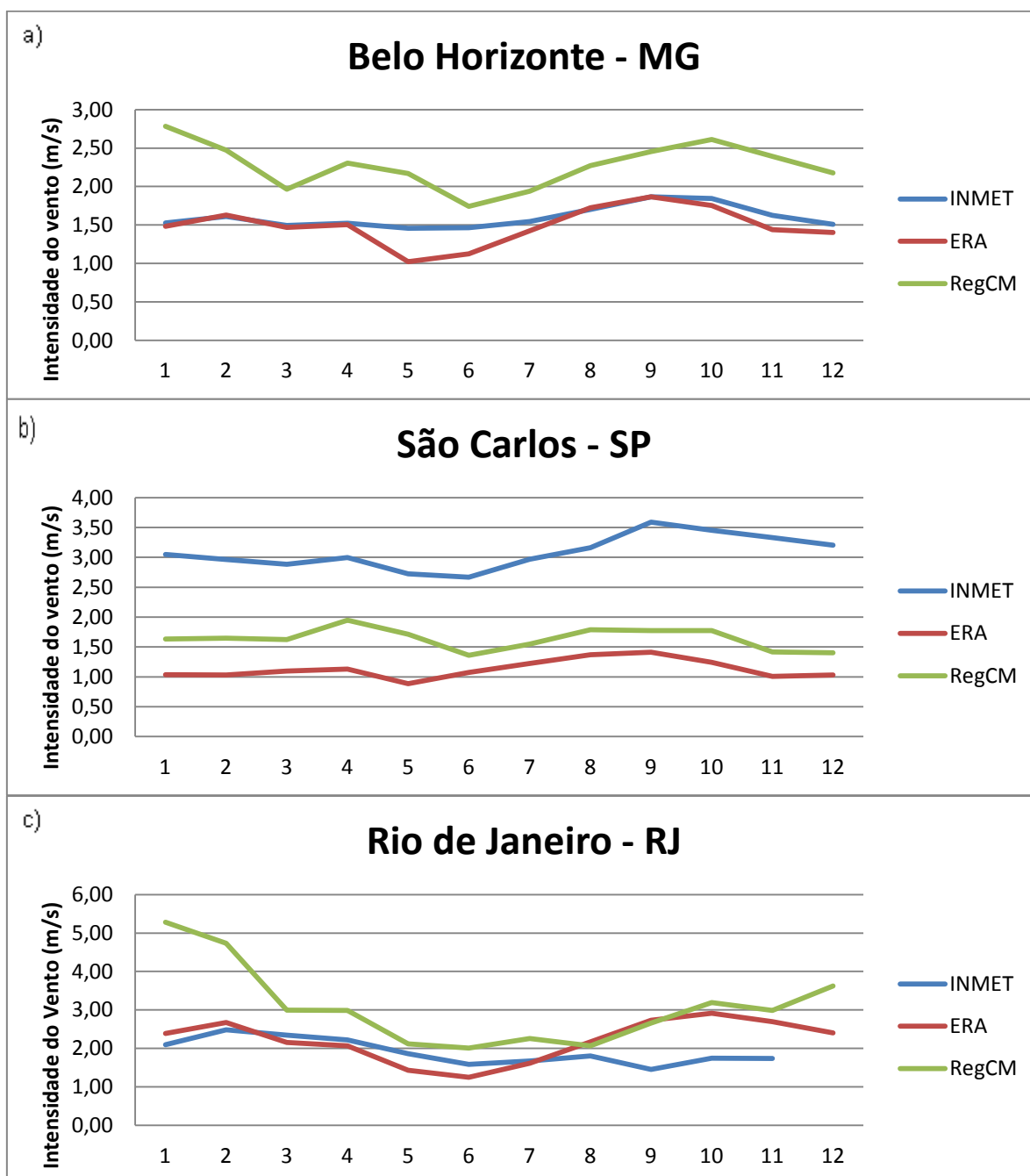


Figura 13 - Média mensal climatológica no presente (1979 - 2005) para cada conjunto de dados em três estações do sudeste do Brasil.

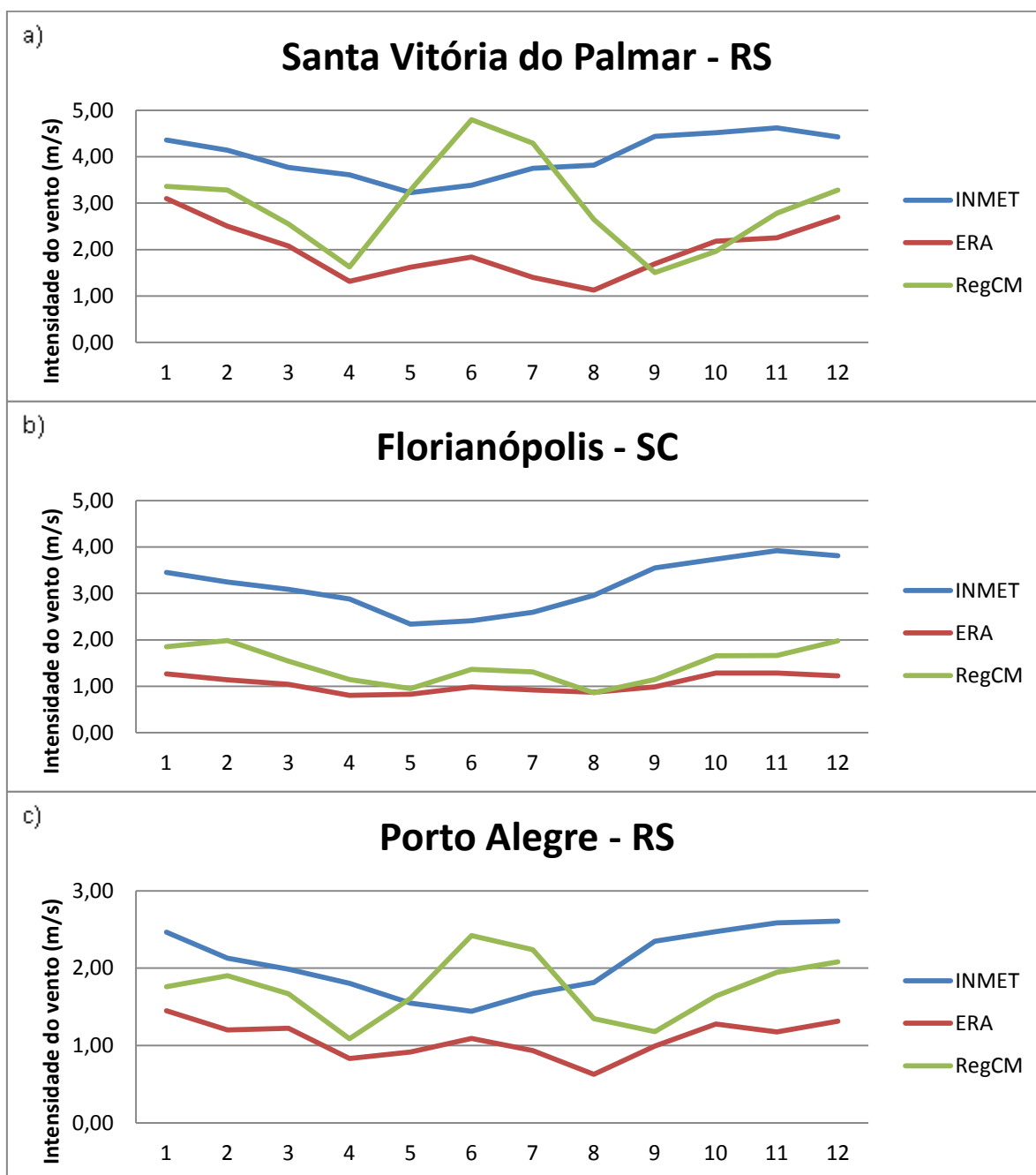


Figura 14 - Média mensal climatológica no presente (1979 - 2005) para cada conjunto de dados em três estações do sul do Brasil

4.1.2 Ventos a 100 metros de altura

Os ventos a 100 metros de altura no clima presente (1979 – 2005) sobre a AS na reanálise ERA-Interim e simulados pelo RegCM4 são mostrados na **figura 15** (a, b, c, d) e (e, f, g, h), respectivamente, e as diferenças entre eles na **figura 15** (i, j, l, m).

A ERA-Interim **figura** (15 a, b, c, d) durante o verão e inverno mostra os ventos alísios com intensidade de 6 a 8 m s⁻¹ sobre o Oceano Atlântico. Quando adentram o continente ao longo da costa norte e nordeste do Brasil apresentam velocidades entre 4 e 6 m s⁻¹, porém, mais no interior do continente a intensidade diminui e no estado da Bahia os ventos têm intensidade entre 2 e 4 m s⁻¹. Já durante o inverno e primavera, a intensidade dos ventos alísios sobre o Oceano Atlântico, varia entre 4 e 10 m s⁻¹, sendo que a região com ventos mais intensos está próxima da região nordeste do Brasil: 10 e 14 m s⁻¹, principalmente, na primavera.

Em comparação com a ERA-Interim (**figura 15** i, j, l, m), o RegCM simula os ventos alísios mais intensos durante o inverno e primavera sobre o Oceano Atlântico. No outono, os ventos no REGCM são menos intensos do que o ERA-Interim do equador até ~7°S e mais intensos ao norte do equador. Quando adentram o continente os ventos alísios no RegCM estão mais fracos no verão e inverno com exceção da Bahia, que apresenta ventos mais intensos. Na primavera os alísios simulados são mais fracos no norte e em parte do nordeste brasileiro, exceto na região costeira do Maranhão, Piauí, e de Pernambuco a Bahia, onde a intensidade é maior em todo o estado.

A leste dos Andes, na região de atuação dos JBNs, os ventos da ERA-Interim apresentam intensidade de 2 a 4 m s⁻¹ no verão, e nas demais estações do ano as intensidades variam de 1 a 4 m s⁻¹. A oeste dos Andes, na região subtropical, o verão e primavera apresentam os ventos mais intensos chegando 10 m s⁻¹. No outono e inverno a intensidade do vento não ultrapassa 6 m s⁻¹. Os JBNs simulados são mais intensos na maior parte do ano comparados aos da ERA-Interim, principalmente a oeste (região subtropical) no outono e inverno e a leste (da região tropical à subtropical) dos Andes no inverno e verão.

A simulação (**figura 15** i, j, l, m) exibe maior intensidade dos ventos nos setores norte e oeste do ASAS no verão, outono e primavera; já no setor sul é menor no verão, outono e inverno. Com relação ao ASPS, esse tem no verão intensidade menor no setor

sul e mais forte no norte; no inverno o sistema simulado é mais intenso do que o da reanálise e no outono e primavera é mais fraco.

A simulação (**figura 15i, j, l, m**), também mostra ventos mais intensos sobre o Oceano Atlântico de Alagoas ao Uruguai durante o verão outono e primavera, já na parte central da AS o aumento da intensidade no RegCM é mais expressivo no verão e inverno. No inverno a simulação é mais intensa no norte do Chile, no noroeste e a área central da Argentina e no Oceano Atlântico ao longo da costa do Rio Grande do Sul ao sul da Argentina.

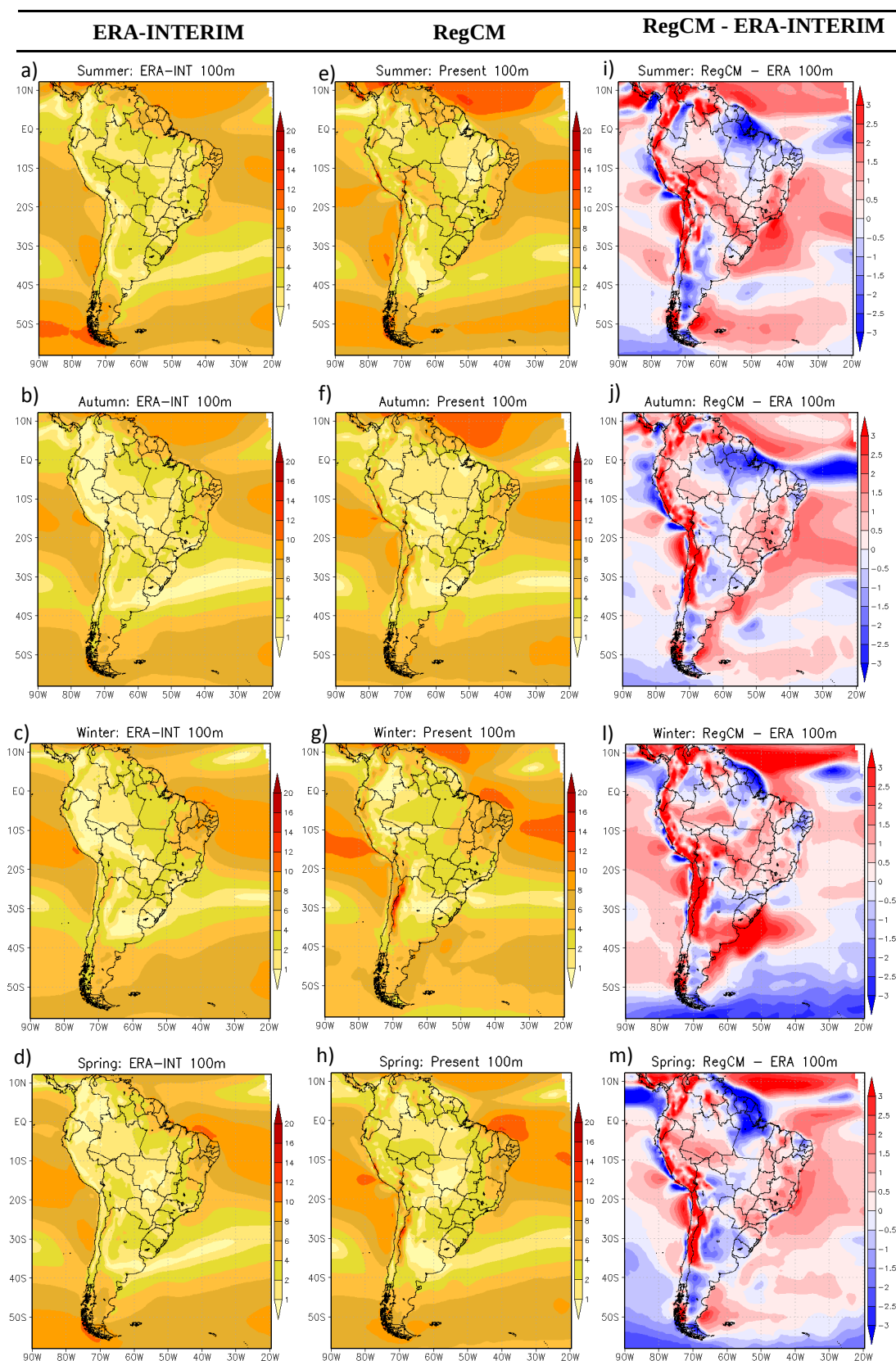


Figura 15 - Climatologia sazonal do presente (1979 -2005) da magnitude do vento a 100 metros de altura na América do Sul. ERA-Interim (a, b, c, d), RegCM4 (e, f, g, h) e a diferenças (i, j, l, m) entre estes. As cores indicam a magnitude do vento

4.2 FUTURO

4.2.1 Cenário RCP4.5

Uma análise da circulação de superfície (10 e 100 metros de altura) no clima futuro é apresentada buscando identificar as principais diferenças encontradas entre o presente e o futuro no cenário RCP4.5.

A **figura 16** mostra enfraquecimento dos ventos alísios de cerca de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ em todas as estações do ano sobre o Oceano Atlântico. No entanto, no inverno há uma faixa com intensificação dos alísios. Os JBNs a leste da AS são mais intensos no outono, inverno e primavera, no oeste são mais intensos no verão e primavera. O ASPS é mais intenso (fraco) na primavera (outono) e há enfraquecimento (fortalecimento) no setor sul (norte) no verão e inverno. O ASAS no verão apresenta o setor norte mais intenso e a setor sul mais fraco. No inverno este sistema apresenta a região sul e nordeste enfraquecida.

O padrão espacial das diferenças da intensidade dos ventos em 100 m de altura no futuro próximo é similar ao de 10 m, no entanto há algumas diferenças na intensidade das mudanças. A 100 m de altura (**figura 17**), durante o verão, o enfraquecimento dos ventos alísios sobre o Oceano Atlântico e a intensificação sobre a Amazônia são mais fortes. Já na primavera as diferenças de intensidade são maiores no interior do Norte do Brasil, onde ocorre intensificação dos alísios, e na região dos JBN a leste dos Andes.

Enquanto há poucas diferenças entre o presente e o futuro próximo (**figura 16**, 2020 – 2050), projeções mais expressivas ocorrem em relação ao futuro distante (**figura 18**, 2070-2098).

Na **figura 18**, para o verão, outono e primavera é observado o enfraquecimento dos alísios por volta de 1 a $2,5 \text{ m s}^{-1}$ no Oceano Atlântico. No inverno, assim como no futuro próximo, há uma faixa com intensificação dos ventos alísios. O setor norte (sul) do ASPS exibe clara intensificação (enfraquecimento) durante o verão, no inverno o fortalecimento ocorre apenas nas extremidades do setor norte e na primavera (outono) em todo o sistema exibe intensificação (enfraquecimento).

O ASAS aparece mais intenso e adentra em uma maior porção do continente no outono, causando um fortalecimento dos ventos sobre o continente. No inverno os setores oeste e sudoeste do anticiclone que está sobre o continente se apresenta mais

forte e abrange uma área maior se comparado com o apresentado na **figura 16**. Sobre o Oceano Atlântico o ASAS está mais forte no outono. Os JBNs a oeste dos Andes aparecem mais intensos na primavera e a leste dos Andes esta mais forte no inverno e mais fraco no verão.

Assim como no futuro próximo o padrão espacial no futuro distante das diferenças da intensidade dos ventos em 100 m de altura (**figura 19**) é similar a de 10 m, mas também com algumas alterações. No verão e inverno está mais intenso o setor norte do ASPS e os alísios no norte do Brasil. Já na primavera o enfraquecimento é maior na região central da AS (centro-oeste do Brasil e norte da Bolívia).

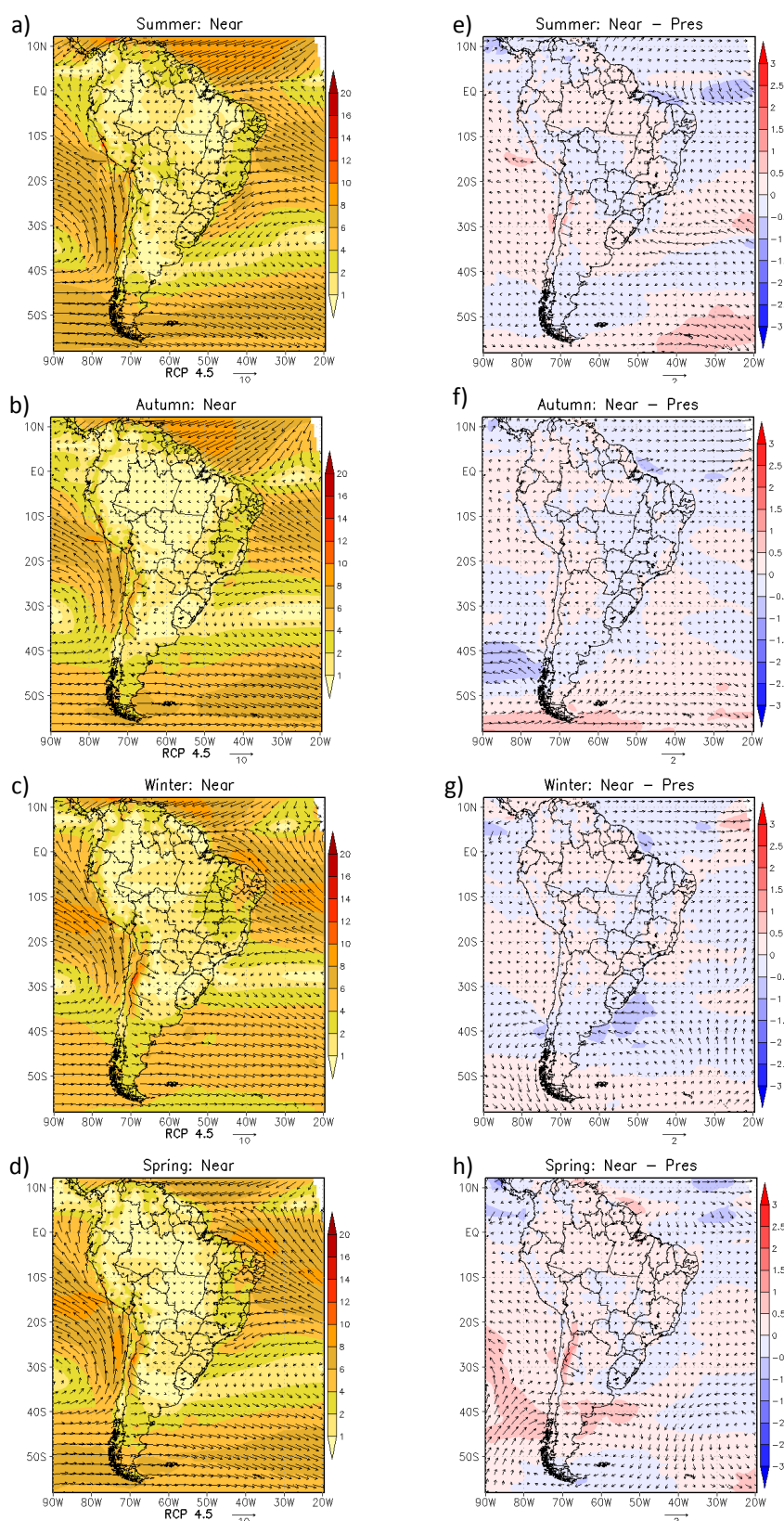


Figura 16 - Climatologia sazonal do vento a 10 m no futuro próximo (2020 – 2050) no cenário RCP4.5 onde (a) Verão (b) Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão : futuro próximo – presente (f) Outono: futuro próximo – presente (g) Inverno: futuro próximo – presente (h) Primavera: futuro próximo – presente. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude

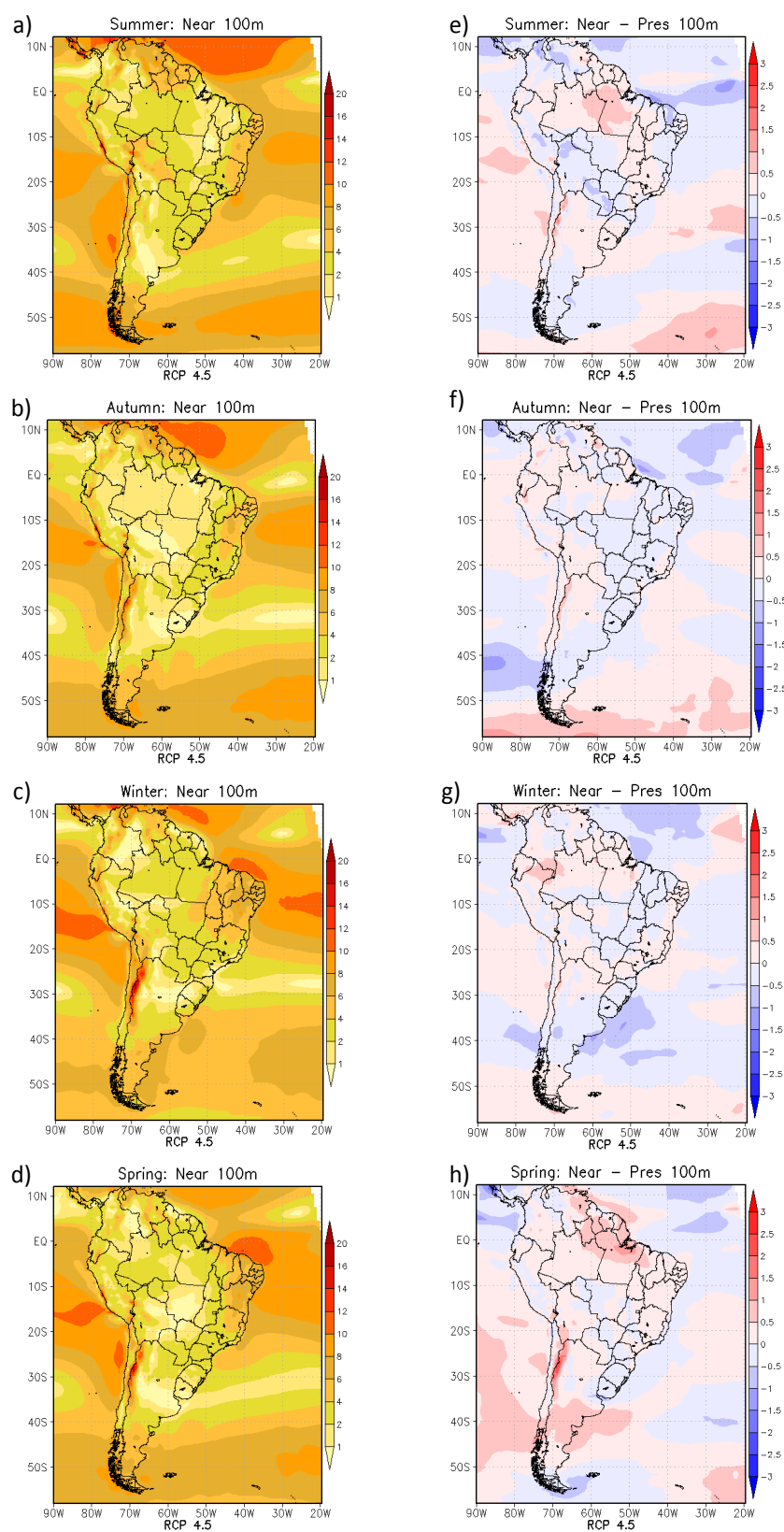


Figura 17- Climatologia sazonal da magnitude do vento a 100 m no futuro próximo (2020 – 2050) no cenário RCP4.5 onde (a)Verão (b) Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão : futuro próximo – presente (f) Outono: futuro próximo – presente (g) Inverno: futuro próximo – presente (h) Primavera: futuro próximo – presente. As indicam cores a magnitude do vento

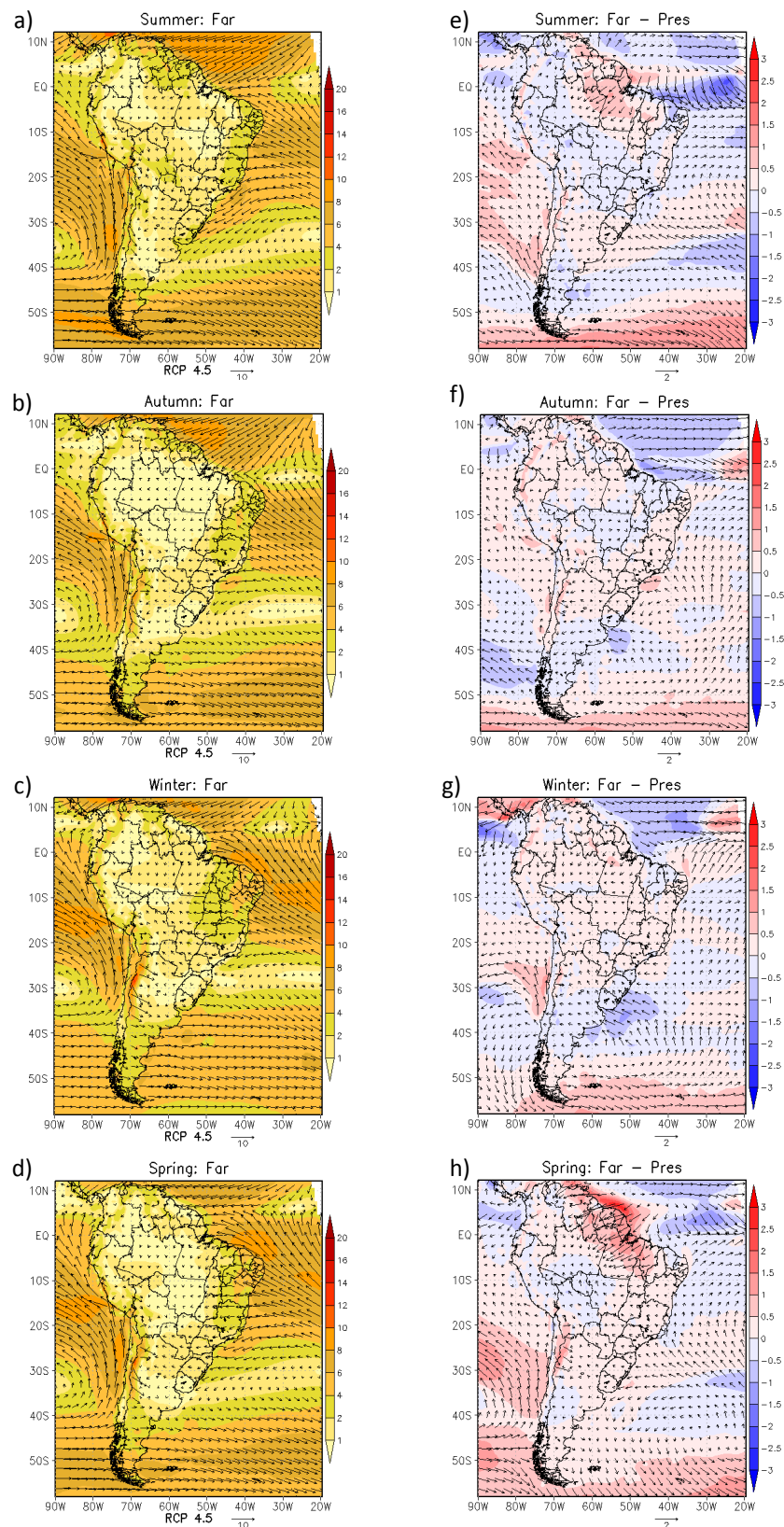


Figura 18-Climatologia sazonal do vento a 10 m no futuro distante (2070 – 2098) no cenário RCP4.5 onde (a) Verão (b) Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão : futuro distante – presente (f) Outono: futuro distante – presente (g) Inverno: futuro distante – presente (h)Primavera: futuro distante – presente. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude

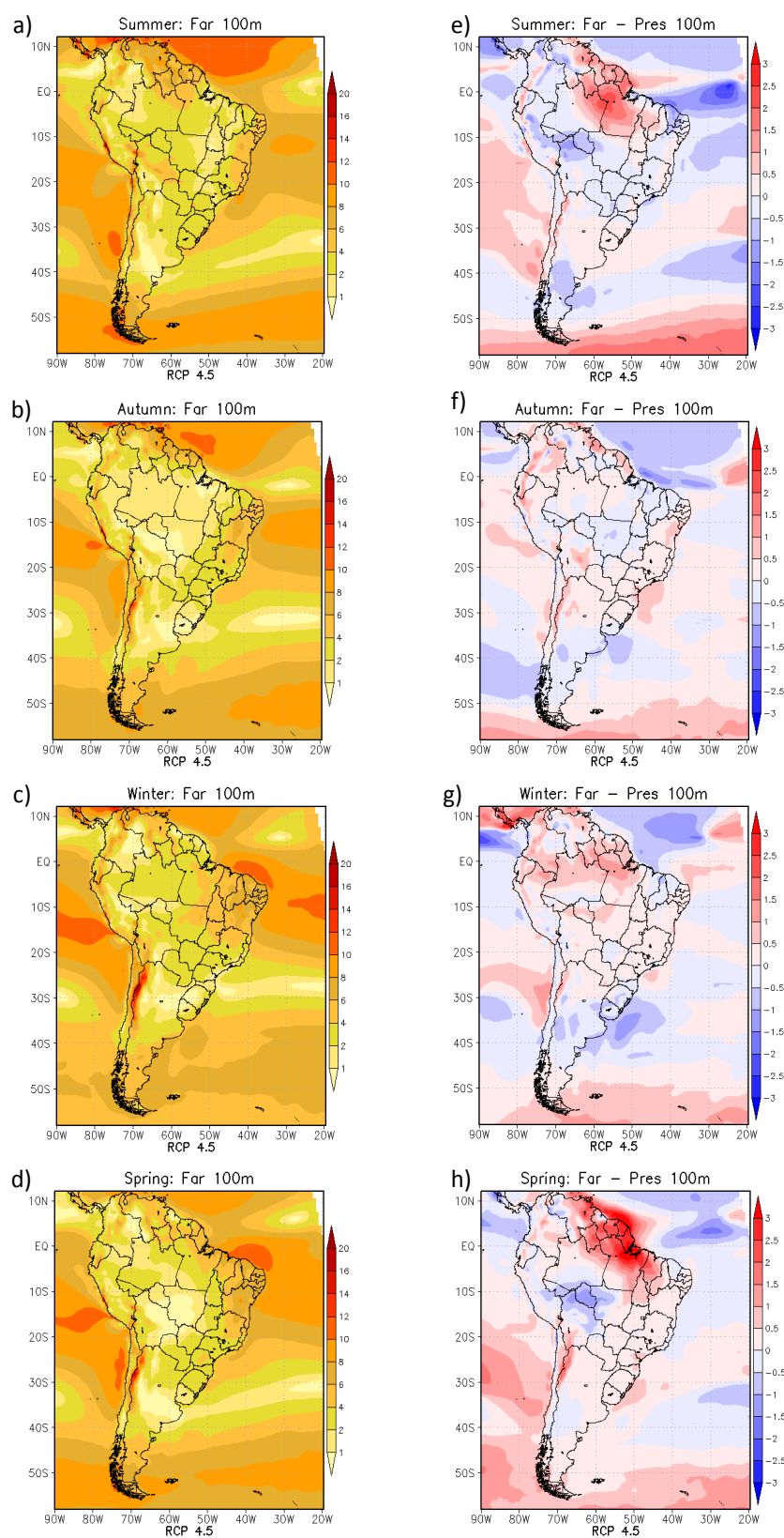


Figura 19 - Climatologia sazonal da magnitude do vento a 100 m no futuro distante (2070 – 2098) no cenário RCP4.5 onde (a)Verão (b)Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão: futuro distante – presente (f) Outono: futuro distante – presente (g) Inverno: futuro distante – presente (h) Primavera: futuro distante – presente. As cores indicam a magnitude do vento

4.2.2 Cenário RCP8.5

Nas projeções do cenário RCP8.5, o mais pessimista, as diferenças entre os dois períodos futuros e o presente são mais intensas, sendo que as maiores diferenças em relação ao presente ocorrem no futuro distante. As **figuras** 20, 21, 22, 23 representam o futuro próximo (2020 - 2050), o futuro distante (2070 - 2098), e as diferenças entre o futuro e o presente para as alturas de 10 e 100 m no cenário RCP8.5.

O futuro próximo (**figura** 20 a,b,c,d) mostra os sistemas de circulação atmosférica sem grandes mudanças em relação ao presente, exceto os JBNs a leste e a oeste dos Andes que aparecem mais intensos, o ASPS que está deslocado para sul na primavera, e o ASAS que aparece mais deslocado para oeste no inverno.

As diferenças (**figura** 20 e,f,g,h) para este período em relação ao presente são os alísios enfraquecidos (fortalecidos) no Atlântico equatorial (na região norte do Brasil) no verão (na primavera), além do fortalecimento dos JBNs a leste e oeste dos Andes e do setor norte do ASPS na primavera. Já para a altura de 100 m (**figura** 21) as mudanças correspondem as mesmas de 10 metros.

Para o futuro distante (**figura** 22), o ASPS estará mais deslocado para sul no outono e inverno, já o ASAS está deslocado para sul no verão e norte no inverno. Como se espera neste período futuro, as diferenças em relação ao presente são mais expressivas, inclusive quando comparadas com as diferenças apresentadas no mesmo período no cenário RCP4.5. Com relação à intensidade dos sistemas no verão os alísios no Oceano Atlântico (norte do Brasil) estão enfraquecidos (fortalecidos) e o setor norte do ASPS e os JBN a leste e a oeste dos Andes estão mais intensos; na primavera os JBNs a leste e a oeste dos Andes, o ASPS e os alísios no norte do Brasil e Oceano equatorial estão intensificados.

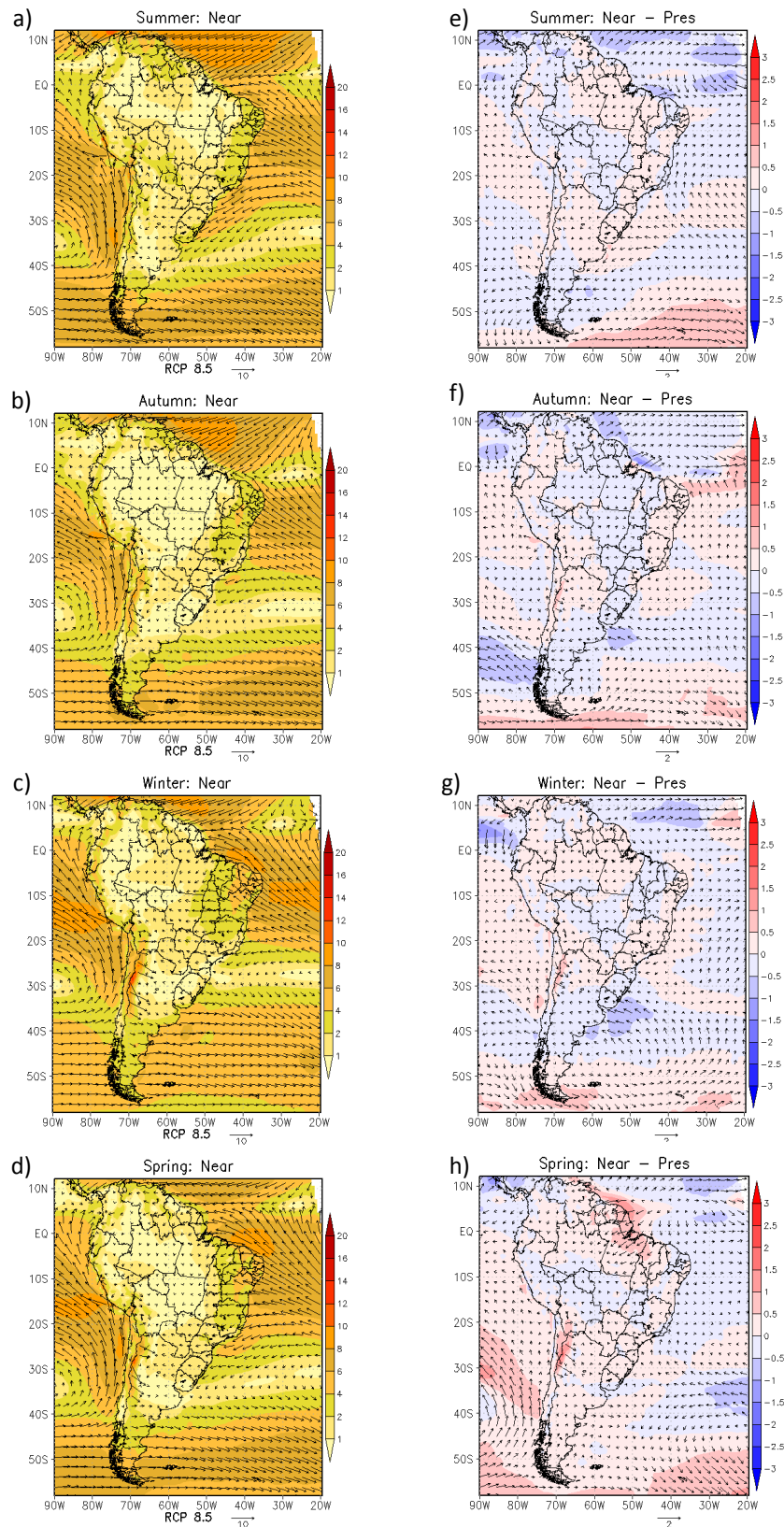


Figura 20- Climatologia sazonal do vento a 10 m no futuro próximo (2020 – 2050) no cenário RCP8.5 onde (a)Verão (b)Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão: futuro próximo – presente (f) Outono: futuro próximo – presente (g) Inverno: futuro próximo – presente (h)Primavera: futuro próximo – presente. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude

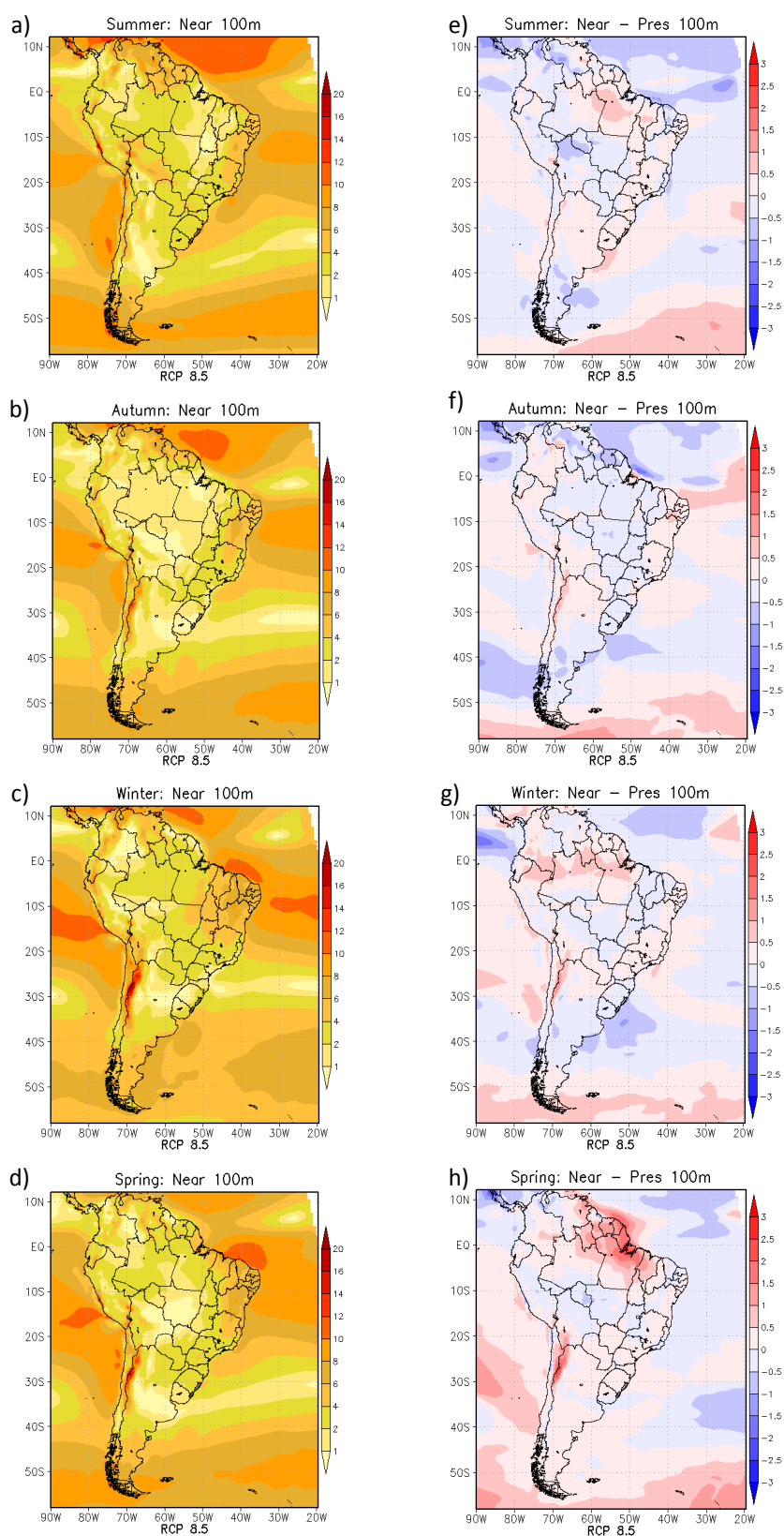


Figura 21 - Climatologia sazonal da magnitude do vento a 100 m no futuro próximo (2020 – 2050) no cenário RCP8.5 onde (a) Verão (b) Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão : futuro próximo – presente (f) Outono: futuro próximo – presente (g) Inverno: futuro próximo – presente (h) Primavera: futuro próximo – presente. As cores indicam a magnitude do vento

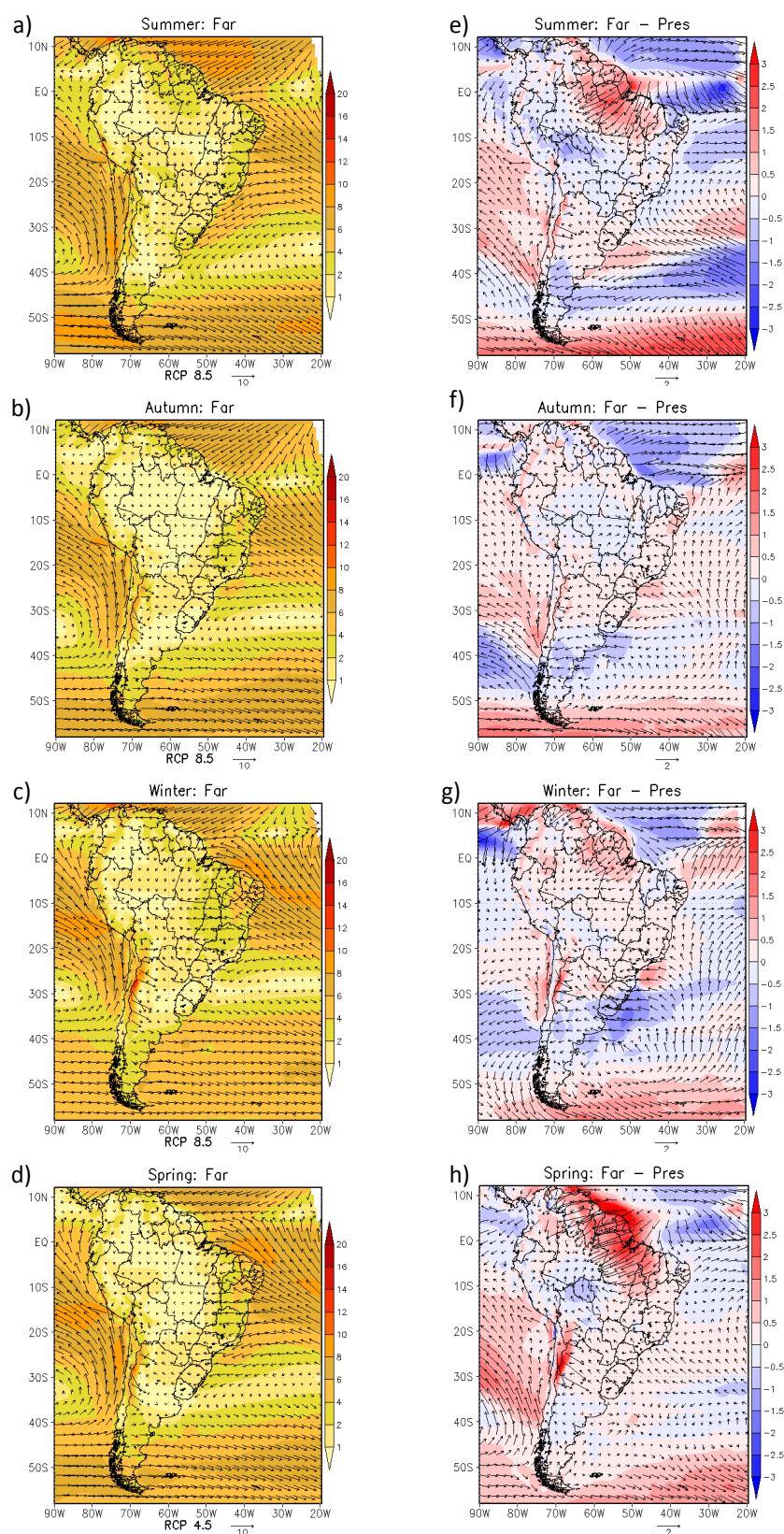


Figura 22 - Climatologia sazonal do vento a 10 m no futuro distante (2070 – 2098) no cenário RCP8.5 onde (a) Verão (b) Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão : futuro distante – presente (f) Outono: futuro distante – presente (g) Inverno: futuro distante – presente (h)Primavera: futuro distante – presente. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude

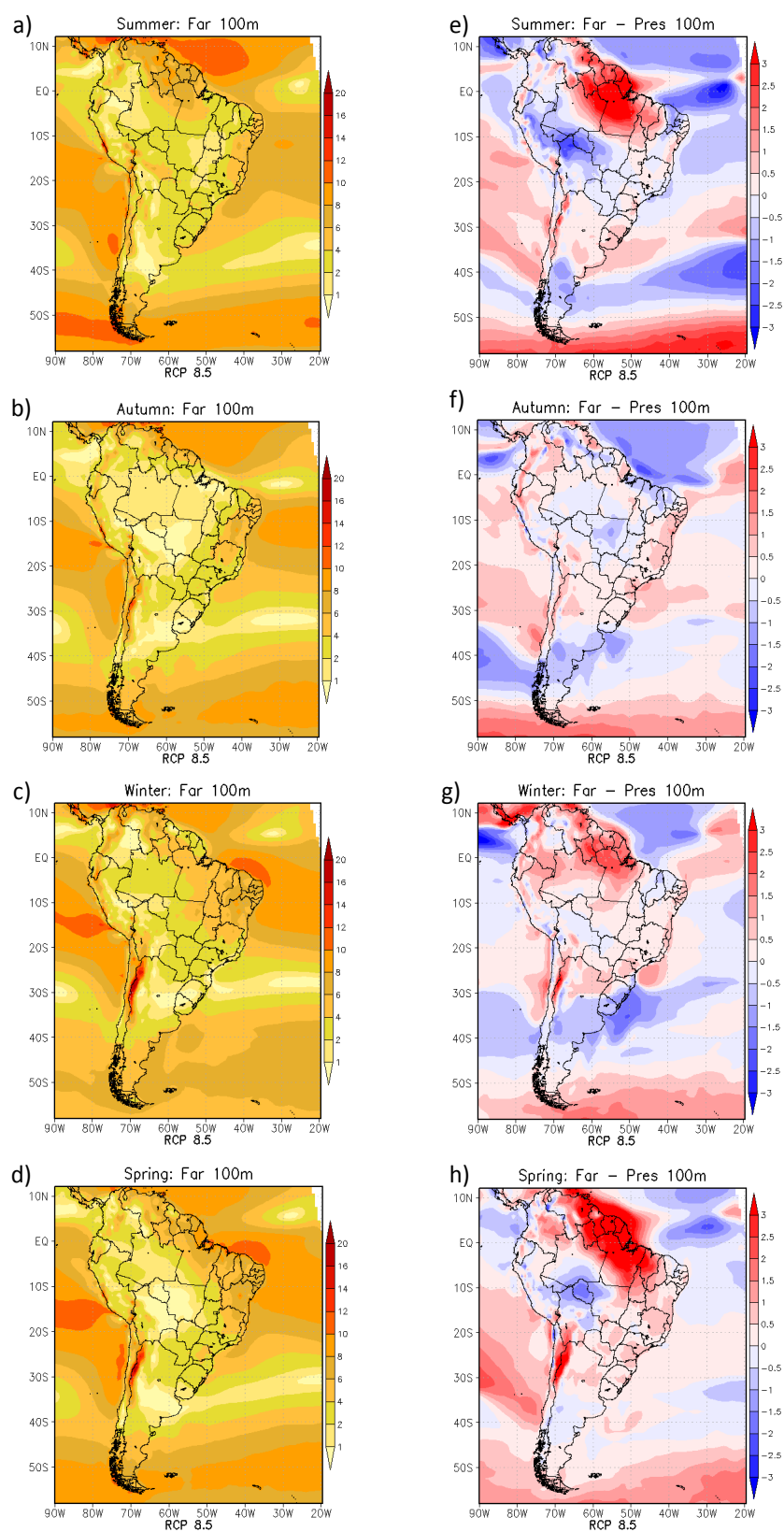


Figura 23 - Climatologia sazonal da magnitude do vento a 100 m no futuro distante(2070 – 2098) no cenário RCP8.5 onde (a) Verão (b) Outono (c) Inverno (d) Primavera (e) Verão : futuro distante – presente (f) Outono: futuro distante – presente (g) Inverno: futuro distante – presente (h)Primavera: futuro distante – presente. As cores indicam a magnitude do vento

4.3 DENSIDADE DE POTÊNCIA DO VENTO

4.3.1 América do Sul

Os locais onde haverá aumento e diminuição da DP a 100 metros de altura por estação do ano nos futuros próximo e distante e considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 são mostrados nas **figuras** 24, 25, 26 e 27, que também revelam a relação entre a DP e a intensidade do vento.

As **figuras** 24 e 25 mostram as comparações referentes ao cenário RCP4.5, e as **figuras** 26 e 27 as referentes ao cenário RCP8.5. A correspondência entre DP e a intensidade do vento é claramente observada nos dois cenários, isto é, onde acontece aumento (diminuição) da intensidade do vento há aumento (diminuição) da DP.

O estudo de Chadee e Clarke (2014) mostra que os valores de DP para o presente a 10 metros de altura no norte da AS (Colômbia e Venezuela) são fracos. No atual estudo com a DP a 100 metros os valores de DP continuam fracos, salvo no futuro distante no inverno e na primavera nos dois cenários quando a DP aumenta nesta região.

Considerando o futuro distante, cenário RCP8.5, a **figura** 27e exibe decréscimo de DP na área central do nordeste desde o Ceará e oeste do Rio Grande do Norte até a Bahia, e aumento no Maranhão, Piauí e do leste da Paraíba ao leste da Bahia. No outono (**figura** 27f) há aumento da DP nas regiões leste do Rio Grande do Norte e Paraíba e em todo território de Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia e decréscimo no Maranhão, Piauí e Ceará.

O inverno (**figura** 27g), também no futuro distante, exibe aumento de DP do leste do Rio Grande do Norte e da Paraíba até a Bahia e decréscimo no nordeste do Maranhão, norte do Piauí e na área central do Ceará e a primavera (**figura** 27h) indica aumento em todo o nordeste exceto no Ceará, Rio Grande do Norte e oeste da Paraíba.

Já no sul do Brasil, futuro distante no cenário RCP8.5, o verão (**figura** 27e) mostra aumento de DP no leste do Paraná, Santa Catarina e do centro ao sul do Rio Grande do Sul. No outono e primavera (**figura** 27f e 27h) há aumento de DP em toda a região, mas no inverno (**figura** 27g) o aumento ocorre apenas no Paraná, oeste de Santa Catarina e noroeste do Rio Grande do Sul e as demais regiões apresentam decréscimo.

O estudo de Pereira et al. (2012) usou o modelo regional ETA aninhado ao HadCM3 para simular a DP a 10 metros de altura considerando cenário A1B, e identificaram para o futuro distante: No nordeste aumento de DP em todas as estações

exceto no oeste da Paraíba e leste de Alagoas durante o verão e no extremo litoral da Bahia durante o outono em que há decréscimo; E no sul diminuição da DP em toda a região durante o verão e nas demais estações aumento também em toda a região.

As diferenças entre o estudo de Pereira et al. (2012) e o presente estudo são ocasionadas devido as incertezas dos modelos, dos dados usados para alimentar os modelos e dos distintos cenários e alturas.

Archer e Jacobson (2005) mostram que o sul e a área central da costa leste da Argentina, o sul do Chile até 40°S e uma área no norte também no Chile apresentam classe de vento ≥ 3 (nos níveis de 80 m), portanto, são áreas com bom potencial para geração de energia eólica. Logo, além do nordeste e sul do Brasil, estas demais áreas também merecem atenção. Neste aspecto os Quadros 1, 2, 3 e 4 indicam as mudanças na DP a 100 metros de altura de acordo com a **figura 24, 25, 26 e 27** nas regiões da AS propícias a geração de energia eólica. Quando a DP esta entre 10% e -10%, este é considerado neutro.

Quadro 1 – Análise da densidade de potência no futuro próximo (**Figura 24**) no cenário RCP4.5

	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Nordeste do Brasil	Neutro	Neutro	Neutro	Neutro
Sul do Brasil	Aumento até 40%	Decréscimo até 60%	Decréscimo até 40%	Decréscimo até 40%
Área central da Argentina	Aumento até 40%	Decréscimo até 40%	Decréscimo até 40%	Aumento de 100%
Sul da Argentina e Chile	Extremo sul neutro e áreas de decréscimo até 20%	Extremo sul aumento até 20%, áreas de decréscimo até 20%no norte da área e neutro entre estes	Neutro e extremo sul com aumento até 20%	Neutro e áreas com aumento de até 20% e de até100%
Norte do Chile	Neutro	Neutro	Neutro	Aumento até 60%

Quadro 2 - Análise da densidade de potência no futuro distante (**Figura 25**) no cenário RCP4.5

	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Nordeste do Brasil	Neutro	Aumento até 40%	Aumento até 40%	Aumento até 20%
Sul do Brasil	Aumento até 60%	Aumento até 20%	Decréscimo até 60%	Aumento até 80%
Área central da Argentina	Aumento de até 100%	Decréscimo até 40%	Decréscimo até 40%	Aumento até 20%
Sul da Argentina e Chile	Extremo sul aumento até 40%, áreas de decréscimo até 40, e neutro entre estes	Extremo sul aumento até 20%, áreas de decréscimo até 20%, e neutro entre estes	Neutro e aumento de até 40% no Extremo sul	Aumento até 40%
Norte do Chile	Neutro	Aumento até 40%	Neutro	Aumento de até 100%

Quadro3 - Análise da densidade de potência no futuro próximo (**Figura 26**) no cenário RCP8.5

	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Nordeste do Brasil	Neutro e com aumento até 20% entre a Paraíba e Pernambuco	Aumento até 40%	Neutro	Neutro
Sul do Brasil	Aumento até 40%	Decréscimo até 40%	Decréscimo até 40%	Aumento até 20%
Área central da Argentina	Aumento de 100%	Decréscimo até 40%	Decréscimo até 40%	Aumento de até 100%
Sul da Argentina e Chile	Extremo sul neutro e aumento de 20%	Extremo sul de aumento de 20%, áreas de decréscimo até 40%, e neutro entre estes	Extremo sul aumento de 60% e neutro	Aumento até 20%
Norte do Chile	Neutro	Aumento até 40%	Aumento até 40%	Aumento de até 100%

Quadro 4- Análise da densidade de potência no futuro distante (**Figura 27**) no cenário RCP8.5

	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Nordeste do Brasil	Aumento até 40%	Aumento de até 100%	Aumento até 40%	Aumento até 40%
Sul do Brasil	Aumento de até 100%	Aumento de até 100%	Decréscimo até 100%	Aumento de até 100%
Área central da Argentina	Aumento de até 100%	Decréscimo até 60%	Decréscimo até 40%	Neutro
Sul da Argentina e Chile	Extremo sul aumento de até 40%, áreas de Decréscimo até 40%, e neutro entre estes	Extremo sul aumento de até 40%, áreas de Decréscimo até 40%, e neutro entre estes	Aumento até 60%	Extremo aumento de até 40% e neutro
Norte do Chile	Neutro	Aumento até 60%	Aumento até 40%	Aumento de até 100%

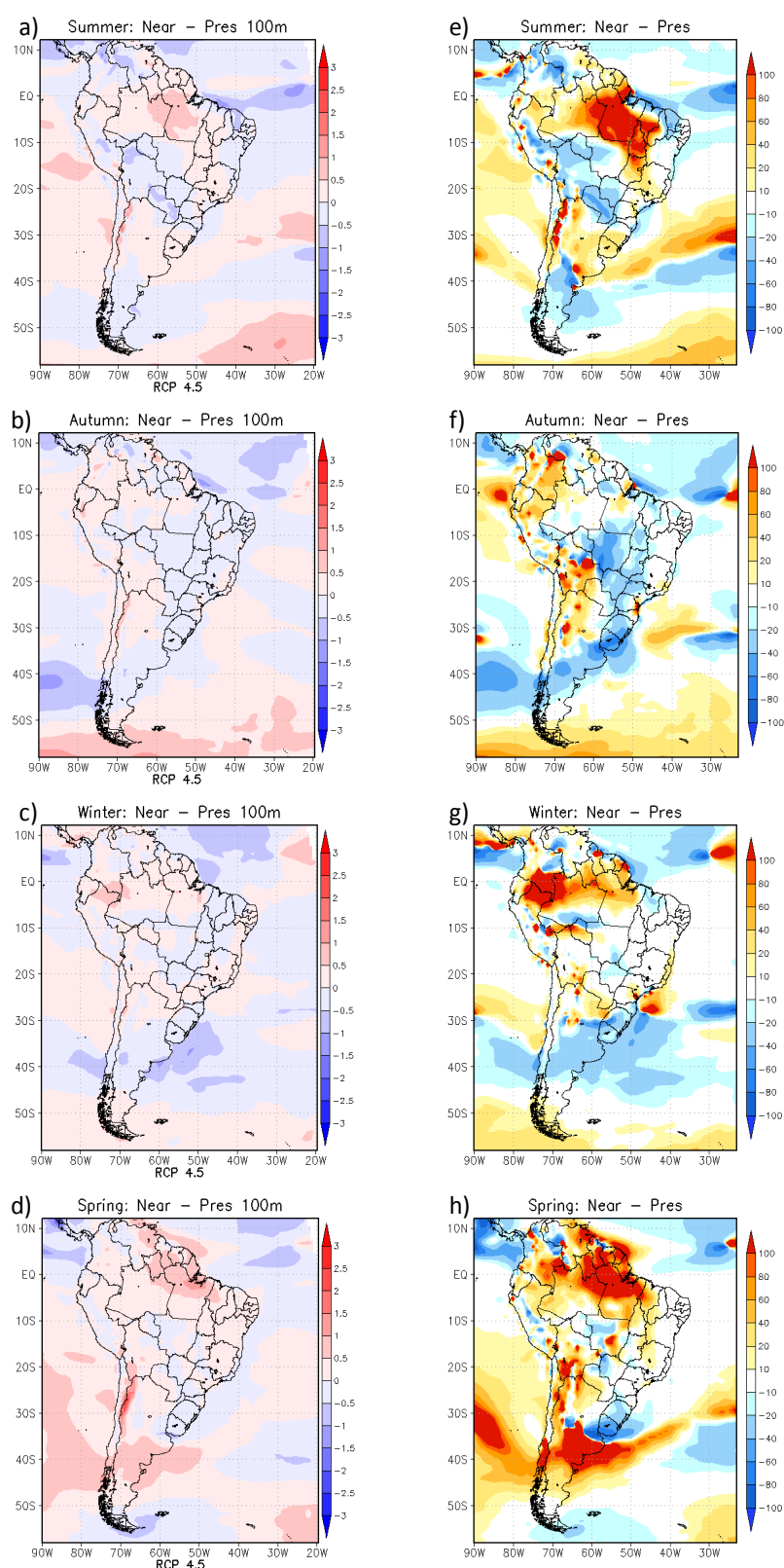


Figura 24 - Climatologia sazonal a 100m no futuro próximo (2020 – 2050), cenário RCP4.5, da magnitude do vento (a) Verão: futuro próximo – presente (b)Outono: futuro próximo – presente (c) Inverno: futuro próximo – presente (d) Primavera: futuro próximo – presente e da densidade de potência (e) Verão: futuro próximo – presente (f) Outono: futuro próximo – presente (g) Inverno: futuro próximo – presente (h)Primavera: futuro próximo – presente

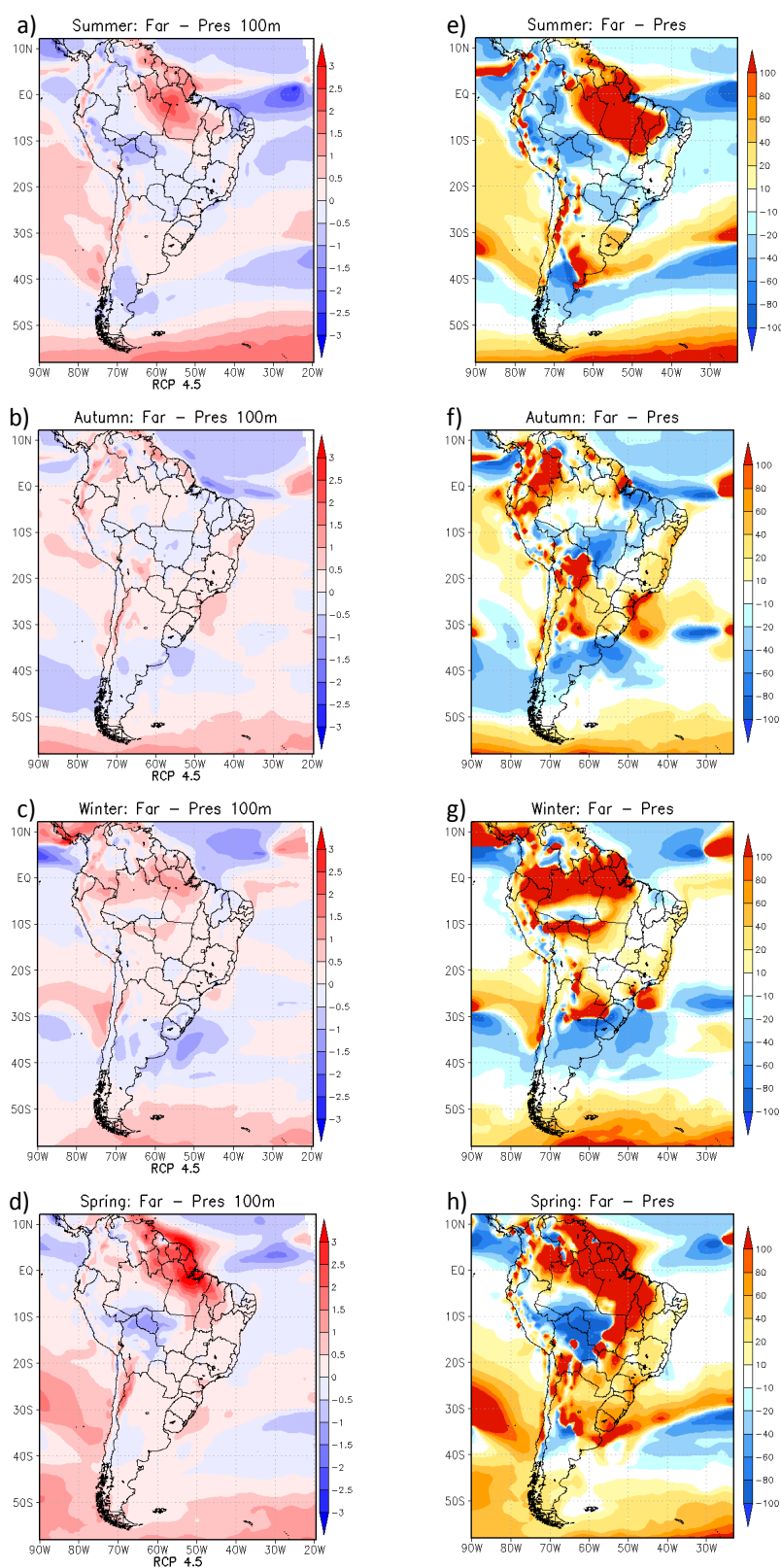


Figura 25 - Climatologia sazonal a 100 m no futuro distante (2070 – 2098), cenárioRCP4.5, da magnitude do vento (a) Verão : futuro distante – presente (b)Outono: futuro distante – presente (c) Inverno: futuro distante – presente (d) Primavera: futuro distante – presente e da densidade de potência (e) Verão : futuro distante – presente (f) Outono: futuro distante – presente (g) Inverno: futuro distante – presente (h)Primavera: futuro distante – presente

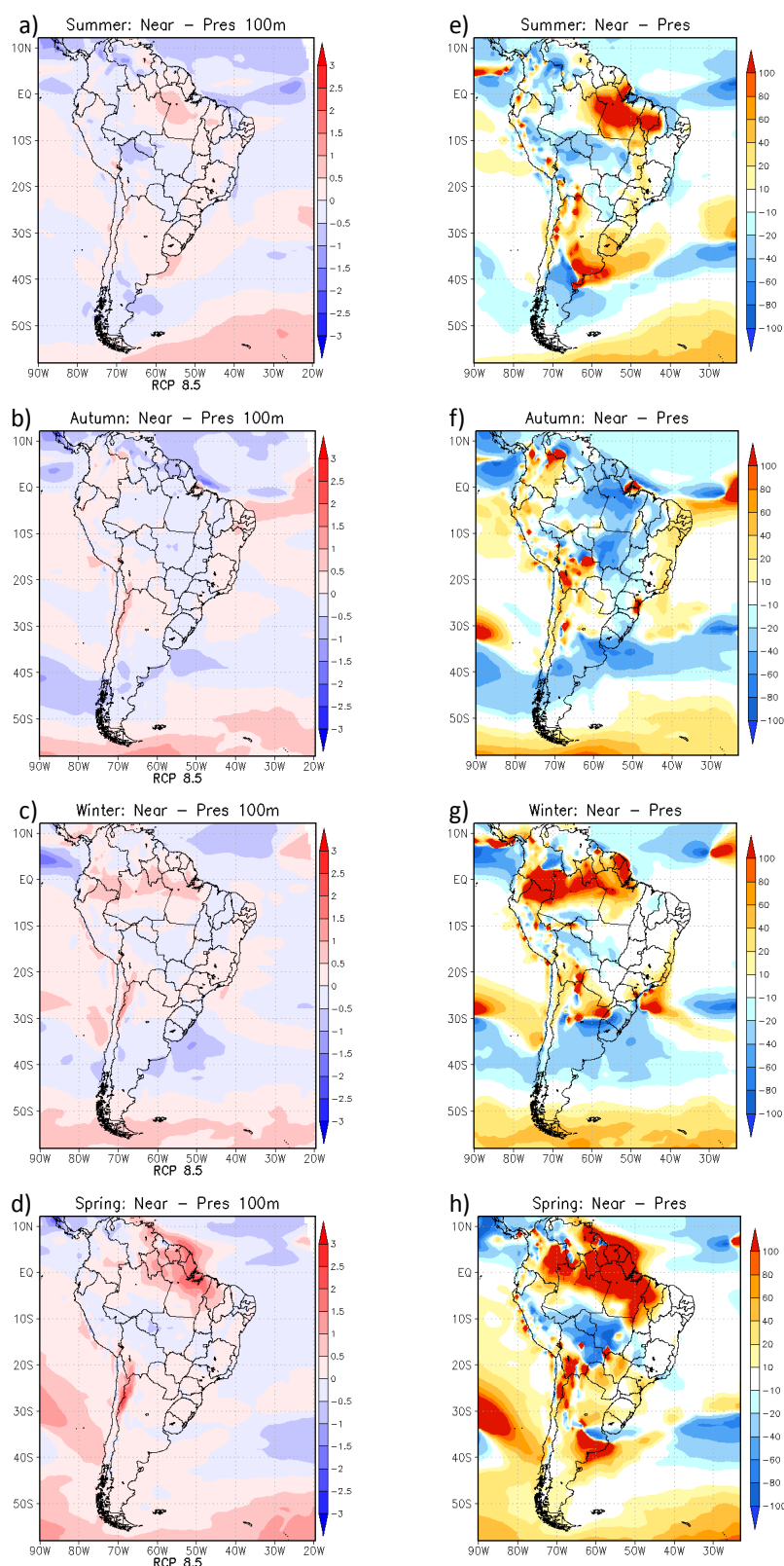


Figura 26 - Climatologia sazonal a 100 m no futuro próximo (2020 – 2050), cenário RCP8.5, da magnitude do vento (a) Verão : futuro próximo – presente (b)Outono: futuro próximo – presente (c) Inverno: futuro próximo – presente (d) Primavera: futuro próximo – presente e da densidade de potência (e) Verão: futuro próximo – presente (f) Outono: futuro próximo – presente (g) Inverno: futuro próximo – presente (h)Primavera: futuro próximo – presente

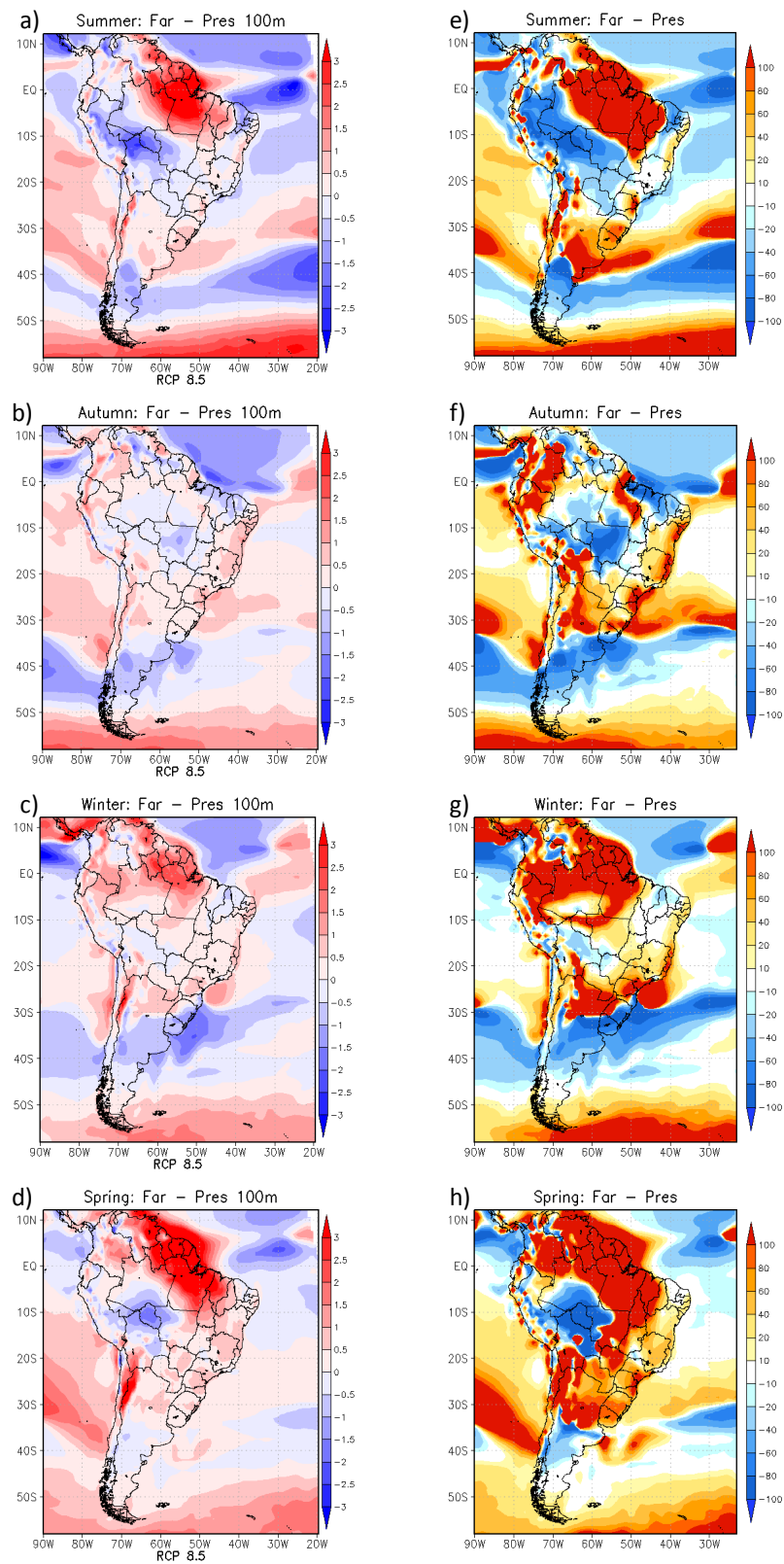


Figura 27 - Climatologia sazonal a 100 m no futuro distante (2020 – 2050), cenário RCP8.5, da magnitude do vento (a) Verão: futuro distante– presente (b)Outono: futuro distante – presente (c) Inverno: futuro distante – presente (d) Primavera: futuro distante – presente e da densidade de potência (e) Verão: futuro distante – presente (f) Outono: futuro distante – presente (g) Inverno: futuro distante – presente (h) Primavera: futuro distante – presente

4.3.2 Densidade de potência na Paraíba

Sendo o nordeste uma das regiões propícias para a geração de energia eólica (AMARANTE; ZACK; SÁ, 2001), para uma análise mais pontual da densidade de energia foram extraídas as séries temporais mensais da intensidade do vento a 10 metros de altura do ponto de grade escolhido em um parque eólico na Paraíba. Os dados foram extrapolados (equação 2) para a altura de 100 m, a fim de verificar possíveis mudanças na densidade de potência disponível nesses locais no clima futuro. A **Tabela 4** mostra a velocidade média sazonal e anual a 10 e 100 metros, bem como a DP.

Tabela4 - Velocidade de vento e densidade de potência correspondente na Paraíba considerando a expressão 2 para extrapolação e a 7 para densidade de potência.

Presente	ERA				RegCM			
	10m		100m		10m		100m	
	VV (m s ⁻¹)	DP (W m ⁻²)	VV (m s ⁻¹)	DP (W m ⁻²)	VV (m s ⁻¹)	DP (W m ⁻²)	VV (m s ⁻¹)	DP (W m ⁻²)
Verão	3,3	22,8	5,9	125,4	3,0	16,2	5,3	88,7
Outono	3,2	19,4	5,6	106,5	3,1	18,5	5,5	101,8
Inverno	4,3	50,1	7,7	274,6	4,2	44,4	7,4	243,4
Primavera	4,2	44,2	7,4	242,3	4,2	45,7	7,5	251,3
Média	3,8	32,4	6,6	177,5	3,6	29,0	6,4	159,3

RCP 4.5	Futuro Próximo				Futuro Distante			
	10m		100m		10m		100m	
	VV (m s ⁻¹)	DP (W m ⁻²)	VV (m s ⁻¹)	DP (W m ⁻²)	VV (m s ⁻¹)	DP (W m ⁻²)	VV (m s ⁻¹)	DP (W m ⁻²)
Verão	3,0	16,7	5,3	91,6	2,9	15,2	5,2	83,3
Outono	3,1	18,9	5,6	103,9	3,3	21,4	5,8	117,6
Inverno	4,3	48,4	7,6	265,3	4,5	54,2	7,9	297,2
Primavera	4,3	48,8	7,6	267,9	4,5	55,2	7,9	303,0
Média	3,7	30,7	6,5	168,2	3,8	33,1	6,7	181,7

RCP 8.5	Futuro Próximo				Futuro Distante			
	10m		100m		10m		100m	
	VV (m s ⁻¹)	DP (W m ⁻²)	VV (m s ⁻¹)	DP (W m ⁻²)	VV (m s ⁻¹)	DP (W m ⁻²)	VV (m s ⁻¹)	DP (W m ⁻²)
Verão	3,1	18,2	5,5	99,8	3,1	17,7	5,4	97,3
Outono	3,3	22,8	5,9	124,8	3,4	24,6	6,1	134,9
Inverno	4,3	48,5	7,6	266,3	4,6	60,4	8,2	331,4
Primavera	4,2	46,6	7,5	256,1	4,5	56,8	8,0	311,7
Média	3,7	32,1	6,6	176,1	3,9	36,6	6,9	201,0

É possível verificar na **Tabela 4** que os dados do RegCM e da ERA-Interim apresentam valores próximos de intensidade média do vento, sendo que, o RegCM4 subestima os valores em 0,1 e 0,2 m s⁻¹. Para o futuro, a 100 m, há aumento da intensidade do vento em ambos os cenários exceto no futuro distante durante o verão do

cenário RCP4.5 quando a intensidade diminui. No verão do cenário RCP4.5 e na primavera do cenário RCP8.5, no futuro próximo não há mudança da intensidade do vento. O aumento da intensidade do vento resultou no consequente aumento da DP.

A densidade de potência necessária para a criação de parques eólicos deve estar entre os valores de 300 e 400 W m⁻¹ (ELLIOTT, et al. 1986; GRUBB; MEYER, 1993; COYLE, 2011), independente da altura, no entanto os dados do presente estudo se apresentaram inferiores a estes valores no presente e futuro. Sendo assim, é importante destacar que as **figuras** 28, 29, 31 e 32 subestimam os valores de DP. Fato que pode estar associado com a resolução horizontal dos dados utilizados. Entretanto, isso não é um fator de impedimento para a realização da análise que segue pois o que se interesse é o conhecimento da tendência da DP no futuro.

As **figuras** 28, 29 e 30 mostram a média mensal da DP a 100 metros no ponto de grade escolhido na Paraíba no presente (1979 – 2005) dos dados da ERA-Interim, RegCM e a diferença entre estes, respectivamente.

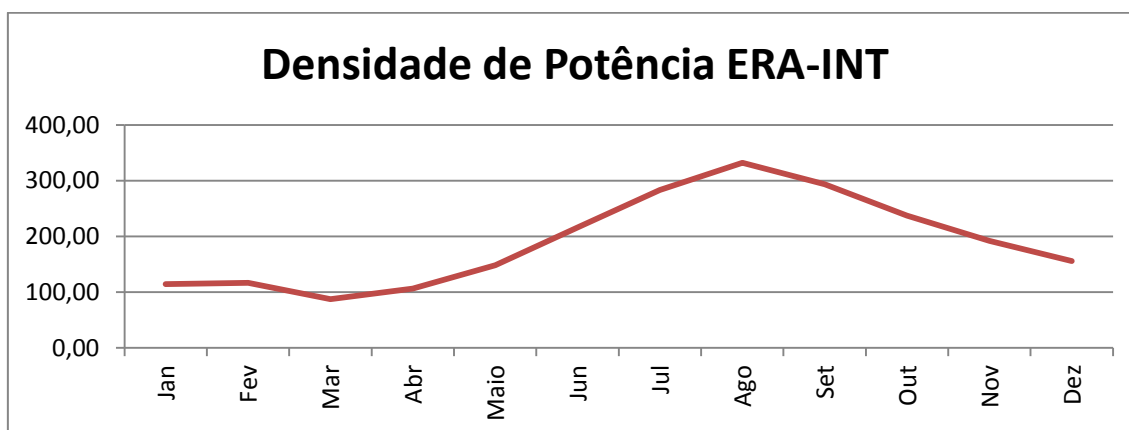


Figura 28 - Densidade de potência (W m^{-2}) dos dados da reanálise ERA-Interim, 75 km de resolução, no presente no ponto de grade na Paraíba

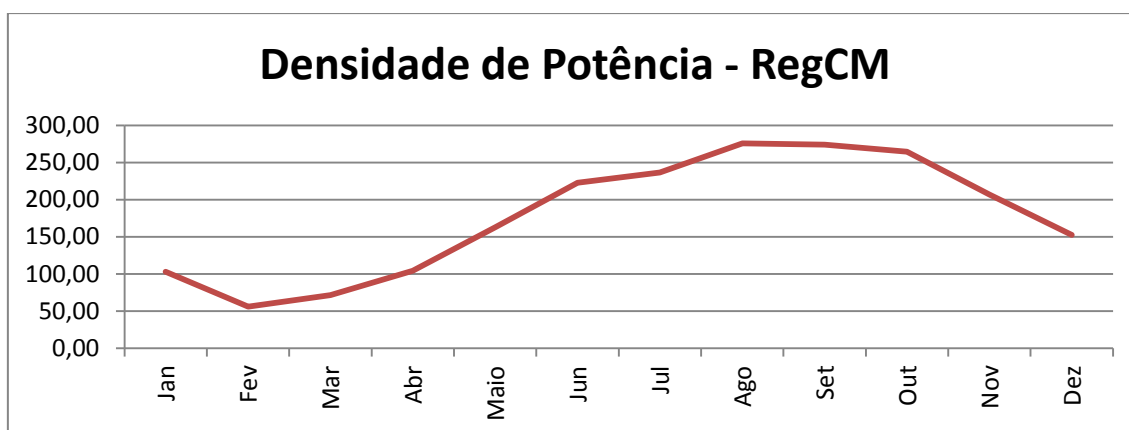


Figura 29 - Densidade de potência (W m^{-2}) dos dados do modelo RegCM4, 50 km de resolução, no presente no ponto de grade na Paraíba

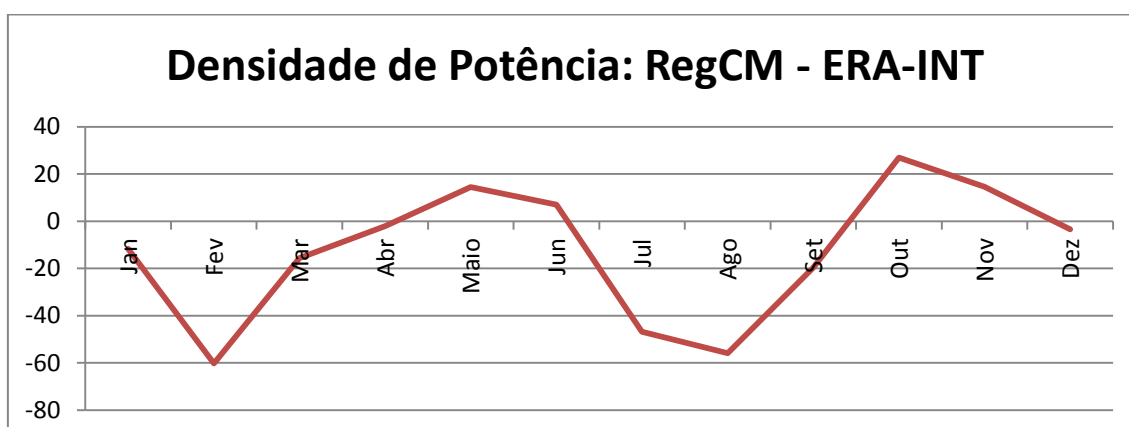


Figura 30 - Diferença da densidade de potência (W m^{-2}) entre os dados do modelo RegCM4 e da reanálise ERA-Interim no presente no ponto de grade na Paraíba

Os dados da ERA-Interim (**figura 28**) mostram oscilação da DP entre 87 e 331 W m^{-2} e que os períodos dos maiores valores de DP ocorrem de junho a novembro, sendo que o mês de agosto é o que apresenta a maior média. No entanto, RegCM (**figura 29**) mostra oscilação da DP entre 56 e 275 W m^{-2} e os valores de DP são maiores de maio a dezembro.

Nota-se que o RegCM4 (**figura 30**) superestima as DP de meados de abril a meados de junho e de outubro a meados de dezembro e subestima no restante dos períodos.

O futuro próximo (**figura 31a**) exhibe oscilação da DP entre 66 e 295 W m^{-2} e o futuro distante (**figura 31c**) oscilação entre 62 e 356 W m^{-2} , sendo que nos dois períodos o aumento de DP inicia em abril e atinge as maiores médias em setembro. Para o futuro distante (**figura 31d**) a diferença entre este período e o presente mostra aumento da DP para todo o ano, salvo em janeiro quando a DP esta negativa.

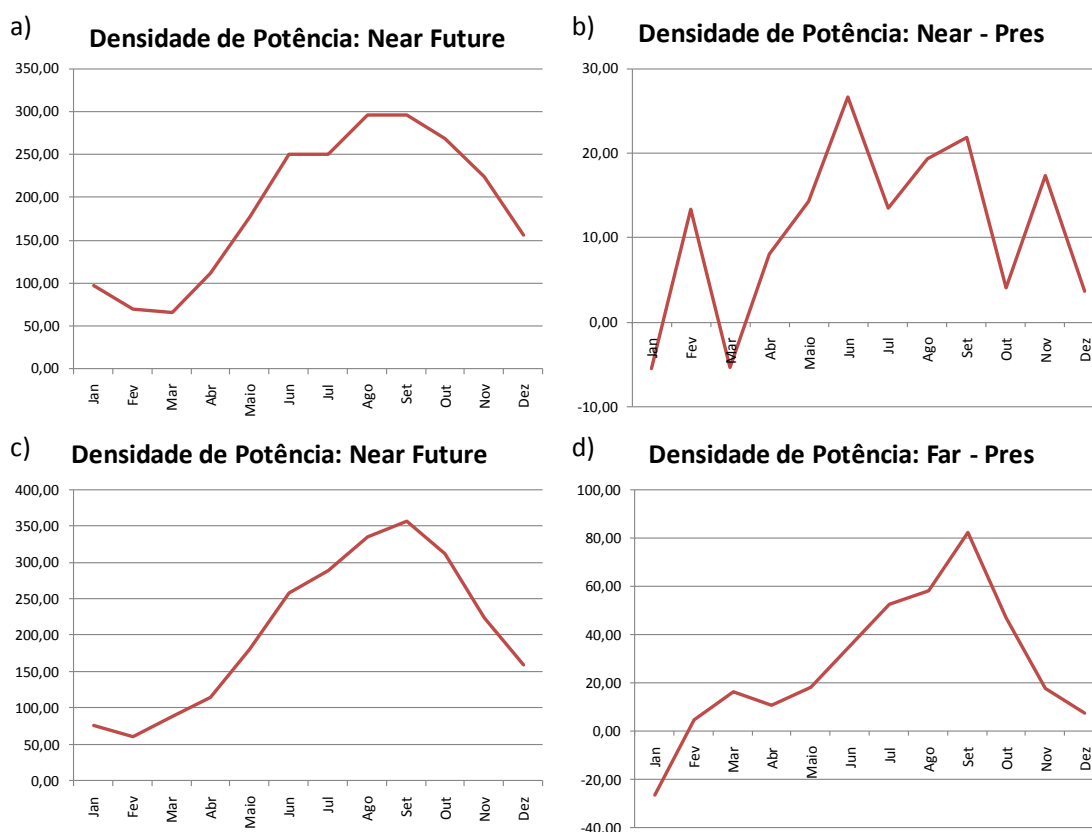


Figura 31 - Densidade de Potência (W m^{-2}) com os dados do modelo RegCM4, cenário RCP4.5, no ponto de grade na Paraíba: (a) futuro próximo (b) futuro próximo - presente (c) futuro distante (d) futuro distante - Presente

A **figura 32** apresenta a DP no cenário RCP8.5 no futuro próximo, no futuro distante e a diferença entre estes dois períodos e o presente. O futuro próximo (**figura 32a e b**) apresenta valores de DP entre 62 e 305 W m^{-2} , já o futuro distante (**figura 32c**) exibe DP entre 71 e 367 W m^{-2} , para os dois períodos agosto é o mês de maior valor médio de DP e fevereiro o de menor valor médio.

As diferenças apresentadas também na **figura 31** que o aumento de DP ocorre em todo o ano, salvo em outubro do futuro próximo e dezembro do futuro distante, quando os os valores de DP apresentam decréscimo. O aumento da DP neste ponto da Paraíba condiz com aumento também apresentado por Pereira et al. (2012), embora, o aumento apresentado por este seja maior na primavera, e neste estudo no inverno. As linhas detendência, **figura 33**, mostram claramente o aumento da densidade de potência no cenário RCP8.5.

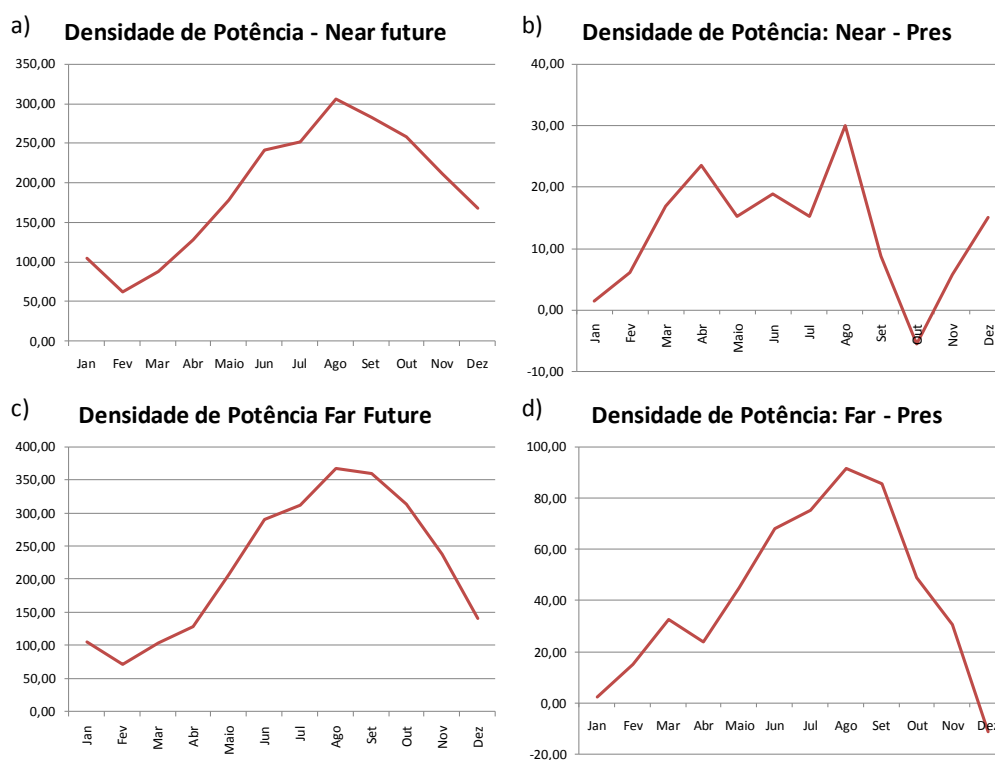


Figura 32 - Densidade de Potência (W m^{-2}) com os dados do modelo RegCM4, cenário RCP8.5, no ponto de grade na Paraíba: (a) futuro próximo (b) futuro próximo - presente (c) futuro distante (d) futuro distante – Presente

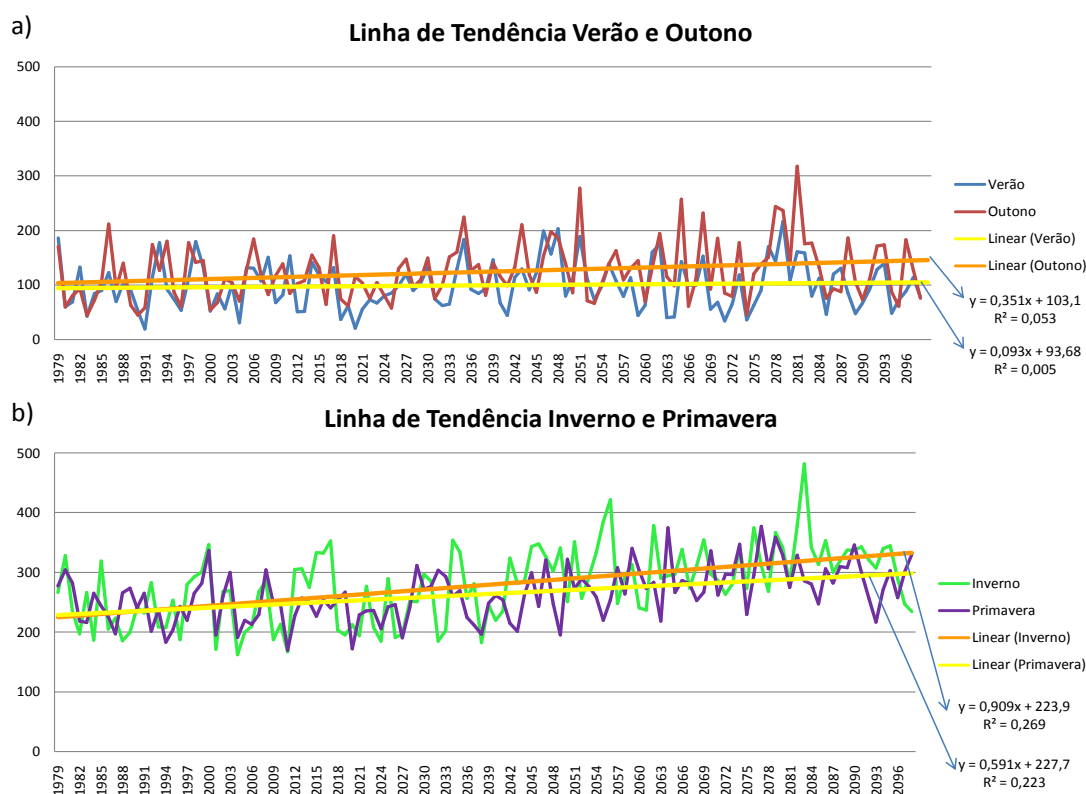


Figura 33 - Linha de tendência no ponto de grade na Paraíba no futuro distante, cenário RCP8.5

A linha de tendência para cada estação pode ser vista na **figura 33**. Para verificar se as tendências são ou não estatisticamente significativas aplicou-se o teste de Man-Kendall. Com isso a tendência do verão não é significativa enquanto as das demais estações do ano são positivas e significativas.

4.3.3 Densidade de potência do Rio Grande do Sul

Também a fim de verificar possíveis mudanças na densidade de potência disponível no clima futuro para ponto de grade escolhido em um parque eólico no Rio Grande do Sul, foram extraídas as séries temporais mensais da intensidade do vento a 10 metros de altura e estas foram então extrapoladas (equação 2) para a altura de 100 metros.

Garbe, Melli e Tomaselli (2011) estudaram a região próxima à área de estudo e destacaram que a região é propícia para investimento em energia eólica, embora o estudo fosse sobre uma lagoa, o fato de ser uma área praticamente plana torna possível esta aproximação, portanto, com propagação de vento favorável para a energia eólica.

A **Tabela 5** mostra a velocidade média sazonal e anual a 10 e 100 metros, bem como a DP. Sendo que a velocidade do vento a 100 metros foi calculada utilizando a expressão 2 (seção 3.3) e para o cálculo da DP, a expressão 7 (seção 3.4).

A intensidade média do vento no Rio Grande do Sul pode ser vista na **Tabela 5** e é possível verificar que os dados do RegCM e da ERA-Interim apresentam valores próximos de intensidade média do vento exceto no inverno quando os valores do RegCM a 100 m estão $2,1 \text{ m s}^{-1}$ acima dos da ERA-Interim. Para o futuro próximo, a 100 m, há aumento de intensidade do vento no verão e outono para ambos os cenários e diminuição no inverno.

Tabela5 - Velocidade de vento e densidade de potência correspondente no Rio Grande do Sul. Considerando a expressão 2 para extrapolação e a 7 para densidade de potência

Presente	ERA				RegCM			
	10m		100m		10m		100m	
	VV (m s^{-1})	DP (W m^{-2})	VV (m s^{-1})	DP (W m^{-2})	VV (m s^{-1})	DP (W m^{-2})	VV (m s^{-1})	DP (W m^{-2})
Verão	2,4	8,1	4,2	44,4	2,5	9,5	4,4	52,0
Outono	1,4	1,5	2,4	8,4	1,7	2,8	2,9	15,5
Inverno	1,1	0,8	1,9	4,3	2,3	7,0	4,0	38,4
Primavera	1,8	3,6	3,2	19,9	1,7	3,1	3,0	17,1
Média	1,7	2,8	2,9	15,2	2,0	5,1	3,6	28,2

RCP 4.5	Futuro Próximo				Futuro Distante			
	10m		100m		10m		100m	
	VV (m s^{-1})	DP (W m^{-2})	VV (m s^{-1})	DP (W m^{-2})	VV (m s^{-1})	DP (W m^{-2})	VV (m s^{-1})	DP (W m^{-2})
Verão	2,5	9,9	4,5	54,5	2,7	11,5	4,7	62,8
Outono	1,7	2,9	3,0	15,9	1,6	2,4	2,8	13,2
Inverno	2,0	5,1	3,6	27,8	2,0	4,8	3,5	26,2
Primavera	1,5	2,2	2,7	12,1	1,9	3,9	3,3	21,5
Média	1,9	4,5	3,4	24,6	2,0	5,0	3,6	27,6

RCP 8.5	Futuro Próximo				Futuro Distante			
	10m		100m		10m		100m	
	VV (m s^{-1})	DP (W m^{-2})	VV (m s^{-1})	DP (W m^{-2})	VV (m s^{-1})	DP (W m^{-2})	VV (m s^{-1})	DP (W m^{-2})
Verão	2,7	11,5	4,7	62,9	2,8	13,7	5,0	75,2
Outono	1,7	2,9	3,0	16,1	1,7	2,9	3,0	16,2
Inverno	2,0	4,8	3,5	26,5	1,7	3,1	3,0	16,9
Primavera	1,7	2,9	3,0	15,8	1,8	3,4	3,3	21,5
Média	2,0	4,9	3,5	27,0	2,0	4,9	3,1	18,7

A densidade de potência a 100 metros no ponto de grade no Rio Grande do Sul no presente dos dados da Era-Interim, RegCM e a diferença entre estes, são apresentados nos **figuras 34, 35 e 36**.

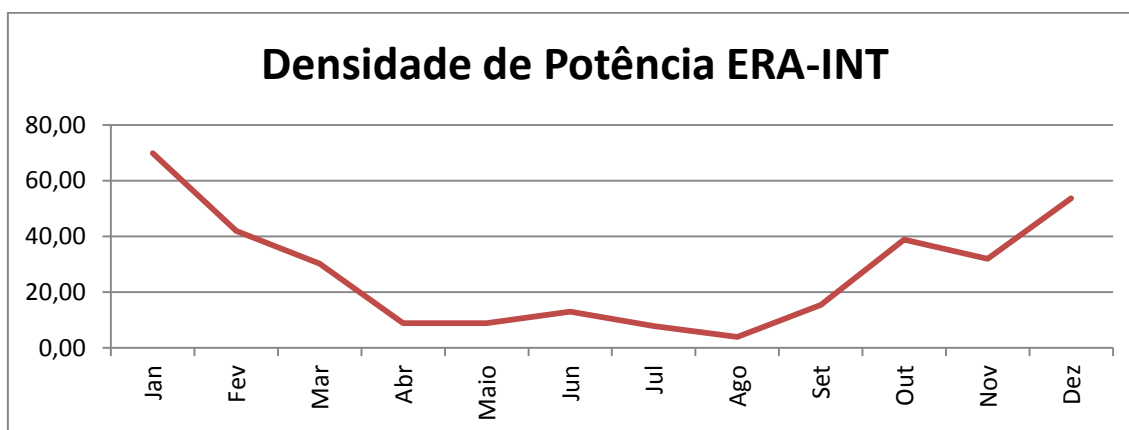


Figura 34 - Densidade de Potência (W m^{-2}) dos dados da reanálise ERA-Interim, 75 km de resolução, no presente no ponto de grade no Rio Grande do Sul

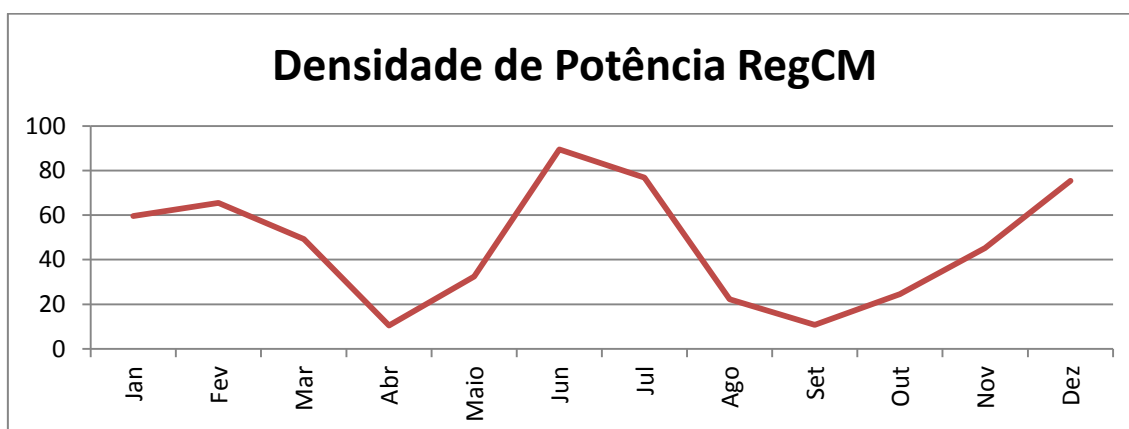


Figura 35 - Densidade de Potência (W m^{-2}) dos dados do modelo RegCM4, 50 km de resolução, no presente no ponto de grade do Rio Grande do Sul

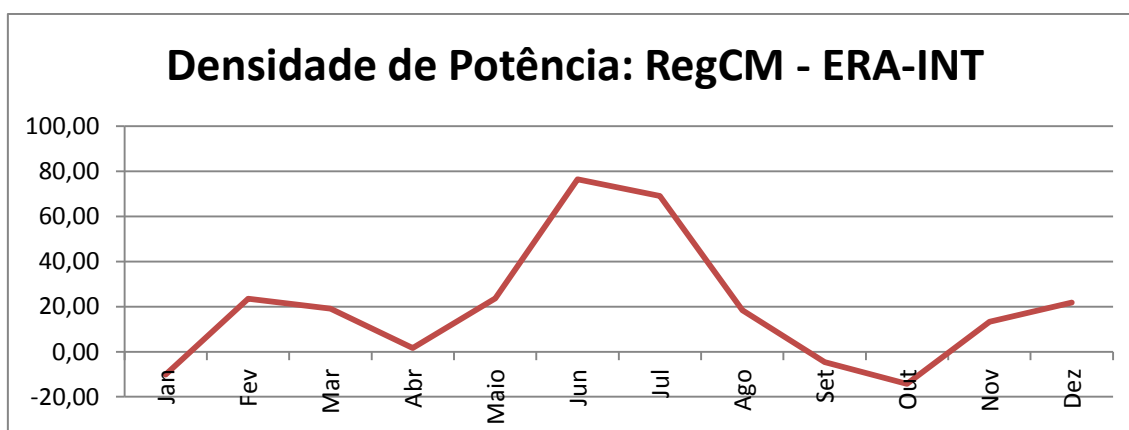


Figura 36 - Diferença da densidade de potência (W m^{-2}) entre os dados do modelo RegCM4 e da reanálise ERA-Interim no presente no ponto de grade do Rio Grande do Sul

Os dados do Rio Grande do Sul no presente apresentam oscilação e densidade de potência menor que na Paraíba e a DP é ainda mais subestimada. Como mostra na **figura 34**, os dados da Era-Interim exibe valores entre 3 e 69 W m^{-2} , e os dados do RegCM (**figura 35**), com valores maiores do que da ERA-Interim, exibe valores entre 10 e 76 W m^{-2} . O RegCM4 subestimou a DP em janeiro e entre setembro e outubro e superestimou no restante tempo.

A **figura 37** exibe a DP do cenário RCP4.5 para o futuro próximo, futuro distante e a diferença dos futuros menos o presente. As **figura 37a** e **figura 37c** apresentam valores entre 6 e 75 W m^{-2} e 6 e 91 W m^{-2} , o que mostra uma diminuição da DP, tal fato pode ser melhor visto nas **figura 37b** e **d**, que exibe diminuição da DP na maioria dos meses.

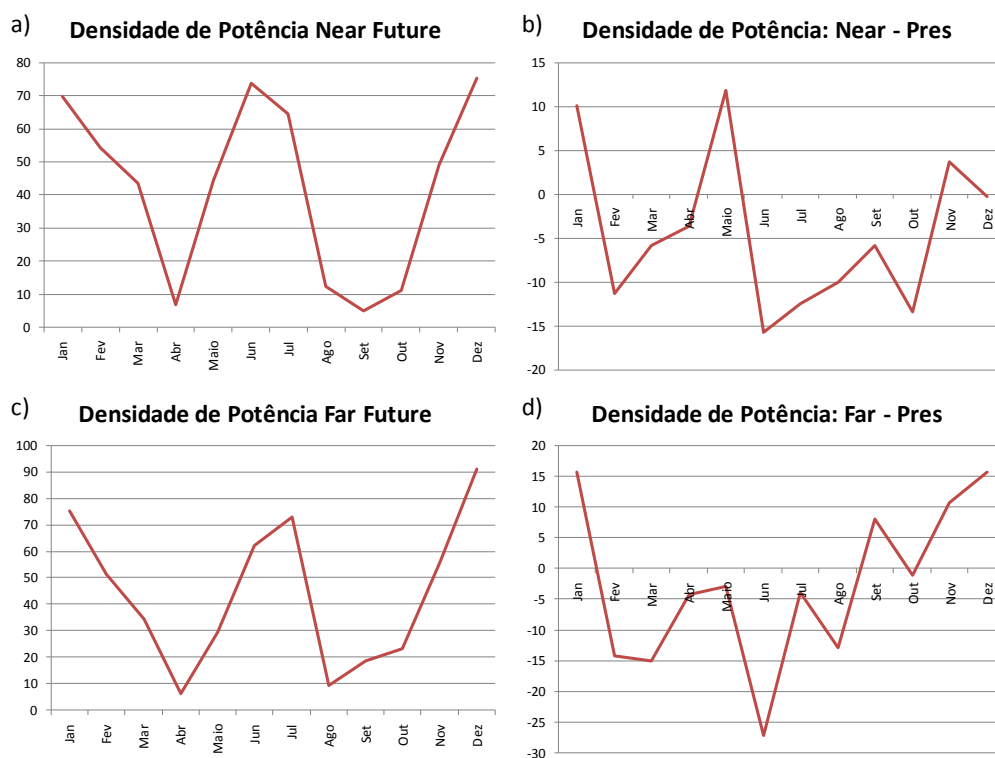


Figura 37 - Densidade de Potência (W m^{-2}) com os dados do modelo RegCM4, cenário RCP4.5, no ponto de grade no Rio Grande do Sul: (a) futuro próximo (b) futuro próximo - presente (c) futuro distante (d) futuro distante - Presente

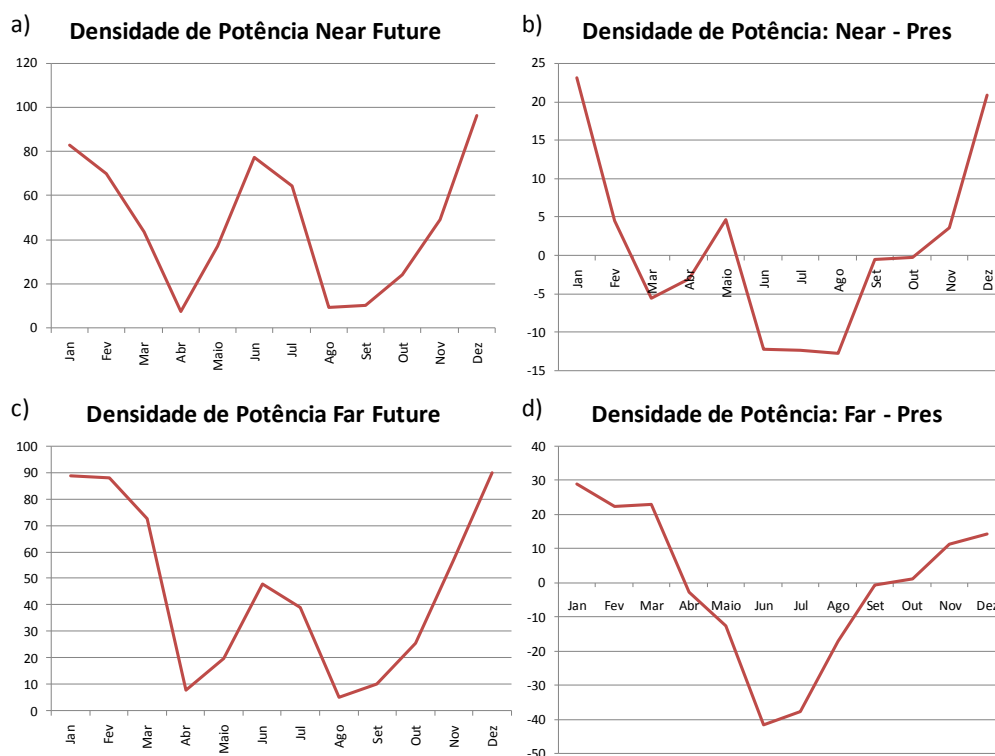


Figura 38 - Densidade de Potência ($W m^{-2}$) com os dados do modelo RegCM4, cenário RCP8.5, no ponto de grade no Rio Grande do Sul: (a) futuro próximo (b) futuro próximo - presente (c) futuro distante (d) futuro distante - Presente

Para o cenário RCP8.5 (**figura 38**) o futuro próximo exibe valores entre 7 e 96 $W m^{-2}$ e o futuro distante valores entre 5 e 89 $W m^{-2}$. A diferença entre o futuro e o presente mostra que no inverno é o período de decréscimo de DP o que não condiz com o que foi apresentado por Pereira et al, (2012) que encontrou em seus resultados, no futuro distante (2070 a 2198) leve decréscimo de DP no verão e leve aumento nas demais estações. Esta diferença pode ser justificada como já mencionado, pela diferença espacial e resolução dos dados utilizados.

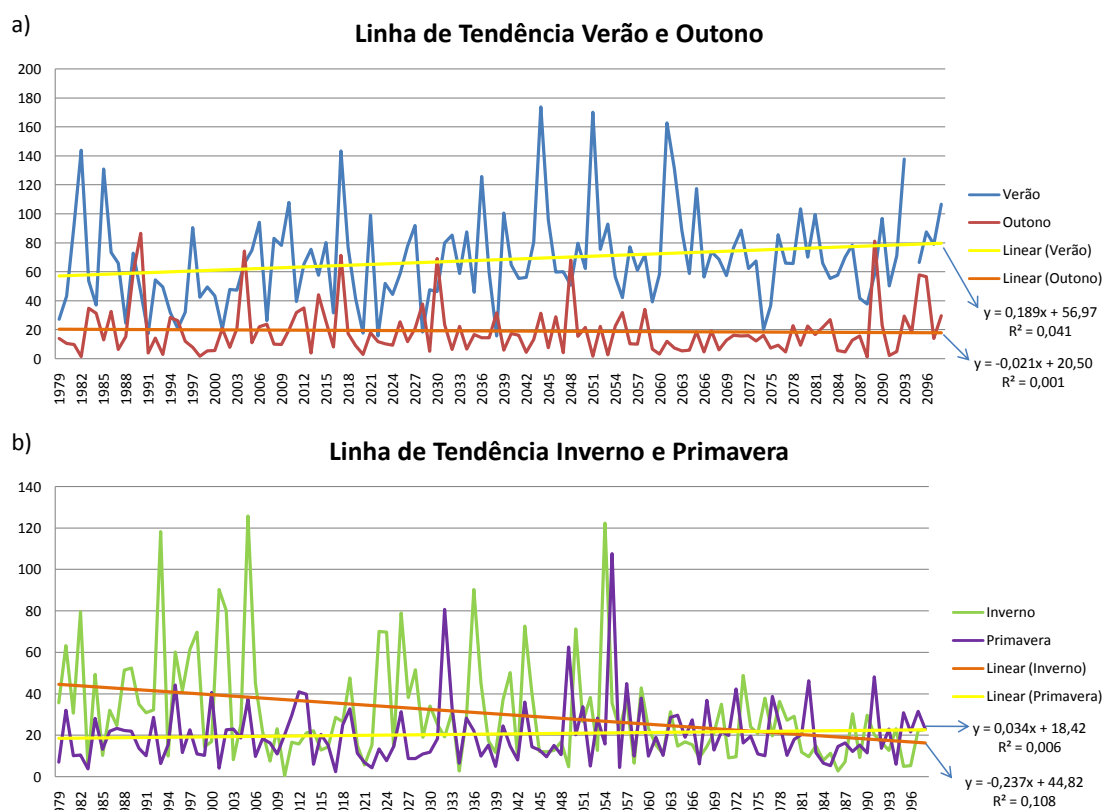


Figura 39 - Linha de tendência no ponto de grade no Rio Grande do Sul no futuro distante, cenário RCP8.5

A linha de tendência para cada estação pode ser vista na **figura 39** e com o teste de Man-Kendall, verificou-se que no verão a tendência é positiva e significativa, no inverno negativa e significativa e sem significância estatística no outono e primavera.

4.4 COMPLEMENTARIEDADE DE ENERGIA

No Brasil as hidroelétricas são as principais responsáveis pela a geração de energia. Neste contexto a comparação do regime de precipitação com o dos ventos sobre a AS torna-se importante para se conhecer as melhores épocas para que a energia eólica seja objeto de complementaridade no fornecimento da energia.

Para o presente (1979 – 2005), a **figura 40** mostra que o verão é o período de maior precipitação em grande parte do Brasil e que os valores de intensidade do vento são mais baixos, com exceção do nordeste onde os ventos chegam a 4 m s^{-1} e a precipitação é menor.

No inverno, quando a precipitação decresce principalmente na região central da AS, a intensidade do vento sobre o continente aumenta, sendo mais intensa no nordeste e em seguida na área central. No sul do Brasil, para o mesmo período, a intensidade dos ventos não muda muito e esta constatação pode estar associada com o fato da precipitação não diminuir tanto como ocorre na área central do Brasil.

No futuro distante (**figura 41**, cenário RCP8.5) há no verão intensificação dos alísios e diminuição da precipitação no norte do Brasil. O mesmo ocorre durante o inverno, porém em menor proporção. Também no verão ocorre aumento de precipitação e enfraquecimento dos ventos sobre a região central da AS. No sul do Brasil os ventos que incidem a região quase não se alteram, no entanto há aumento de precipitação.

No inverno (**figura 41**) a precipitação aumenta e os ventos perdem intensidade no sul do Brasil e no sudeste, também do Brasil, as mudanças são amenas para as duas variáveis. Os JBN a leste dos Andes se intensificam enquanto a precipitação diminui de forma amena.

Chadee e Clarke (2014) observaram que em geral a DP é melhor nos meses mais secos. No presente estudo o mesmo ocorre, sabendo que o aumento da DP se assemelha ao aumento da intensidade do vento (seção 4.3), é possível dizer que a DP é melhor nos meses mais secos (**figura 40 e 41**).

Os resultados da análise da variação da precipitação e dos ventos indicam que em termos de gerenciamento da disponibilidade de recursos hídricos a energia eólica pode ser oportuna para a elaboração de um sistema em que as duas fontes interagem.

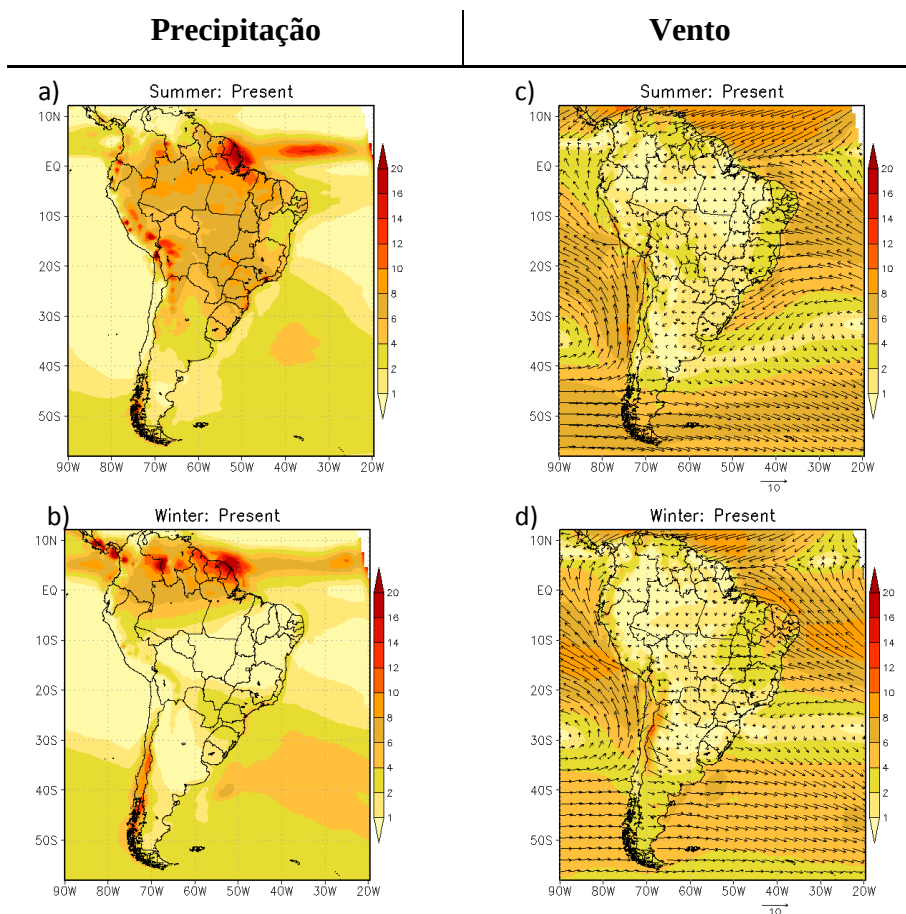


Figura 40 - Climatologia da América do Sul no presente (1979-2005) da precipitação (a) Verão (b) Inverno e dos ventos (c) Verão (d) Inverno. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude do vento

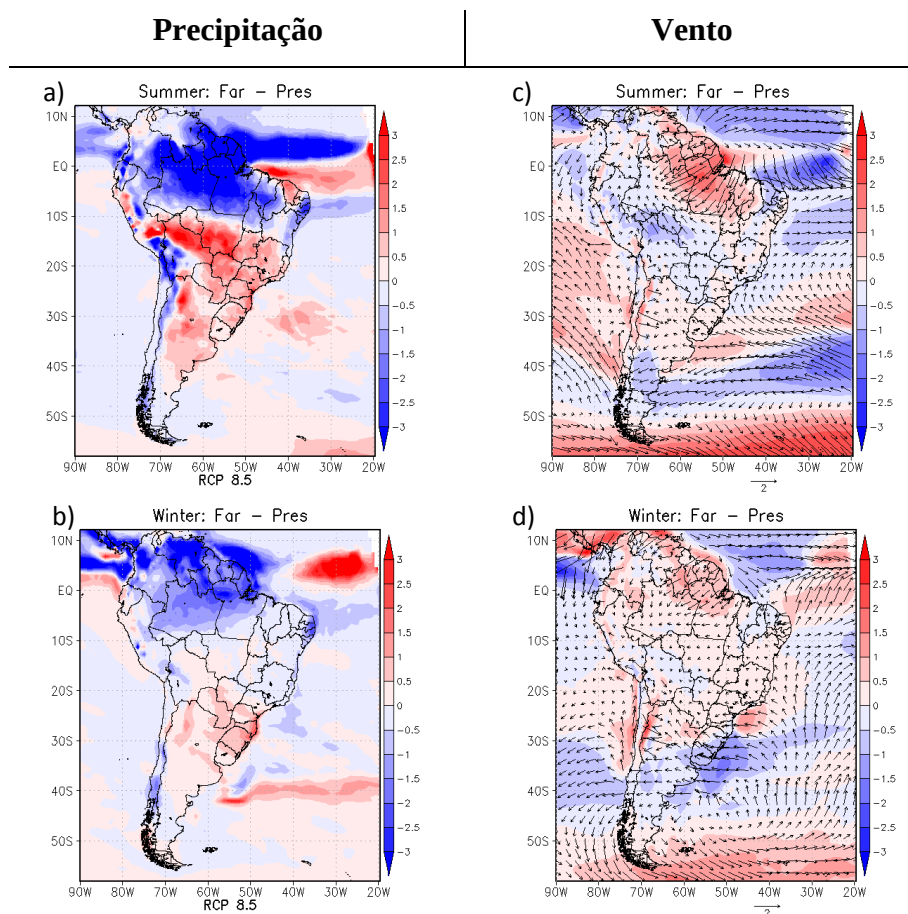


Figura 41 - Climatologia da América do Sul do futuro distante (2070-2098) menos o presente (1979 – 2005), cenário RCP8.5, da precipitação (a)Verão (b) Inverno e dos ventos (c) Verão (d) Inverno. Vetores indicam a direção do vento e as cores a magnitude

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada a análise dos ventos no presente (1979-2005) e em dois períodos futuros (2020-2050 e 2070-2098), na América do Sul, nos cenários RCP4.5 e 8.5 utilizando o modelo regional RegCM4.

Para a validação da simulação no clima presente utilizou-se a reanálise ERA-Interim e dados de 15 estações meteorológicas espalhadas pelo Brasil. Os dados da simulação do RegCM4 apresentam padrão espacial similar aos da ERA-Interim, mas há diferença na intensidade dos ventos. O modelo simula o ASPS mais intenso durante o inverno e enfraquecido na primavera. O ASAS e os JBNs são mais intensos em todas as estações. Já os ventos alísios são mais intensos no verão do equador até 10°N, e mais fracos na região norte e nordeste.

Em comparação com os dados das estações do INMET a simulação apresentou melhores resultados nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Em oito estações os valores da simulação estão acima dos dados do INMET e em cinco delas o ciclo anual não apresenta semelhanças.

Os ventos a 100 metros de altura, correspondente a altura dos aerogeradores, são em média 2ms^{-1} mais intensos do que os ventos a 10 metros de altura.

Os cenários RCP4.5 e RCP8.5, a 10 e 100 metros, indicam que haverá enfraquecimento (fortalecimento) dos ventos alísios no Oceano Atlântico (norte do Brasil), mas durante o verão e primavera o ASPS será mais intenso e o ASAS estará deslocado para oeste, sobre o continente, durante o inverno. Já os JBNs apresentam-se mais intensos em todas as estações.

A DP foi analisada sobre toda a AS no futuro comparado ao presente e em dois pontos: nordeste e sul do Brasil. Verificou-se que o modelo subestima a DP, mas isso não inviabiliza o estudo, pois o importante são as tendências. No nordeste há tendência positiva e significativa nas estações outono, inverno e primavera. No sul do Brasil a tendência é positiva e significativa apenas no verão.

Para o futuro (cenário RCP 8.5) a DP aumentará em mais de 100% na região norte da AS no inverno e primavera. O litoral do nordeste apresenta aumento em média 40% em todas as estações, já no sul do Brasil há decréscimo apenas no inverno e aumento nas demais estações.

Na análise da complementaridade de energia entre precipitação e vento, de modo geral, em épocas com maior precipitação no Brasil a intensidade do vento é menor, o contrário ocorre em épocas de pouca chuva, em que os ventos são mais intensos. Para o futuro no verão a análise apresentou no nordeste do Brasil redução da precipitação no Maranhão, Piauí e na região costeira e aumento no Ceará e oeste do Rio Grande do Norte e no inverno apresentou apenas redução em toda a região. Já os ventos para as mesmas épocas e regiões apresentam exatamente o contrário da precipitação. No sul durante o verão e inverno há aumento de precipitação, porém enquanto os ventos no inverno enfraquecem no verão a pequena intensificação.

Este estudo contribui para o conhecimento dos ventos de superfície na AS no presente e em dois períodos futuros baseados nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 do IPCC. Além de dar possibilidade para planejamento na área de energia eólica.

Como sugestões para trabalho futuro têm se: o cálculo da DP com dados de estações meteorológicas; e fazer a análise dos ventos usando outros modelos climáticos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Matriz Energética do Brasil**. Jul. de 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidade-brasil/OperacaoGeracaoTipo.asp?tipo=7&ger=Outros&principal=E%C3%B3lica>>. Acesso em: jul. 2015.

AMARANTE, O. A.; BROWER, M.; ZACK, J. Atlas do potencial eólico brasileiro. In: **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Eolica, C. S. E., & Solutions, T Ministerio de Minas e Energia Eletrobras, 2001.

ARCHER, C. L.; JACOBSON, M. Z. Evaluation of global wind power. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, v. 110, n. D12, 2005.

ATLAS EÓLICO: BAHIA / elaborado por Camargo-Schubert Engenheiros Associados... [et a l.]; dados do modelo mesoescala fornecidos por AWS Truepower.— Curitiba: Camargo Schubert; Salvador : SECTI : SEINFRA: CIMATEC/ SENAI, 96 p. 2013.

ATLAS EÓLICO: RIO GRANDE DO SUL / elaborado por Camargo-Schubert Engenheiros Associados, Eletrosul Centrais Elétricas S.A.; dados do modelo mesoescala fornecidos por AWS Truepower.— Porto Alegre: SDPI: AGDI, 116 p. 2014.

ASSIREU, A.; PIMENTA, F.; SOUZA, V. Assessment of the wind power potential of hydroelectric reservoirs. **Energy Resources: Development, Distribution and Exploitation**. Nova Science Publishers, 2011.

BEZERRA, M. B. M. H.; MELO, C. D. S. M.; ARAUJO N. M. M.; MESQUITA, T. D. P. N. Estudo analítico do processo licitatório ambiental para empreendimentos eólicos no estado do rio grande do norte. **HOLOS**, v. 2, p. 34-49, 2013.

CHADEE, X. T.; CLARKE, R. M. Large-scale wind energy potential of the Caribbean region using near-surface reanalysis data. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 45-58, 2014.

CLIFF, W. C. **Effect of generalized wind characteristics on annual power estimates from wind turbine generators**. Battelle Pacific Northwest Labs., Richland, WA (USA), 1977.

COYLE, F. **Introduction To Wind Power** -World Technologies 1. ed. Darya Ganj, Delhi: The English Press (2011)

CUSTÓDIO, S. R. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. Eletrobrás, 2009.

DA ROCHA, R. P.; CUADRA, S. V.; REBOITA, M. S.; KRUGER, L. F.; AMBRIZZI, T.; KRUSCHE, N. Effects of RegCM3 parameterizations on simulated rainy season over South America. **Climatic Research** p. 253–265, 2012.

DA ROCHA, R. P.; REBOITA, M. S.; DUTRA, L. M. M.; LLOPART, M. P.; COPPOLA, E. Interannual variability associated with ENSO: present and future climate projections of RegCM4 for South America-CORDEX domain. **Climatic Change**, p. 1-15, 2014.

DEE, D. P.; UPPALA, S. M., SIMMONS, A. J., BERRISFORD, P., POLI, P., KOBAYASHI, S., ...& VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.

Elliott, D.L.; Holladay, C.G.; Barchet, W.R.; Foote, H.P.; Sandusky, W.F. **Wind Energy Resource Atlas of the United States**. Colorado, EUA, 1986. Disponível em: <http://rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/atlas_index.html>. Acesso em: jun. 2015

FEITOSA, E. A. N. et al. **Panorama do Potencial Eólico no Brasil**. Brasília: Dupligráfica, 2003.

GARBE, E. A.; MELLO, R.; TOMASELLI, I. Projeto conceitual e análise de viabilidade econômica de unidade de geração de energia elétrica eólica na Lagoa dos Patos-RS. **Economia and Energia**, v. 83, p. 24-48, 2011. Disponível em: <http://ecen.com/eee83/eee83p/viabilidade_energia_eolica.htm>

GARREAUD, R.D.; FALVEY, M. The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. **International Journal of Climatology**, Hoboken, v. 29, n. 4, p. 543-554, 2009.

GIORGI, F., COPPOLA, E., SOLMON, F., MARIOTTI, L., SYLLA, M. B., Bi, X., ELGUINDI, N., DIRO, G. T., Nair, V., GIULIANI G., TURUNCOGLU, U. U., COZZINI, S., GÜTTLER, I. T., O'BRIEN A., TAWFIK, SHALABY, A. B., A., Zakey, A. S., STEINER, A. L., STORDAL, F., L. C. SLOAN, C., BRANKOVIC, C. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. **Climate Research**, v. 2, n. 7, 2012.

GIORGI, F.; MARINUCCI, M. R.; BATES, G. T. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes. **Monthly Weather Review**, v. 121, n. 10, p. 2794-2813, 1993.

GRUBB, M. J.; MEYER, N. I. Wind energy: resources, systems and regional strategies. In: JOHANSSON, T. B. et. al. Renewable energy: sources for fuels and electricity. Washington, D.C.: Island Press, 1993.

HIPEL, Keith W.; MCLEOD, A. Ian. **Time series modelling of water resources and environmental systems**. Elsevier, 1994.

HOUGHTON, J. T.; CALLANDER, B. A. **Climate change 1992: the supplementary report to the IPCC scientific assessment**. Cambridge University Press, 1992.

IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES), NAKICENOVIC, N., ALCAMO, J., DAVIS, G., DE VRIES, B., FENHANN, J., GAFFIN, S., GREGORY, K., GRÜBLER, A. ET AL. : Special Report on Emissions Scenarios, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, 595 pp, 2000. Disponível em: <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm> Acesso em: 24 mar 2015

JONES, C. D.; HUGHES, J. K.; BELLOUIN, N.; HARDIMAN, S. C.; JONES, G. S.; KNIGHT, J.; LIDDICOAT, S.; O'CONNOR, F. M.; ANDRES, R. J.; BELL, C.; BOO, K. O.; BOZZO, A.; BUTCHART, N.; CADULE, P.; CORBIN, K. D.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GORNALL, J.; GRAY, L. P.; HALLORAN, R.; HURTT, G.; W. INGRAM, J.; LAMARQUE, J. F.; LAW, R. M.; MEINSHAUSEN, M.; OSPREY, S. E.; PALIN, J.; CHINI, L. P.; RADDATZ, T.; SANDERSON, M. G.; SELLAR, A. A.; SCHURER, A.; VALDES, P.; WOOD, N.; WOODWARD, S.; YOSHIOKA, M.; ZERROUKAT, M. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 543-570, 2011

KENDALL, M. G. **Rank correlation measures**. London: Charles Griffin. 220p. 1975.

KRÜGER, L. F.; ROCHA R. P.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. RegCM3 nested in HadAM3 scenarios A2 and B2: projected changes in extratropical cyclogenesis, temperature and precipitation over the South Atlantic Ocean. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 113, n. 3-4, p. 599-621, 2012.

LIMA, F. J. L.; CAVALCANTI, E. P.; DE SOUZA, E. P. Avaliação do Potencial Eólico em Cinco Regiões do Estado da Paraíba. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 27, n. 1, p. 138-153, 2010.

LLOPART, M.; COPPOLA, E.; GIORGI, F., DA ROCHA, R. P., & CUADRA, S. V. Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins. **Climatic change**, v. 125, n. 1, p. 111-125, 2014

MANN, H. B. Econometrica. **The Econometric Society**, v.13, n.3, p.245-259, 1945.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. Wind energy explained. 2. Ed New York: Wiley, 2002. 569 p.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P.; ALVES, M. L.; CUANDRA, S. V.; VALVERDE, M. C.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. C.; FERRAZ, S. E. T. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, New York, v. 35, n. 6, p. 1073-1097, 2010.

MARENGO, J. A.; CHOU S. C.; KAY G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins. **Climate Dynamics**, New York, v. 38, n. 9-10, p. 1829-1848, 2012.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, p. 1304, 2008.

MOLLY, J. P. Perspectivas da Energia Eólica no Mundo e no Brasil Questões técnicas, econômicas e políticas. DEWI, Instituto Alemão de Energia Eólica Ltda. Seminário Internacional de Energias Renováveis, Brasília, Brasil. 2006.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Wind Data Details**. 2014Disponível em: <http://www.nrel.gov/gis/wind_detail.html>. Acesso em: jun. 2015

NUNEZ, M. N.; SOLMAN, S. A.; CABRÉ, M. F. Regional climate change experiments over southern South America. II: Climate change scenarios in the late twenty-first century. **Climate Dynamics**, v. 32, n. 7-8, p. 1081-1095, 2009.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R., PES, M. P., DA CRUZ SEGUNDO, E.I; LYRA, A. D. A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable energy**, v. 49, p. 107-110, 2013.

REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; DIAS, C. G.; YNOUE, R. Y. Climate projections for South America: RegCM3 driven by HadCM3 and ECHAM5. **Advances in Meteorology**, 17pgs v. 2014, 2014.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.;ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.25, n. 2, p. 184-204, 2010.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. **Terrae Didática**, Campinas, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.

ROSSI, P. H. J.; OLIVEIRA, C. P.; ALÉ, J. V. Perguntas Frequentes sobre Energia Eólica. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=4#4>>. Acesso em: 22 out. 2014

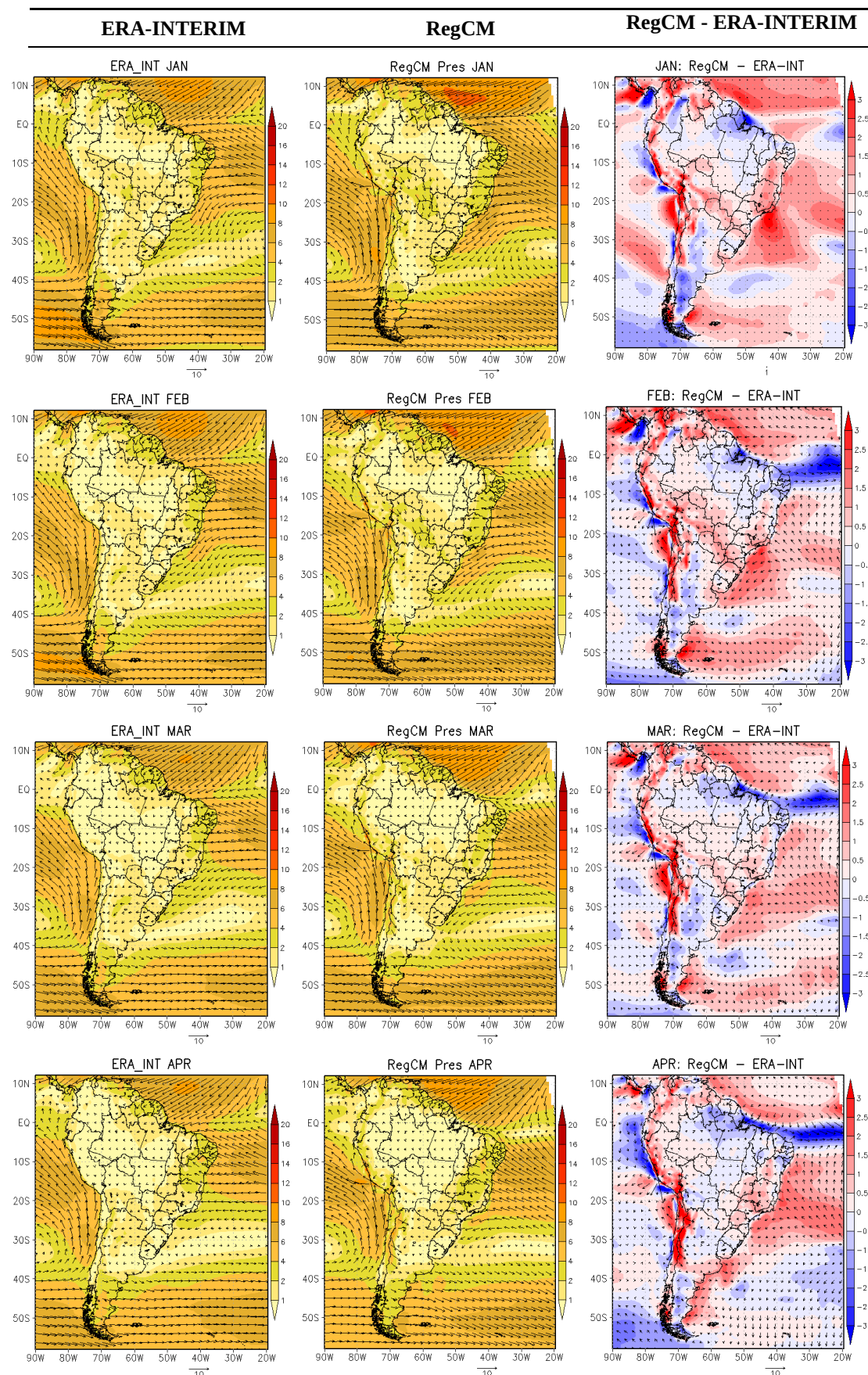
SCHUMANN, J. H. P. Procedimento para avaliação do potencial eólico. Estudo de caso: Região do entorno do reservatório da Usina Hidroelétrica de Estreito. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.

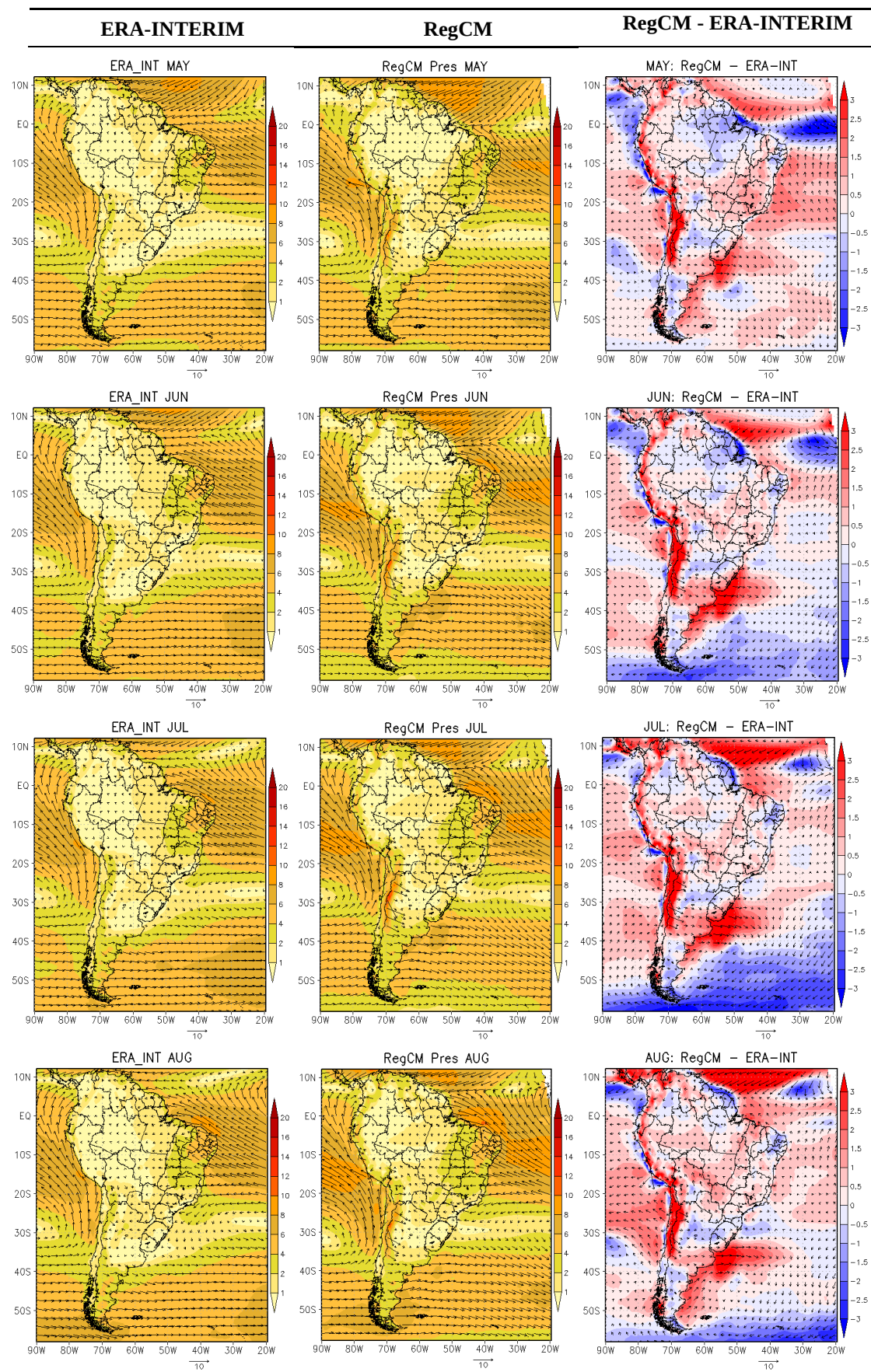
SETH, A.; ROJAS, M.; RAUSCHER, S. A. CMIP3 projected changes in the annual cycle of the South American Monsoon. **Climatic Change**, v. 98, n. 3-4, p. 331-357, 2010.

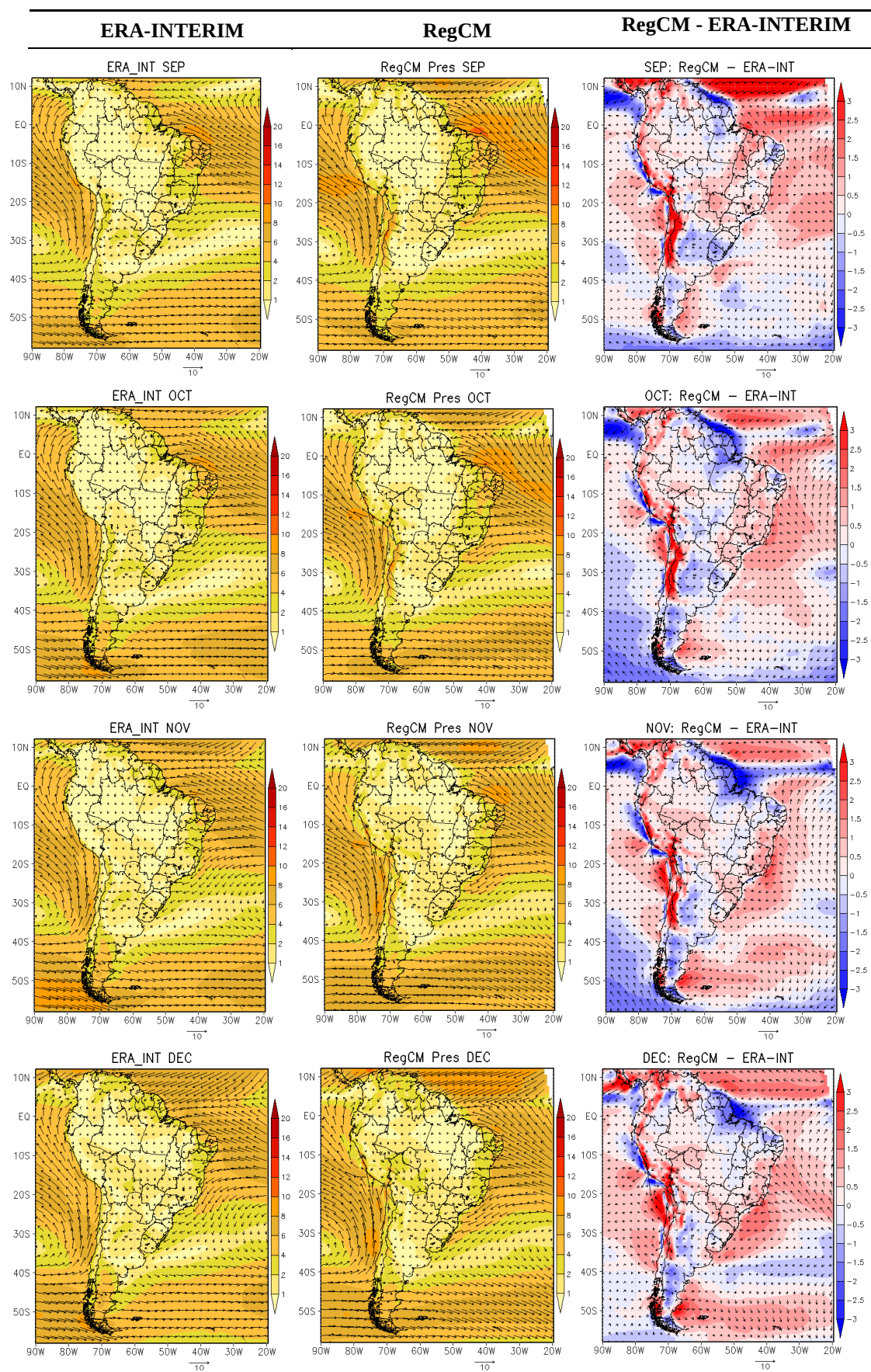
VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM T.; KREY, V.; LAMARQUE J.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, S. K. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, p. 5-31, 2011.

WALLACE, J.M.; HOBBS, P.V. Atmospheric science: an introductory survey. Academic Press- Inc, 2006,v. 2, 365 p.

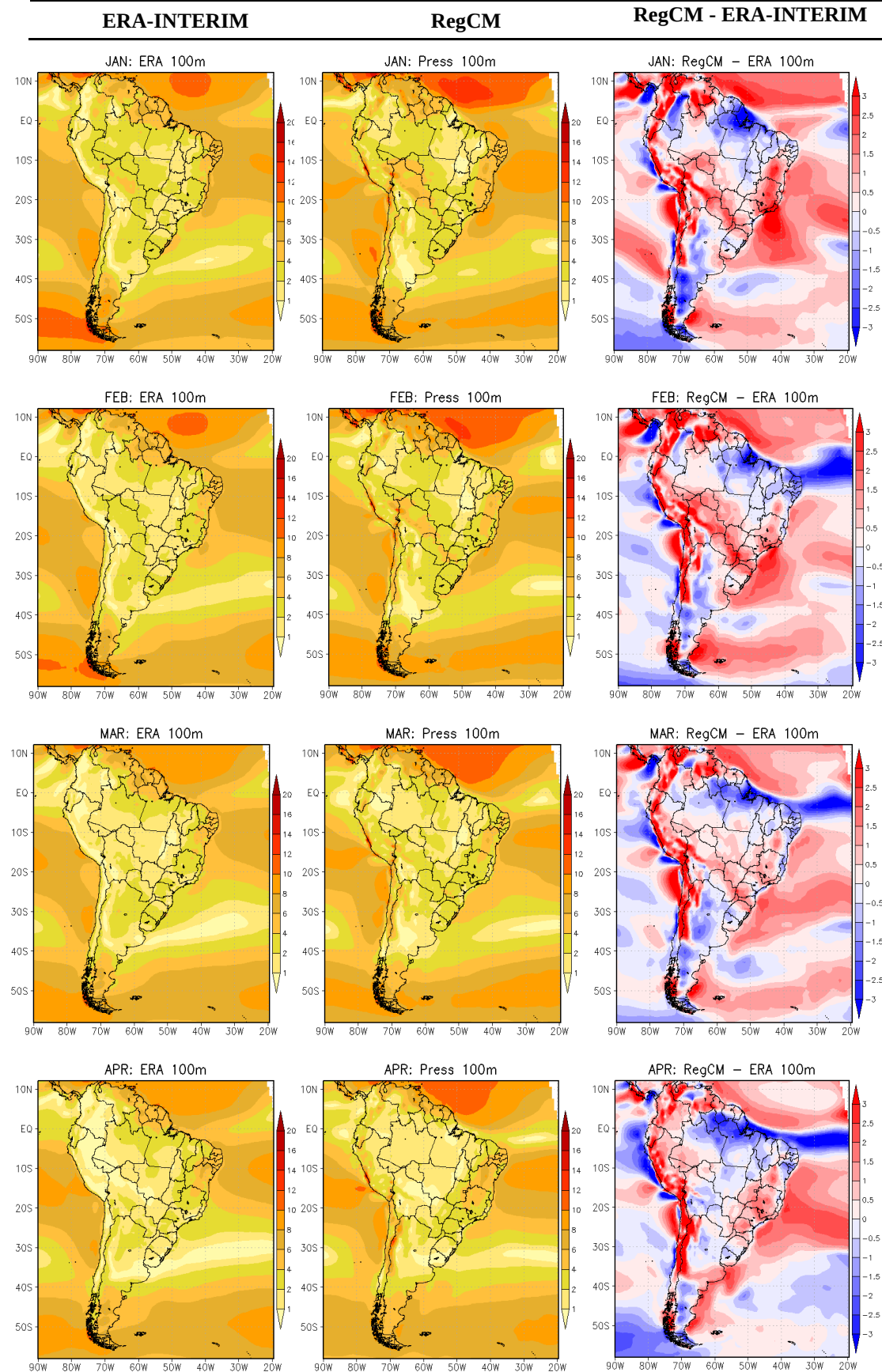
APÊNDICE A - Climatologia Mensal do Vento a 10 m - Presente

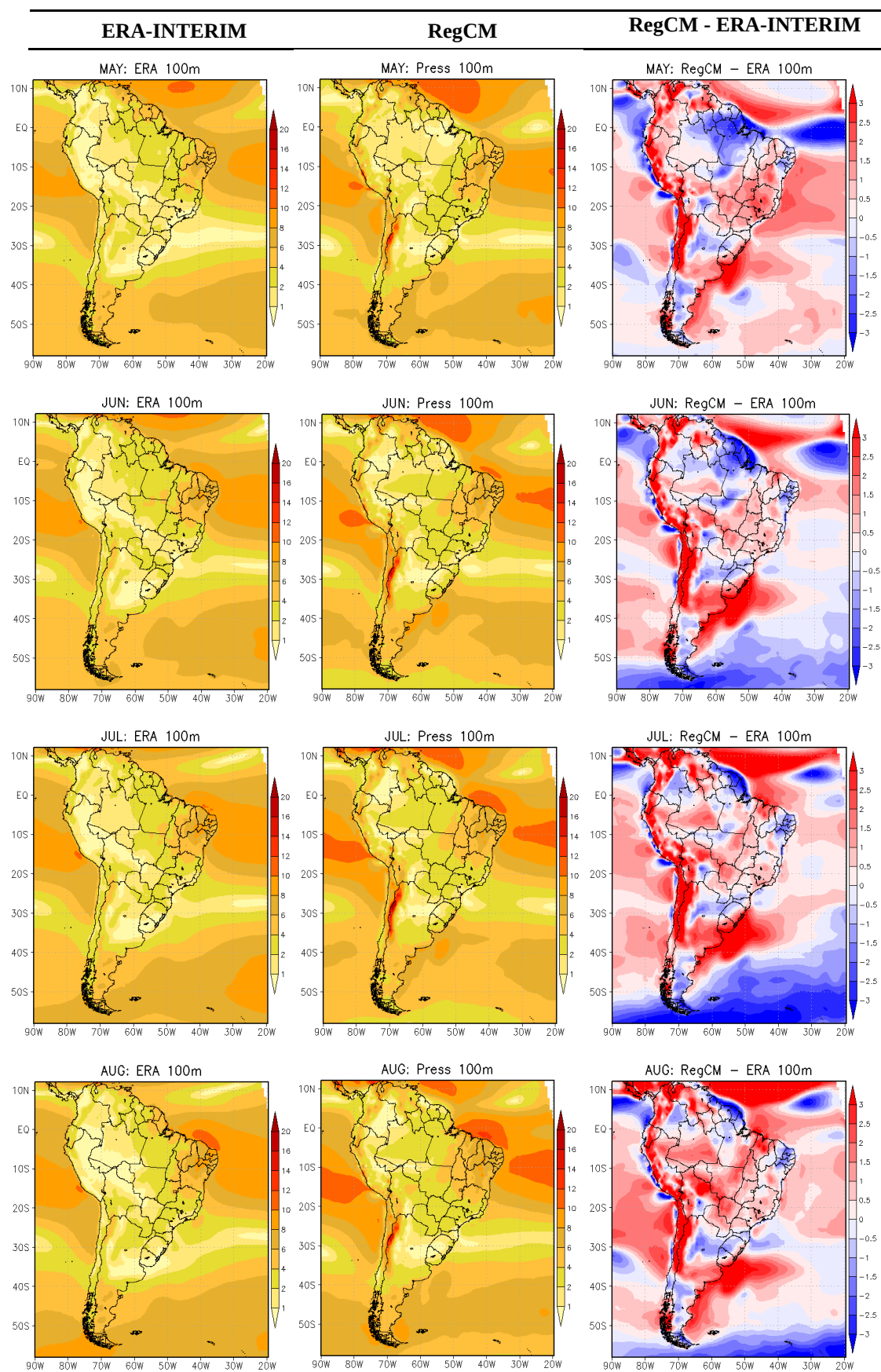


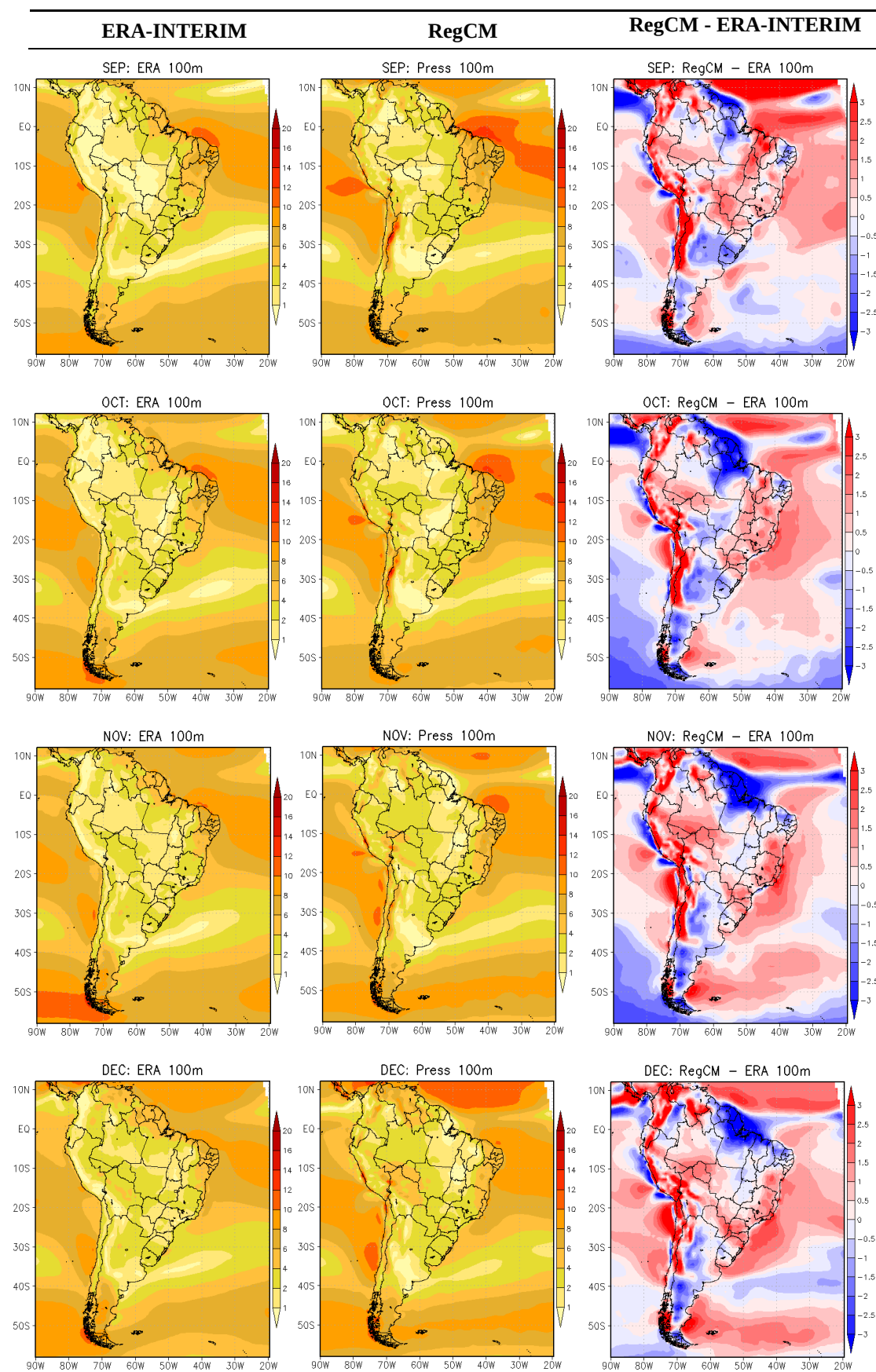




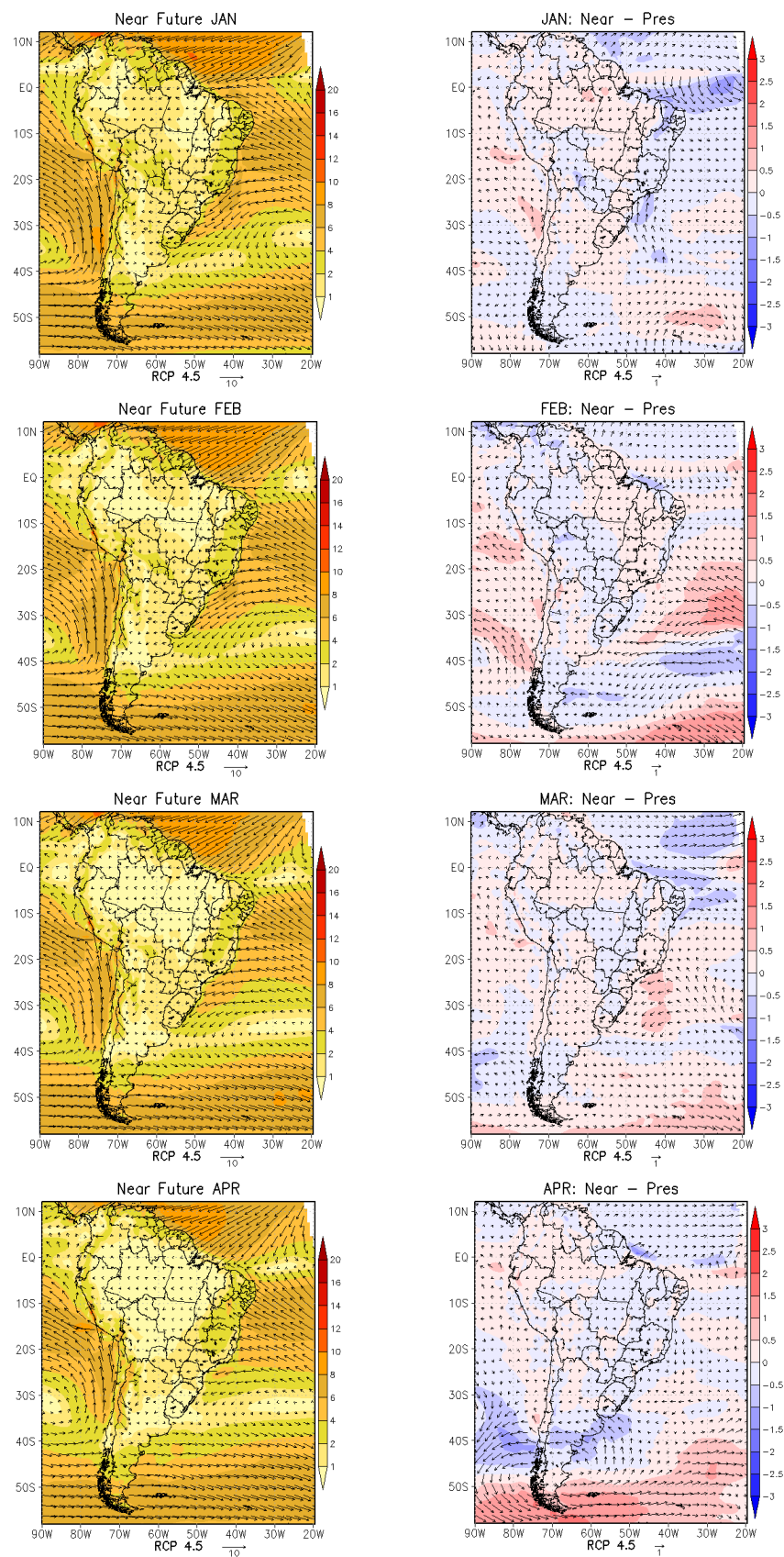
APÊNDICE B - Climatologia Mensal do Vento a 100 m – Presente

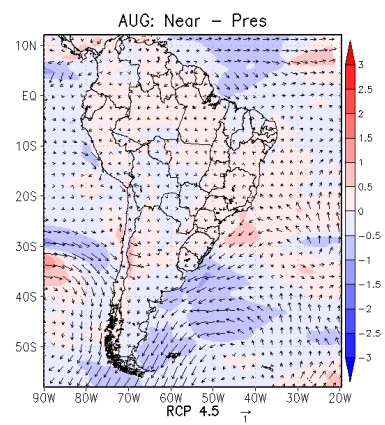
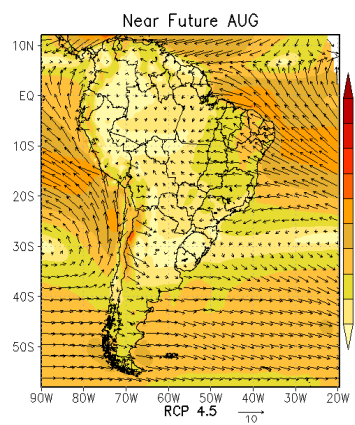
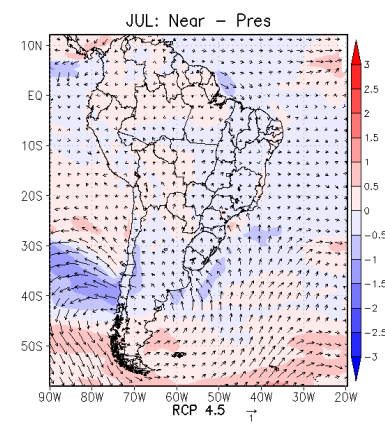
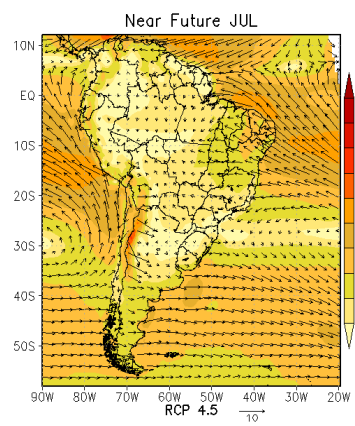
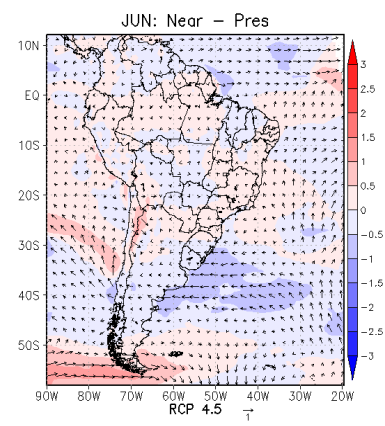
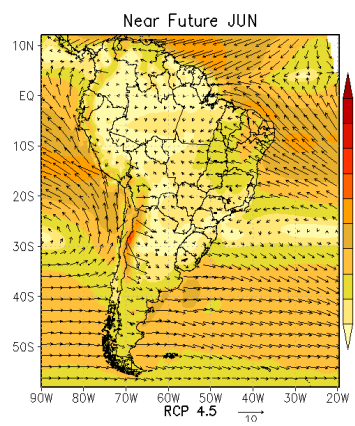
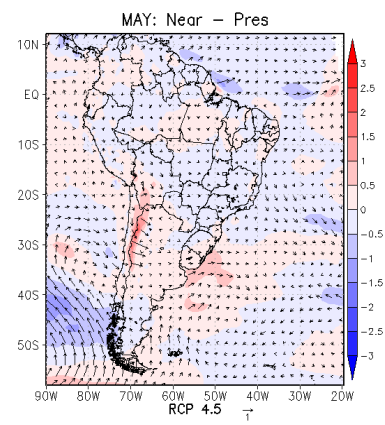
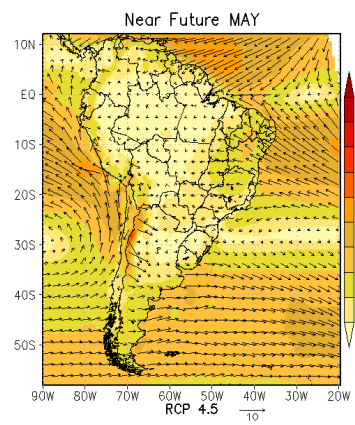


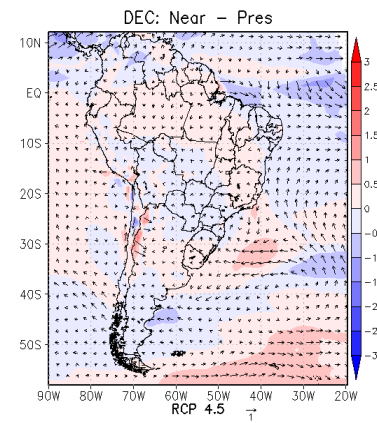
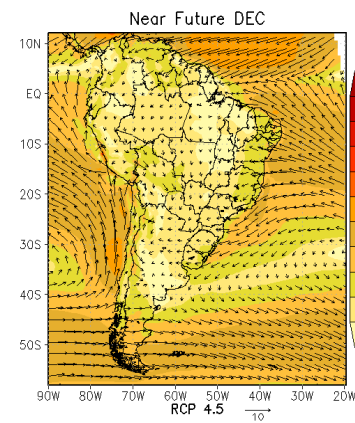
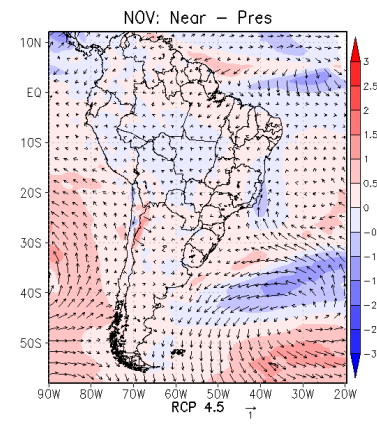
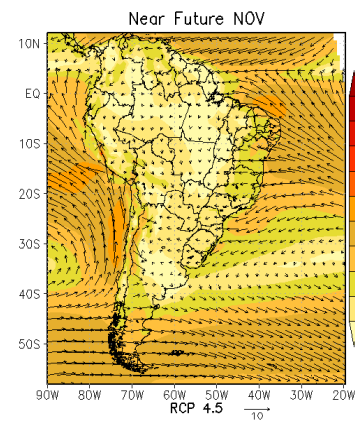
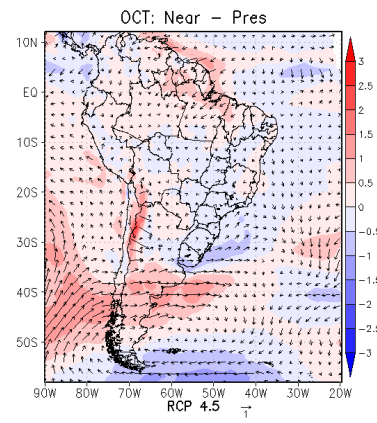
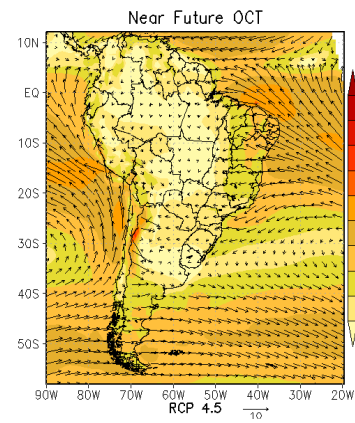
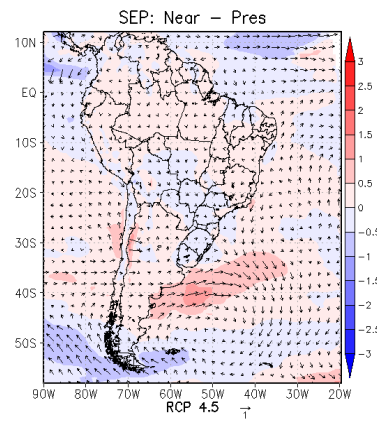
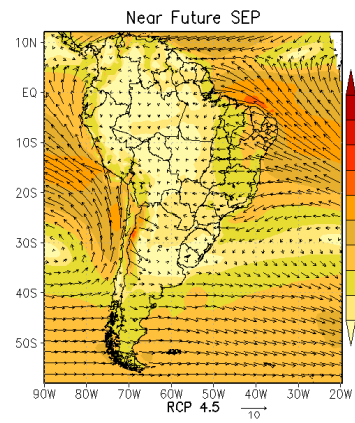




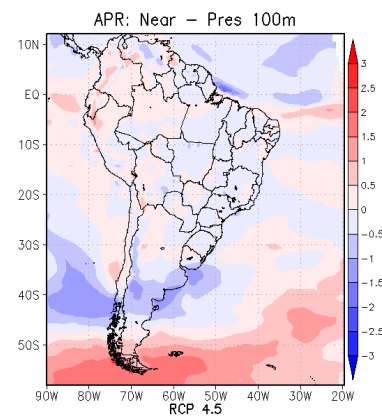
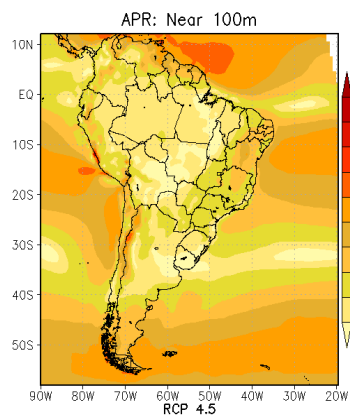
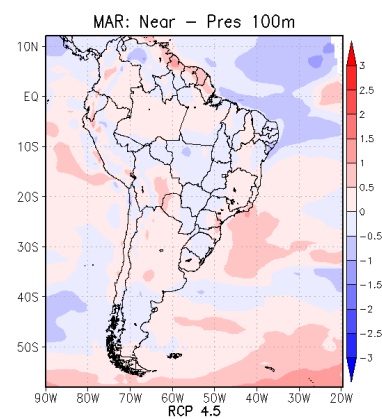
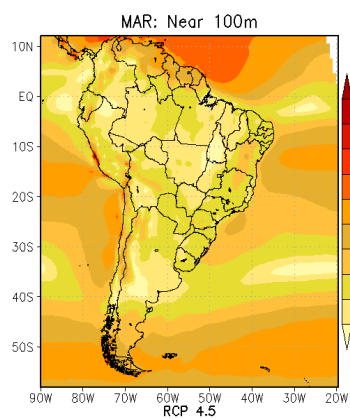
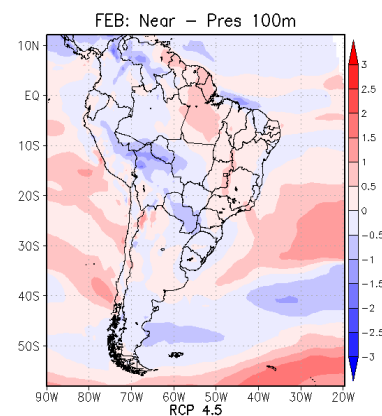
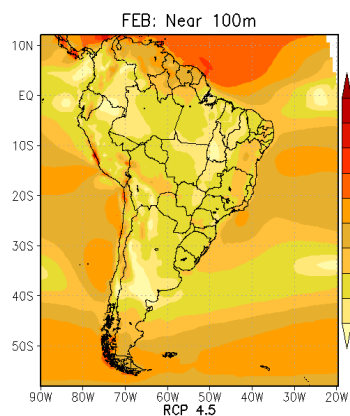
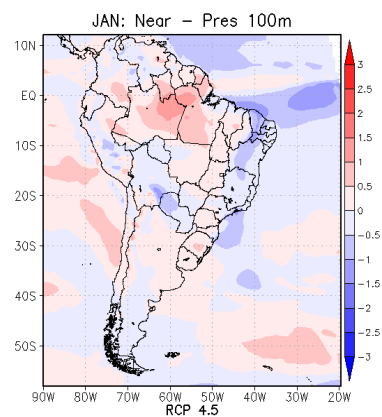
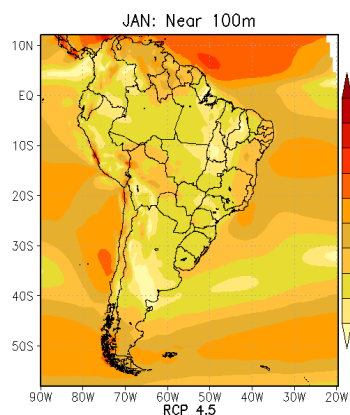
APÊNDICE C - Climatologia Mensal do Vento a 10m (Futuro Próximo, RCP4.5)

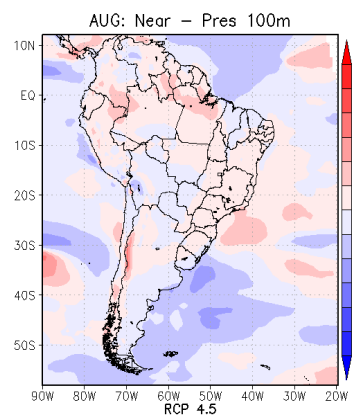
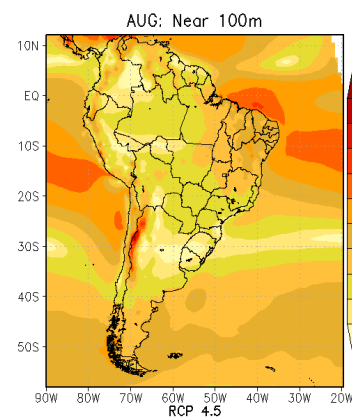
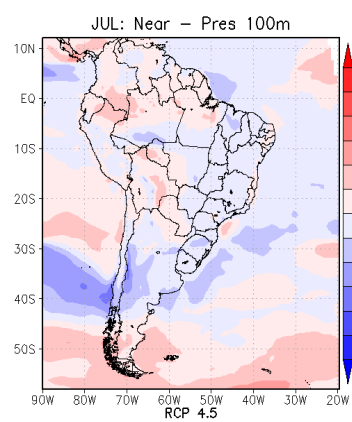
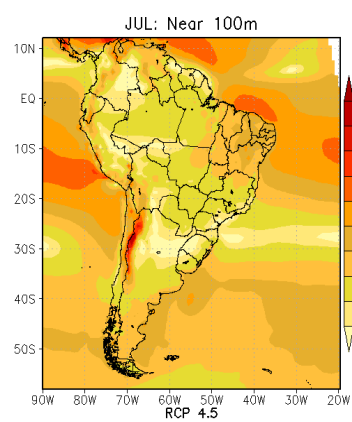
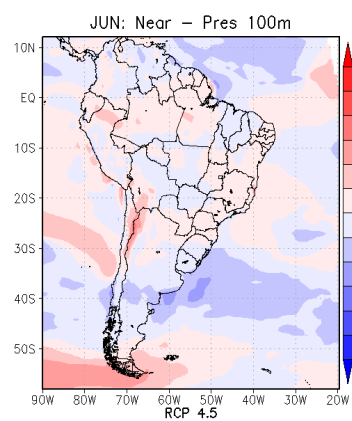
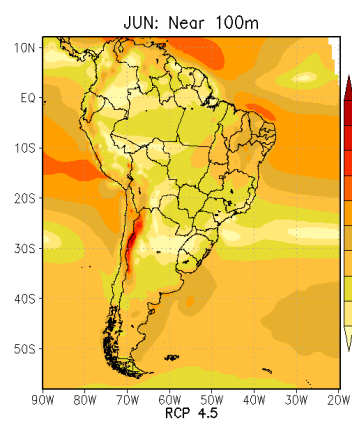
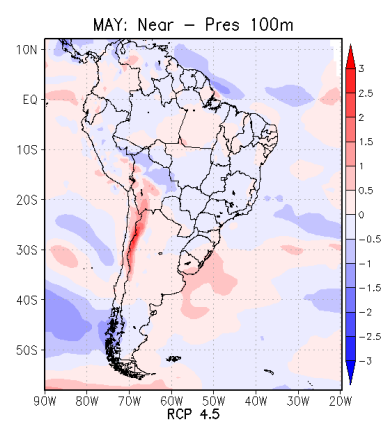
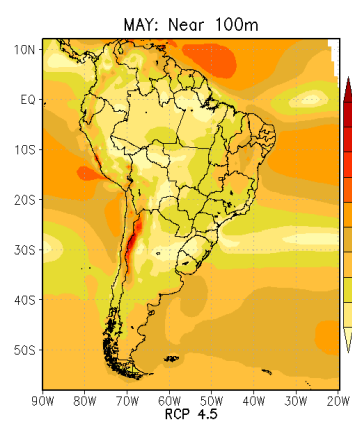


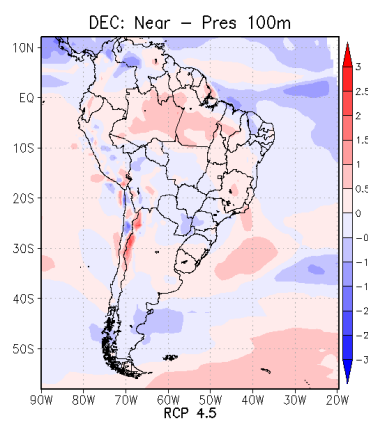
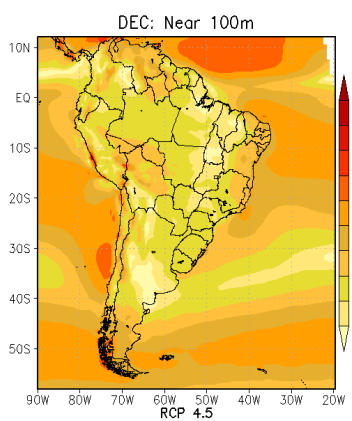
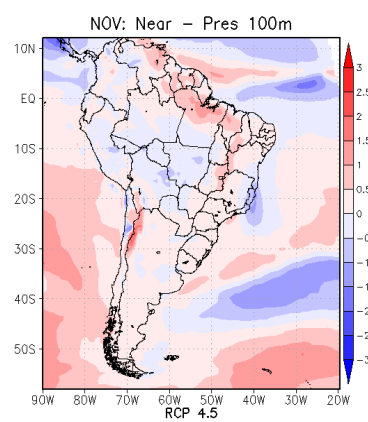
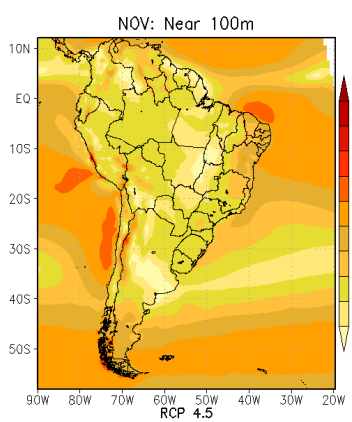
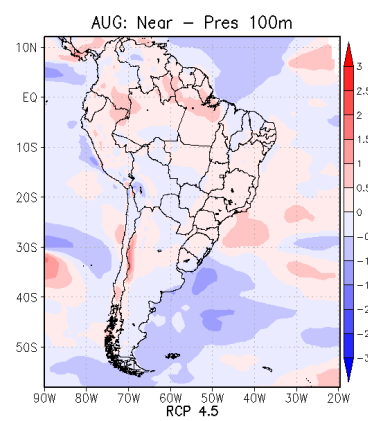
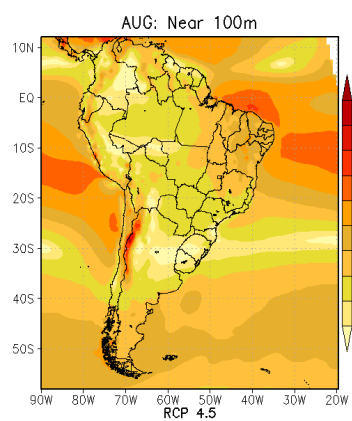
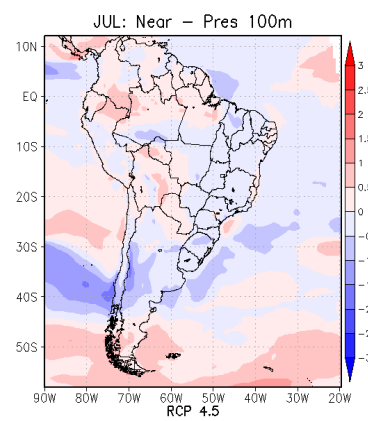
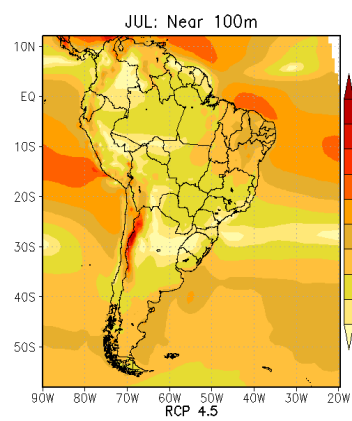




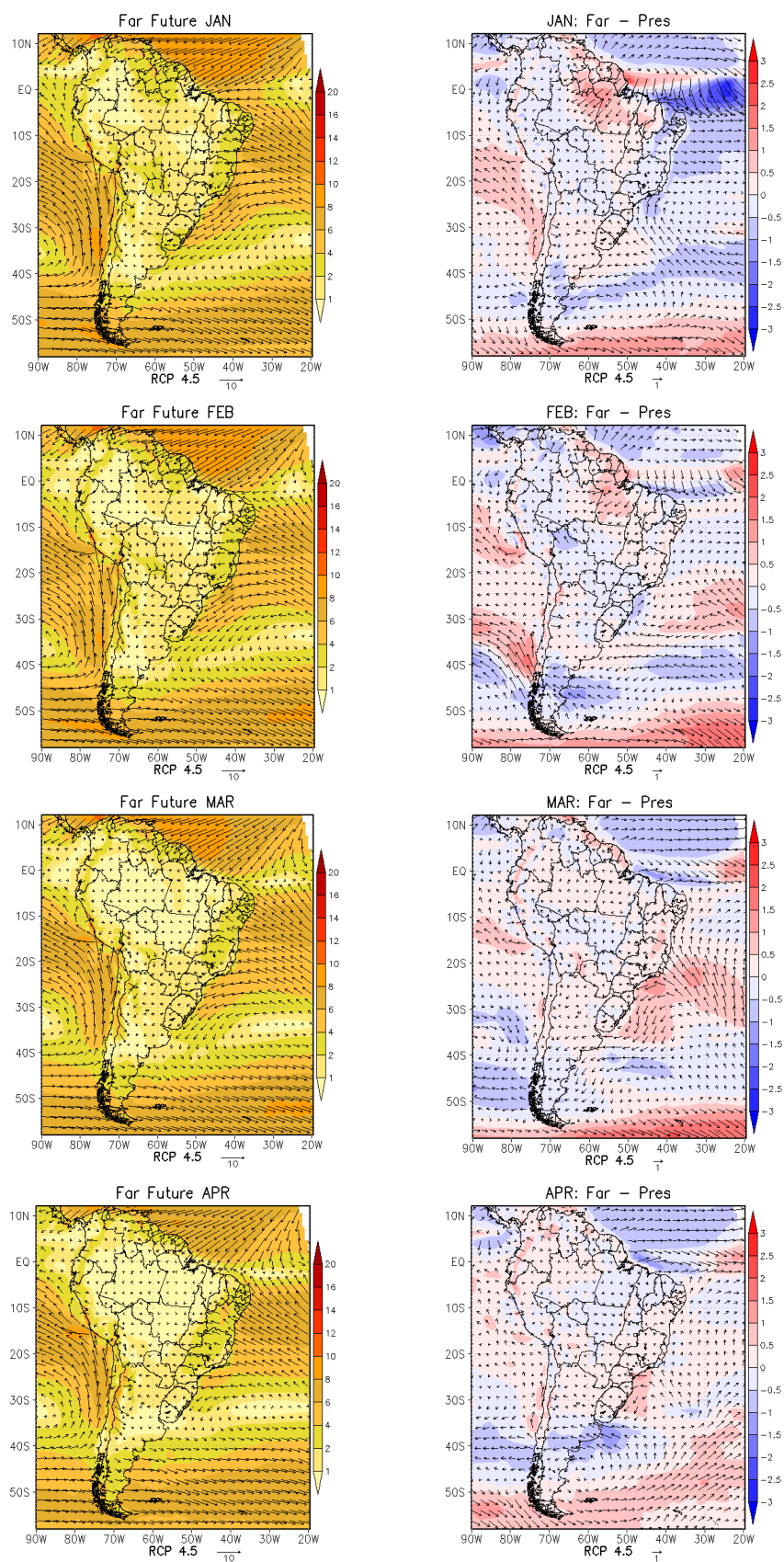
APÊNDICE D - Climatologia Mensal do Vento a 100 m (Futuro Próximo RCP4.5)

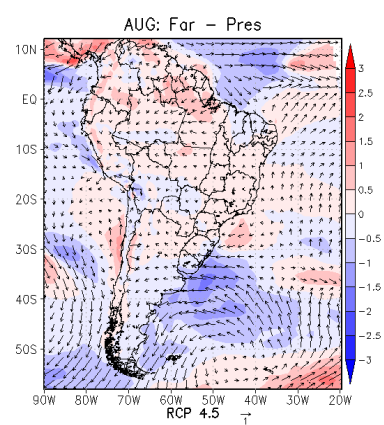
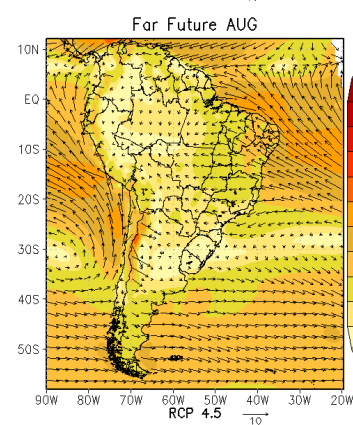
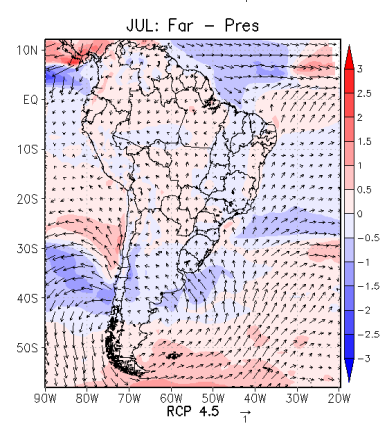
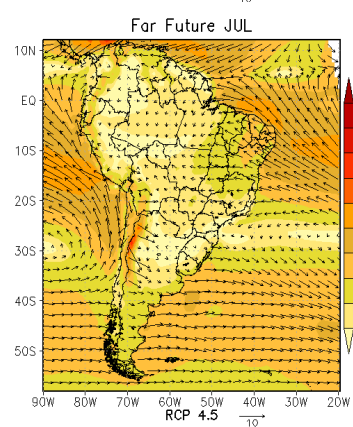
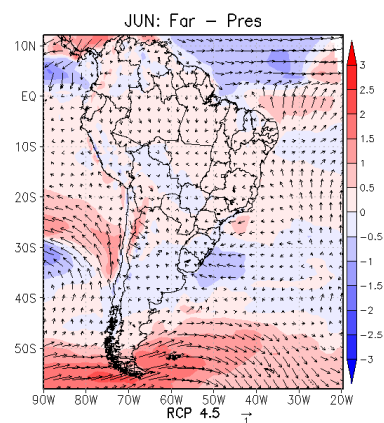
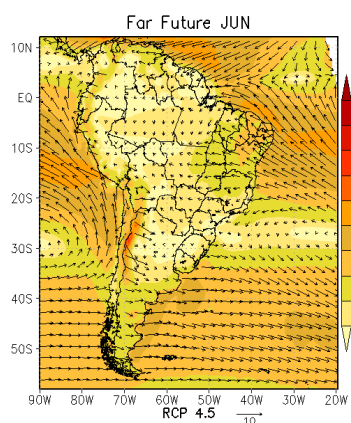
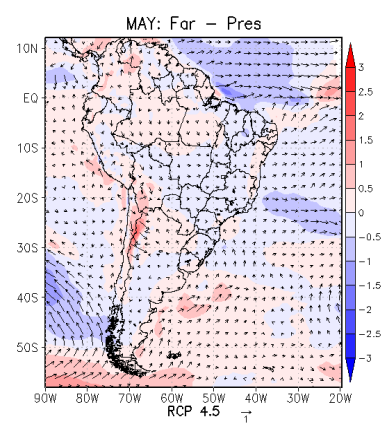
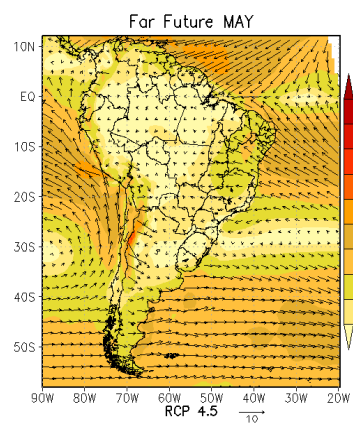


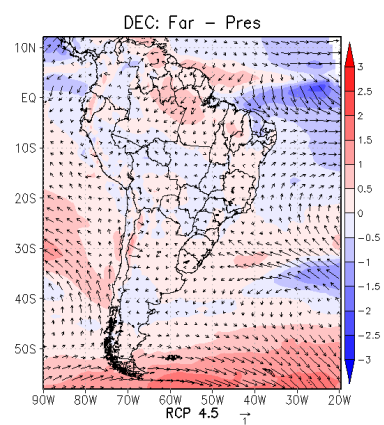
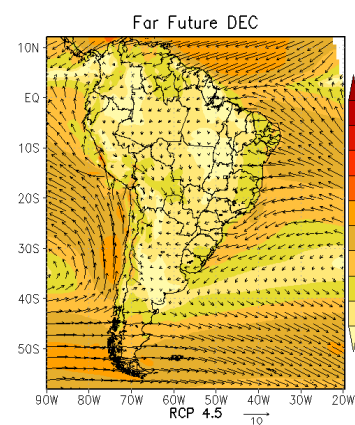
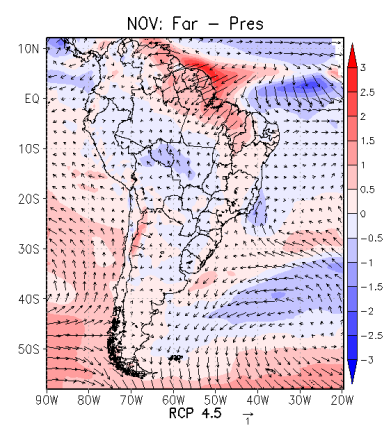
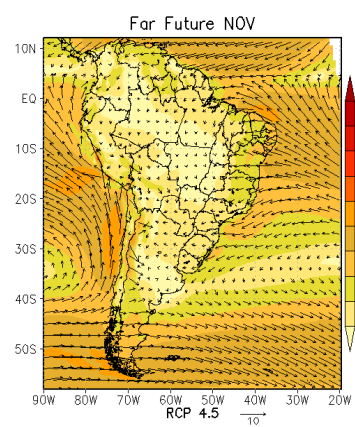
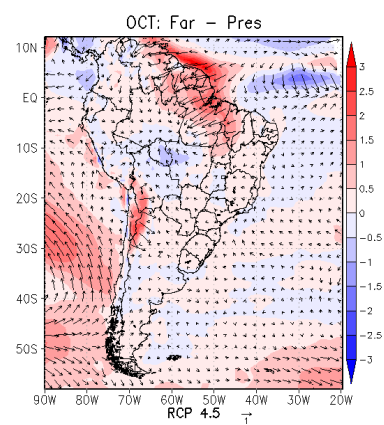
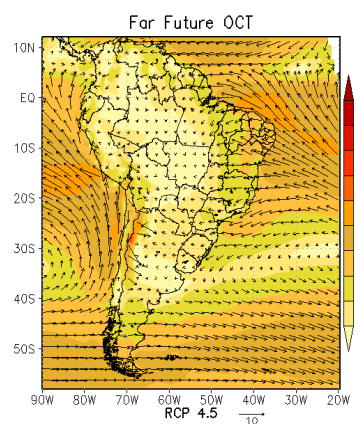
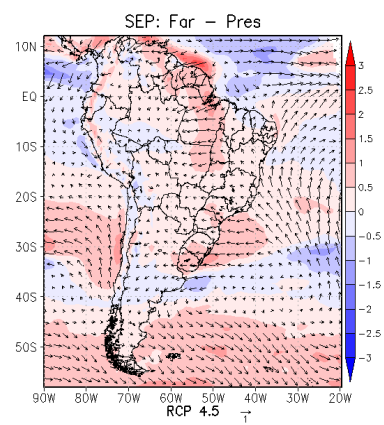
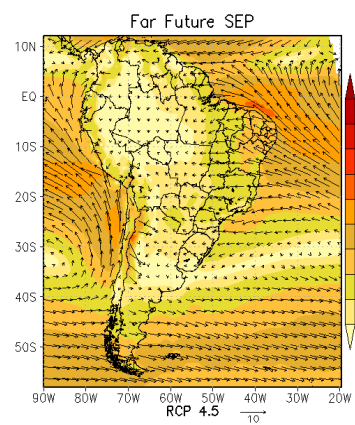


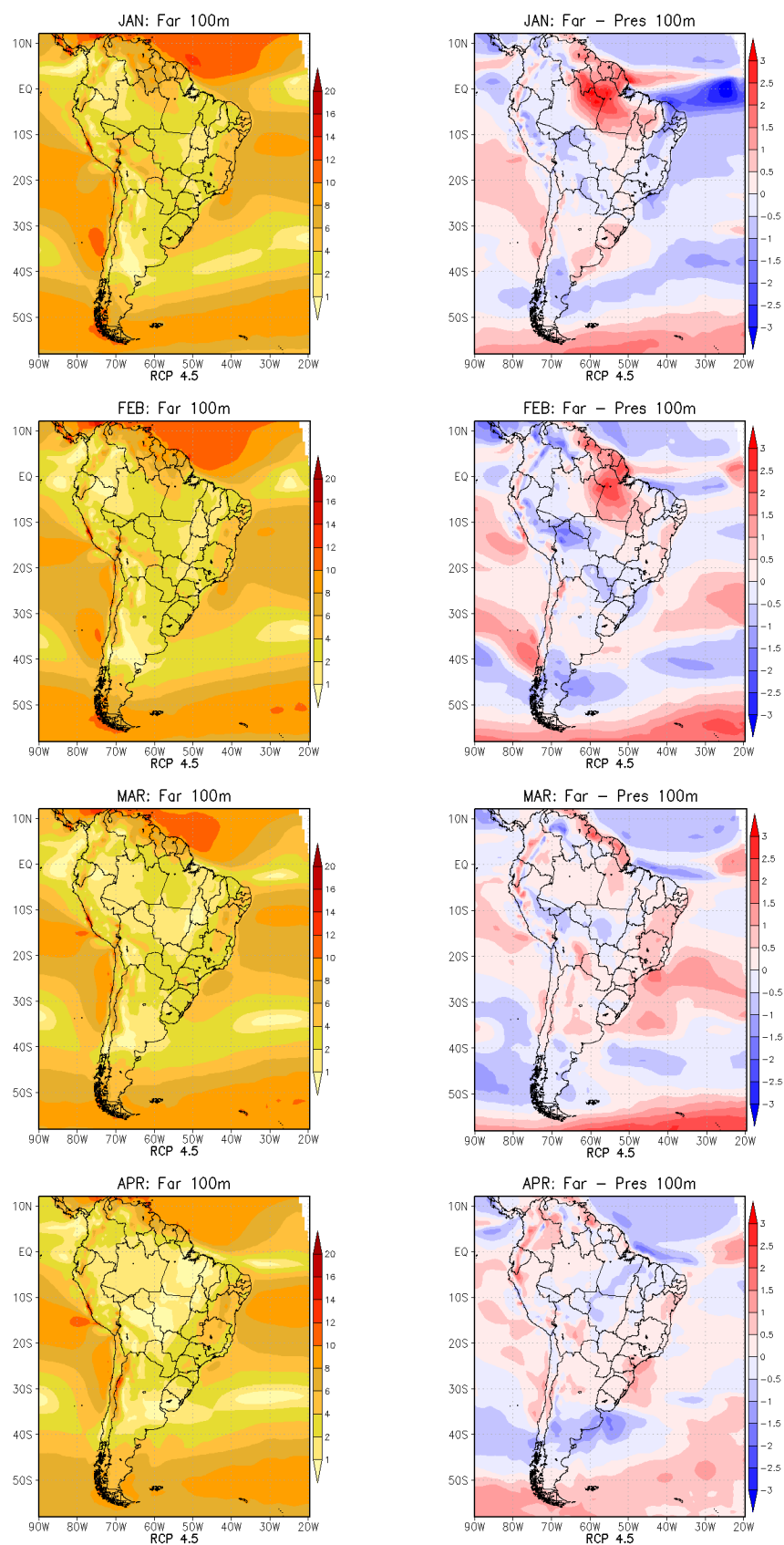


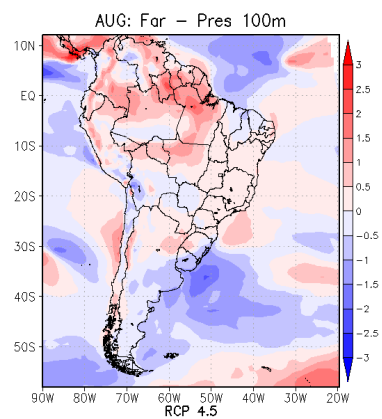
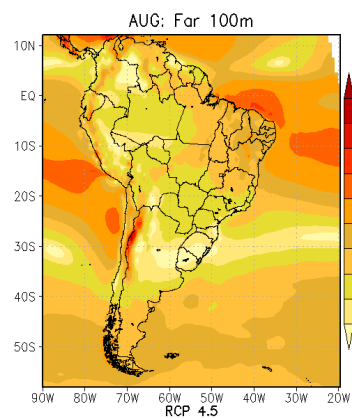
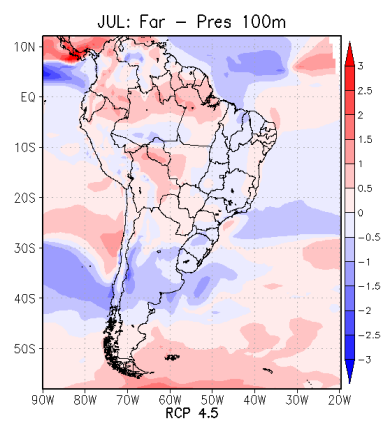
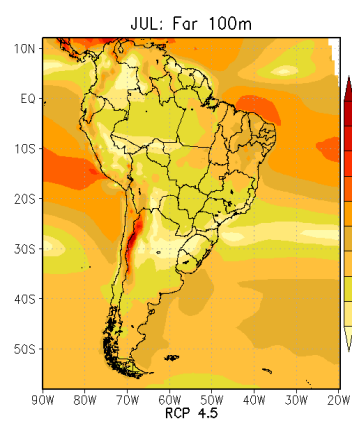
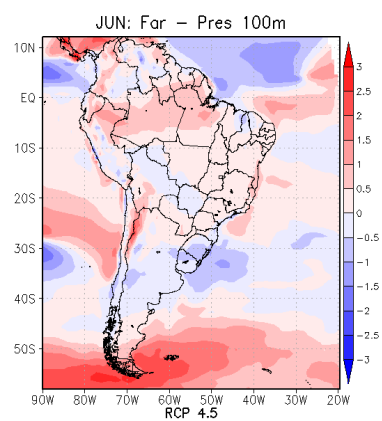
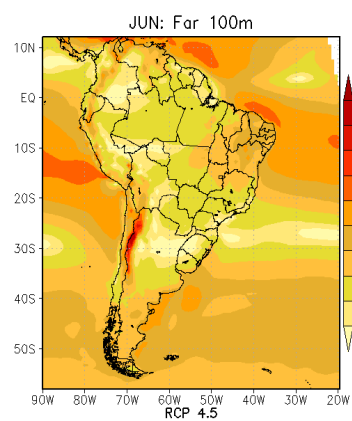
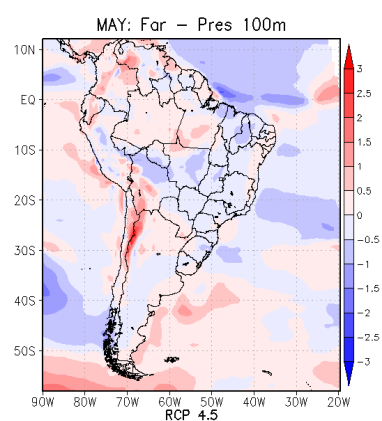
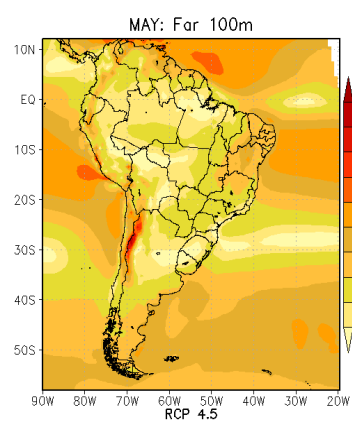
APÊNDICE E - Climatologia Mensal do Vento a 10 m (Futuro Distante, RCP4.5)

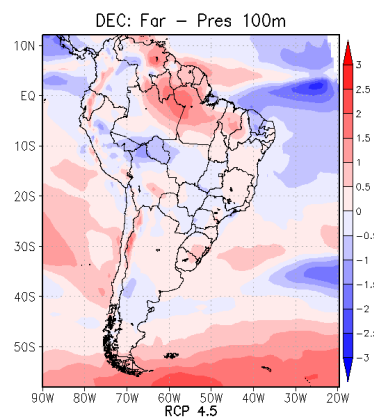
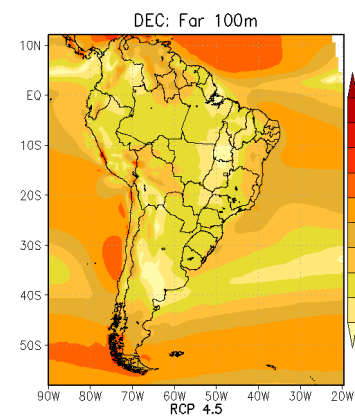
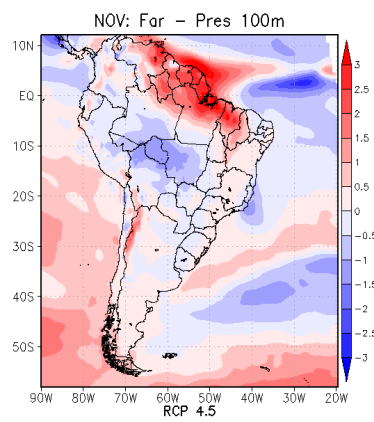
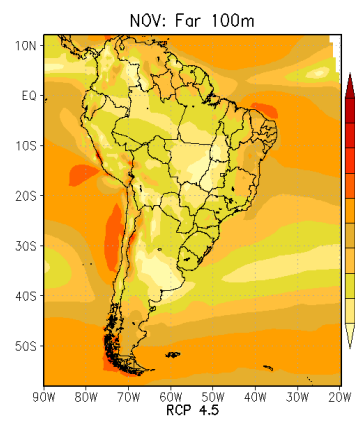
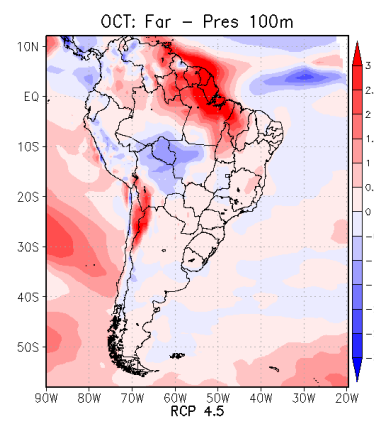
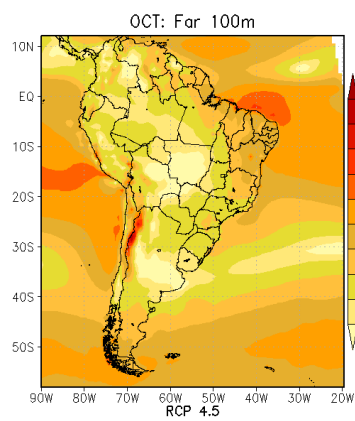
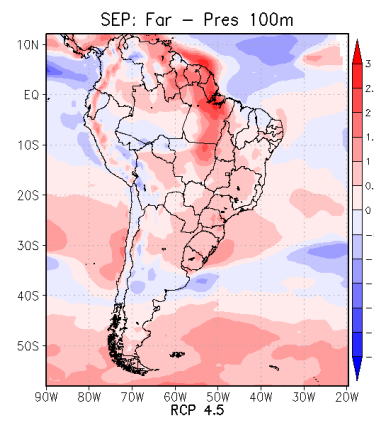
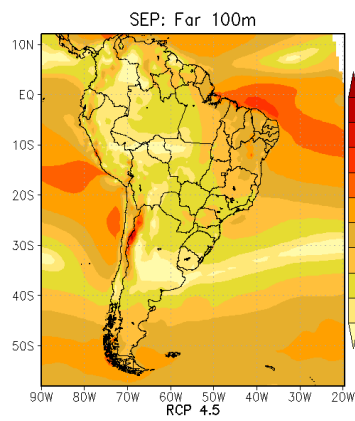




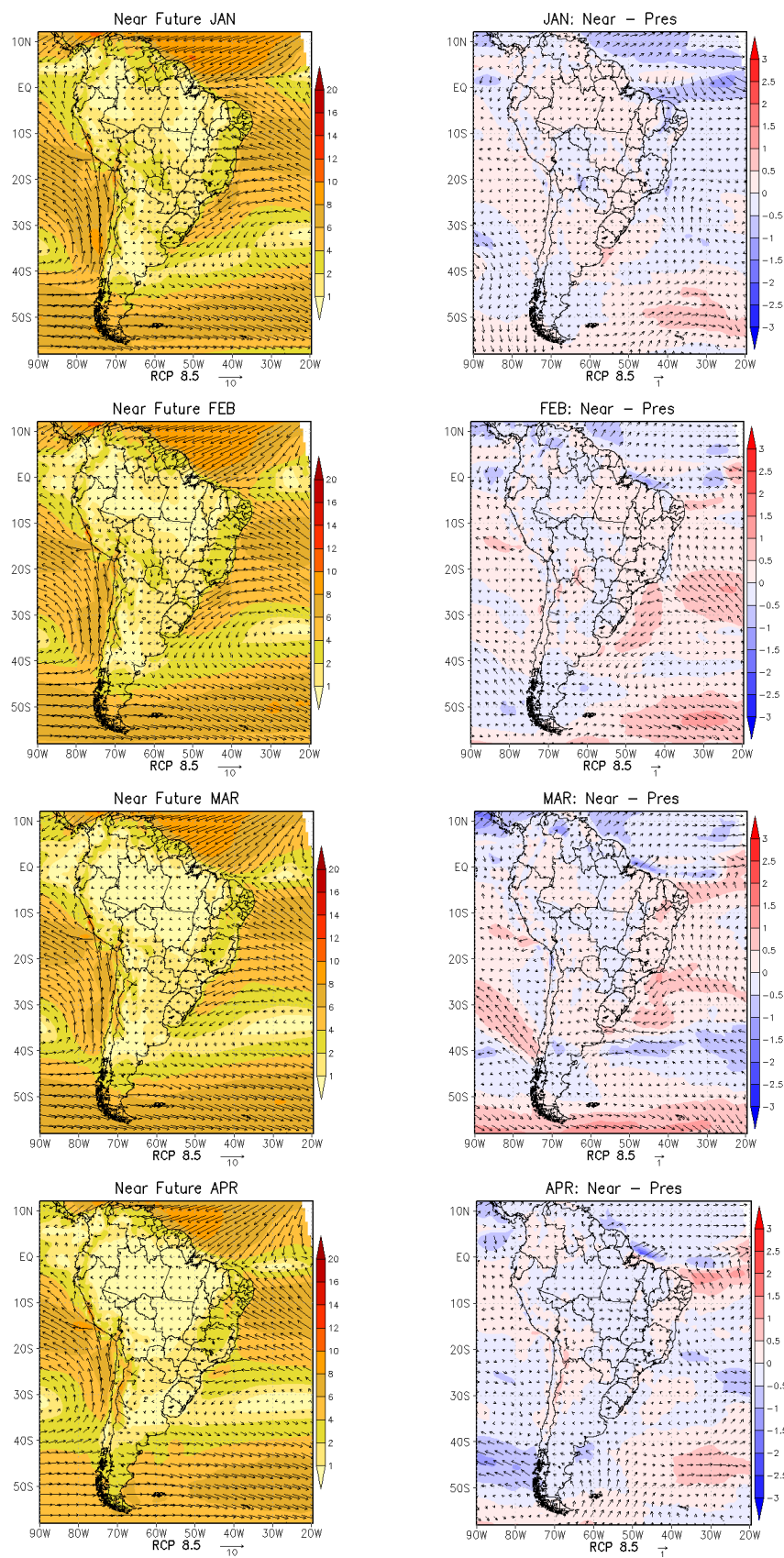


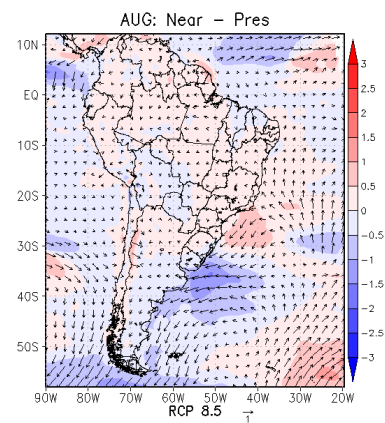
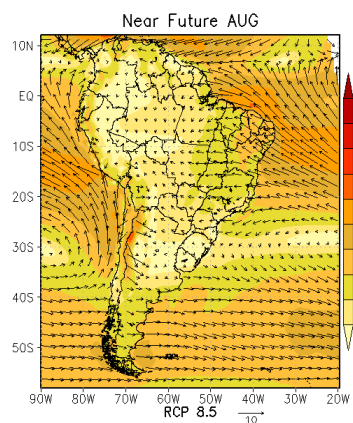
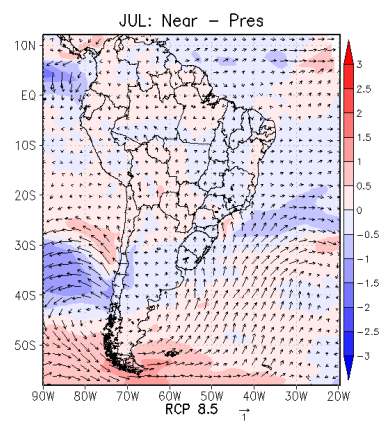
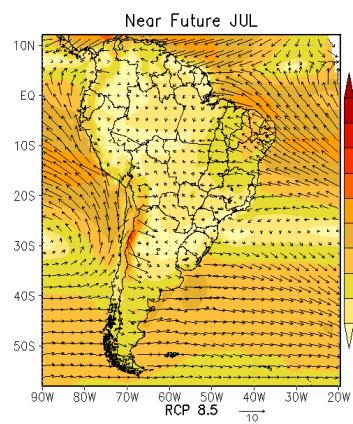
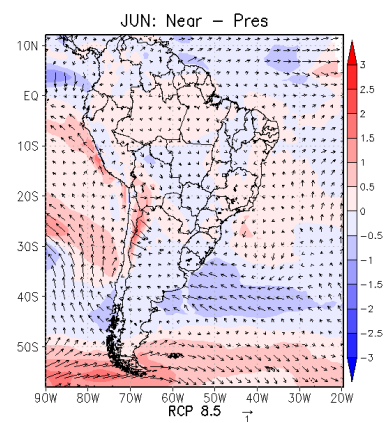
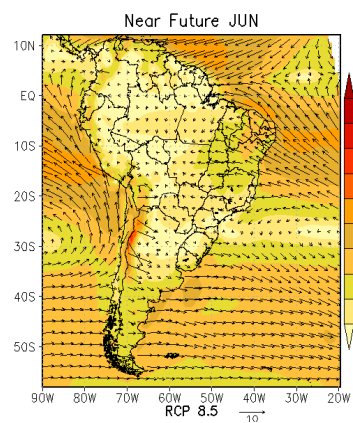
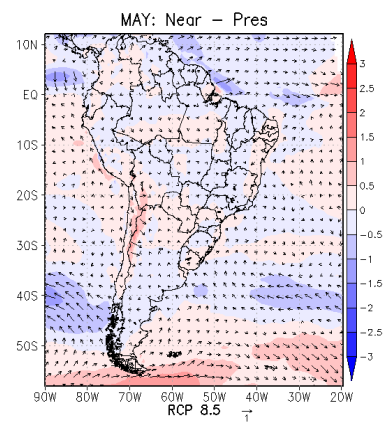
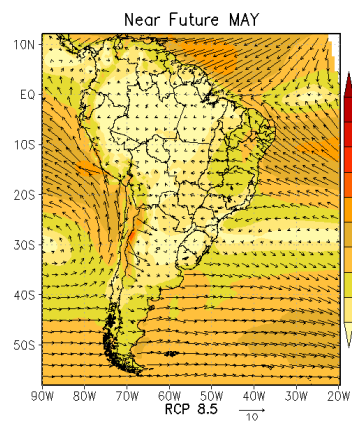
APÊNDICE F - Climatologia Mensal do Vento a 100 m (Futuro Distante, RCP4.5)

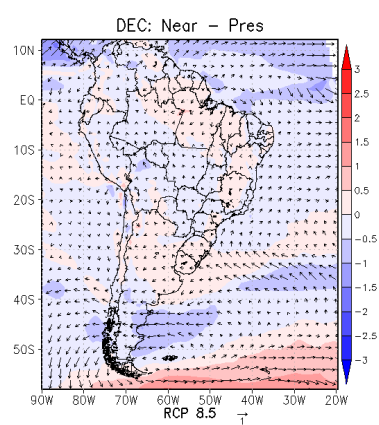
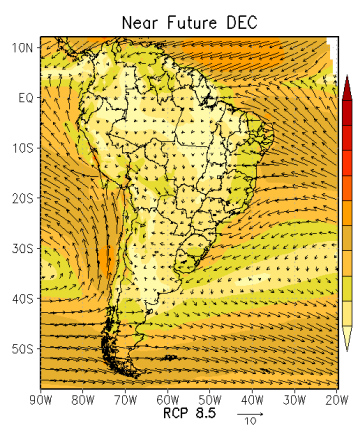
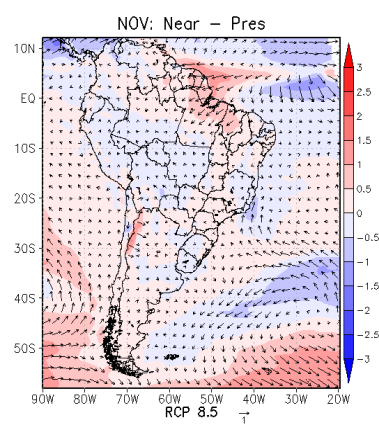
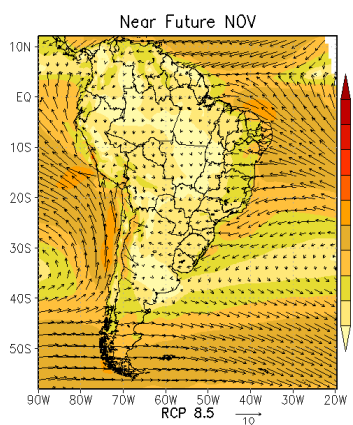
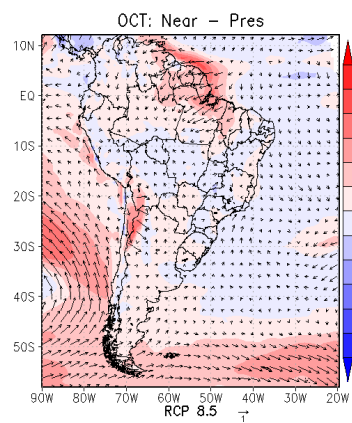
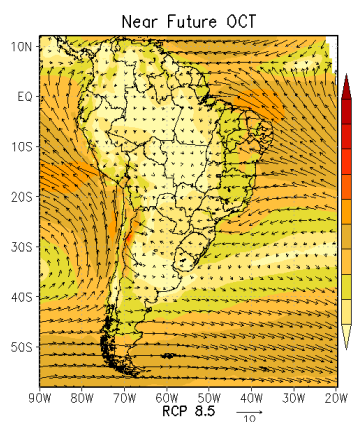
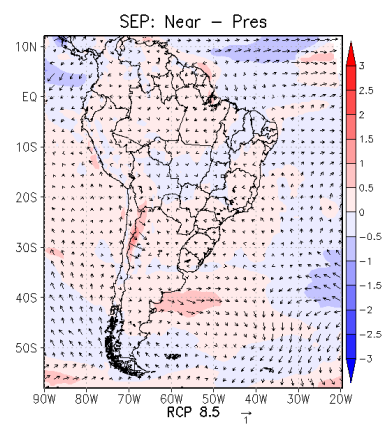
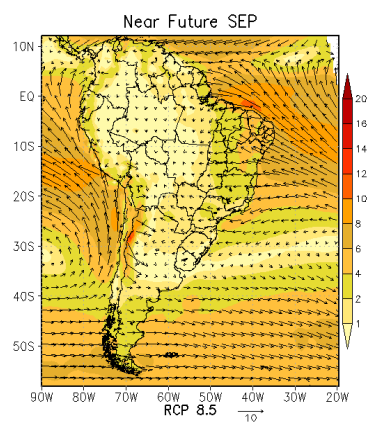




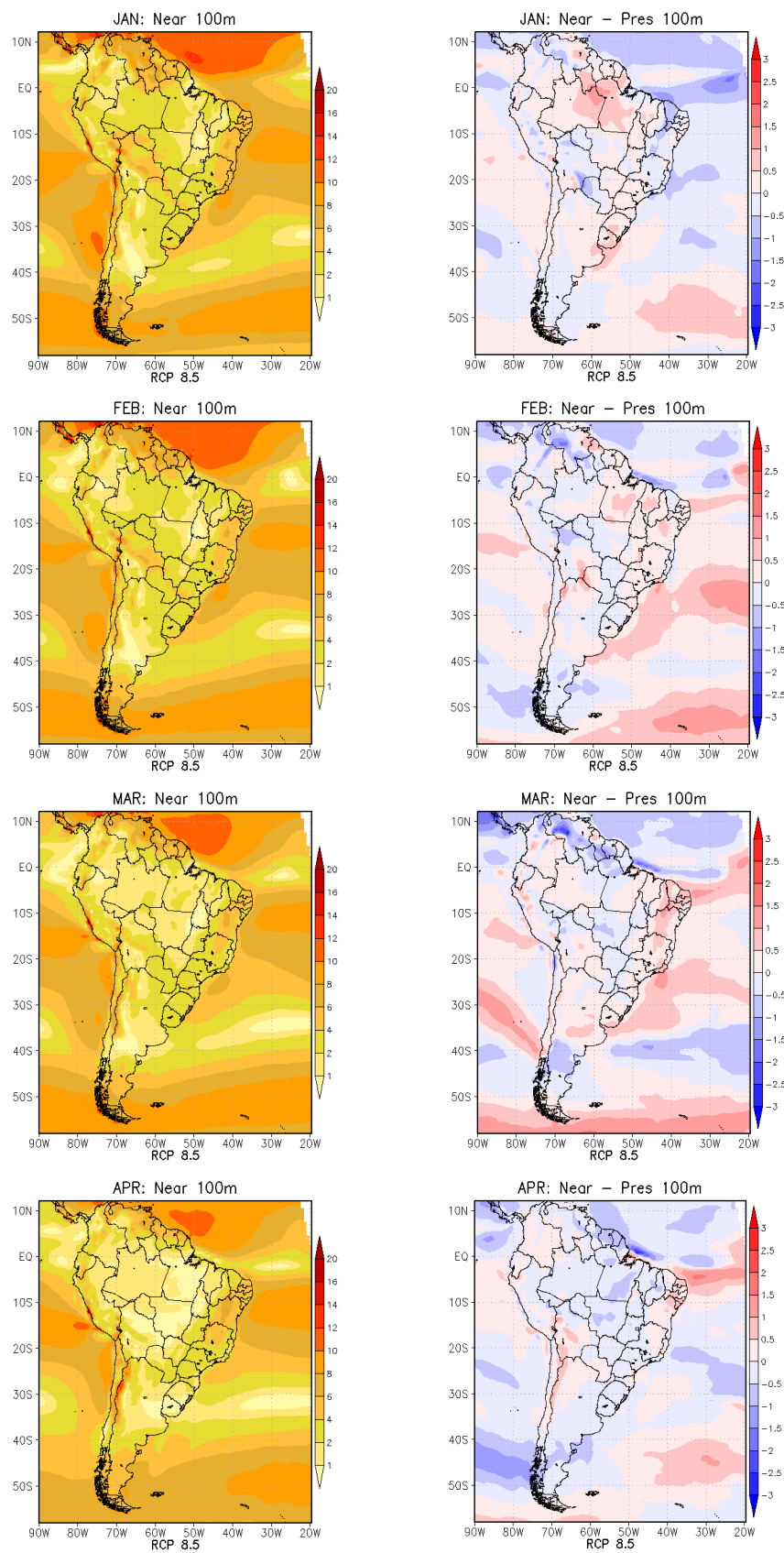
APÊNDICE G - Climatologia Mensal do Vento a 10 m (Futuro Próximo, RCP8.5)

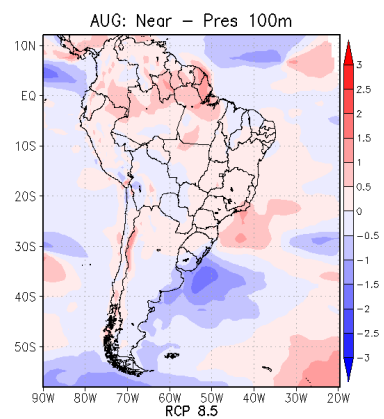
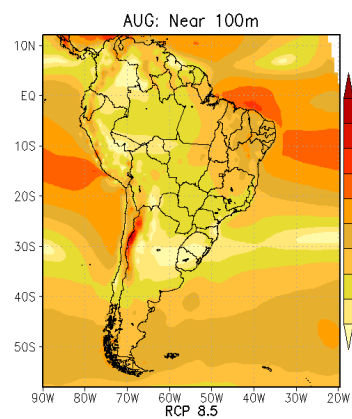
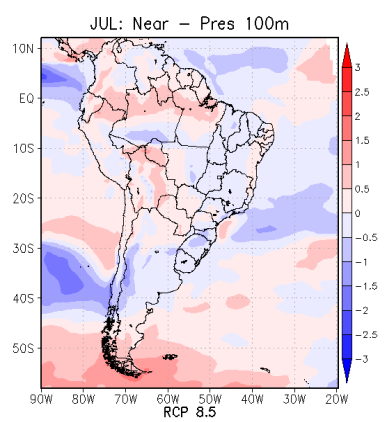
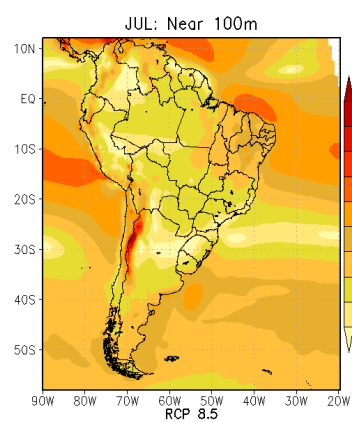
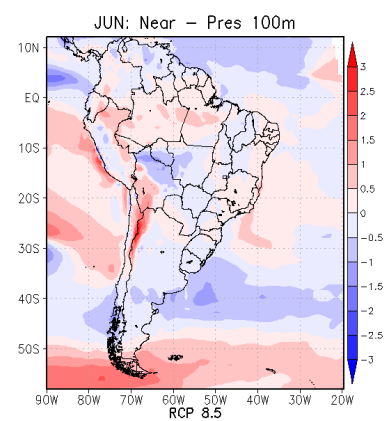
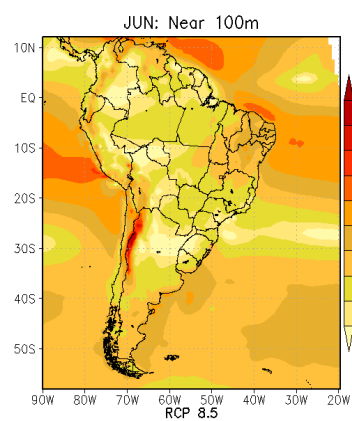
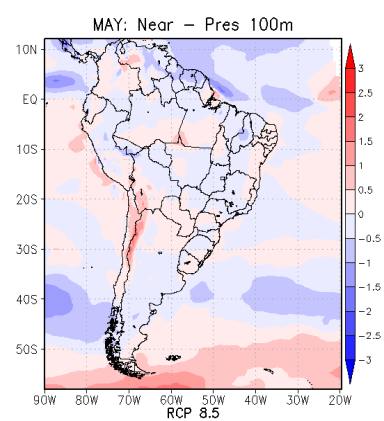
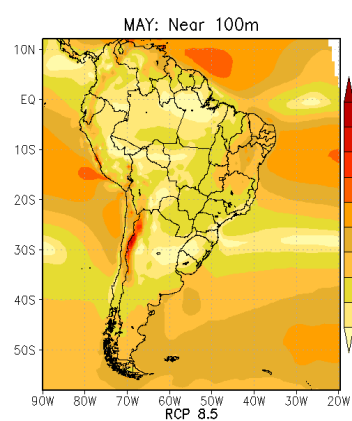


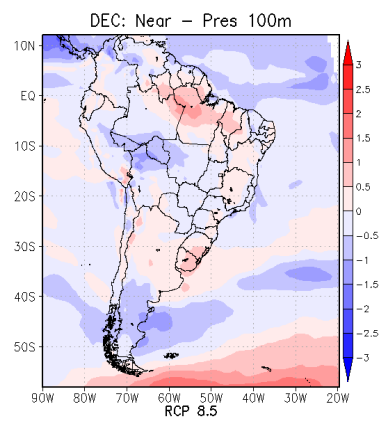
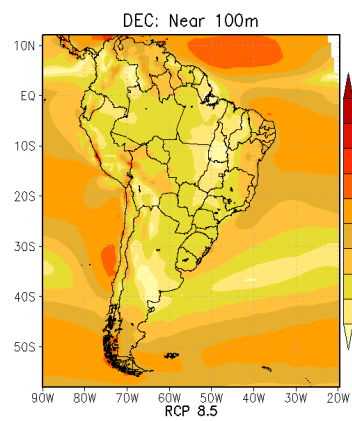
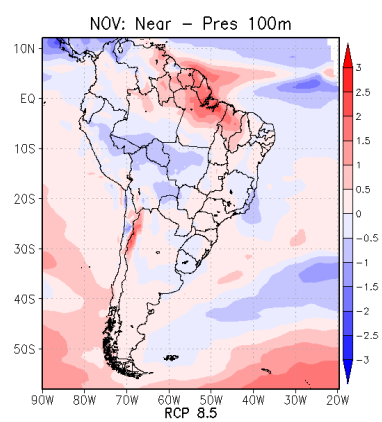
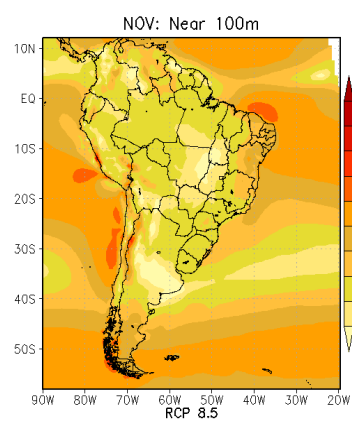
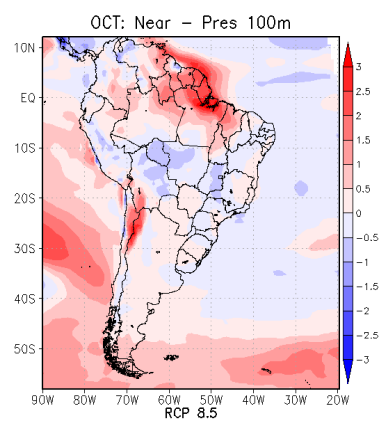
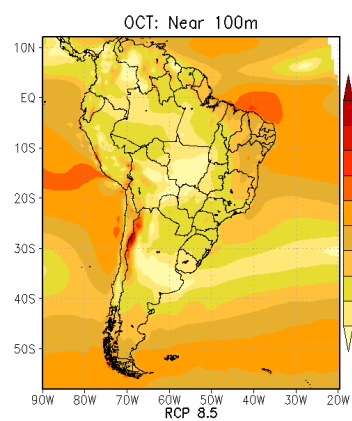
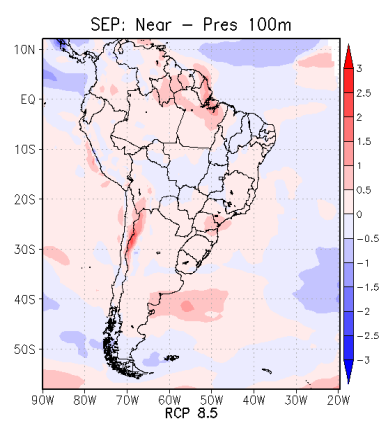
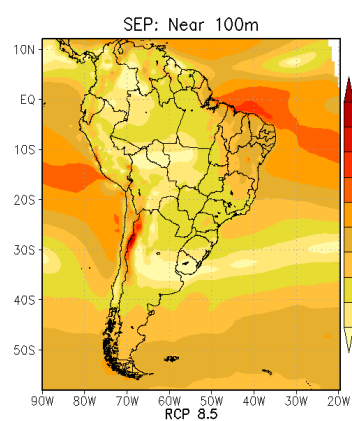




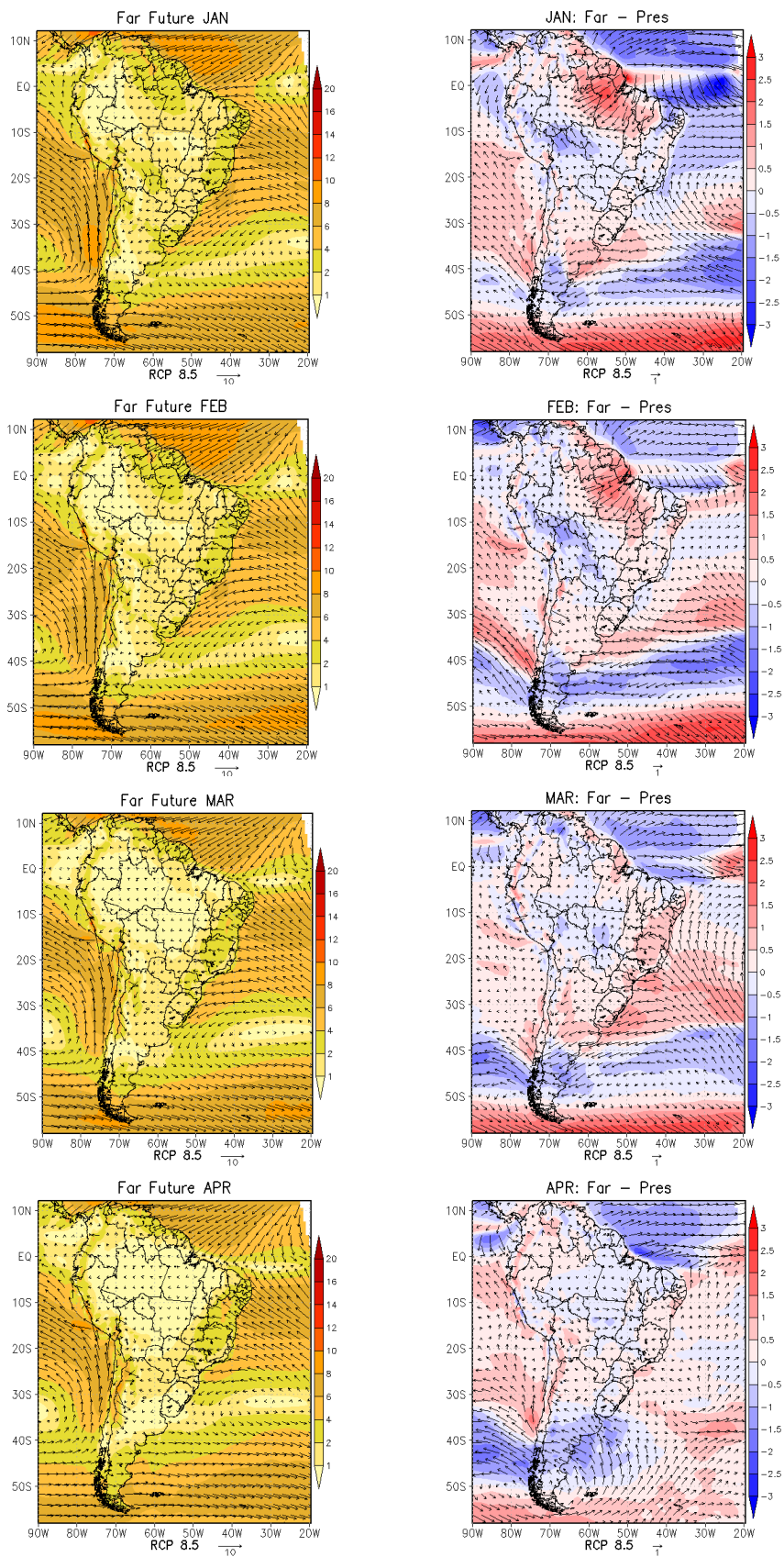
APÊNDICE H - Climatologia Mensal do Vento a 100 m (Futuro Próximo, RCP8.5)

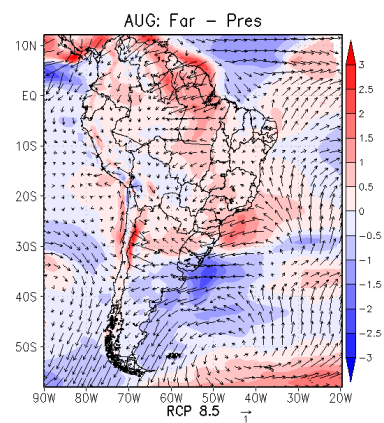
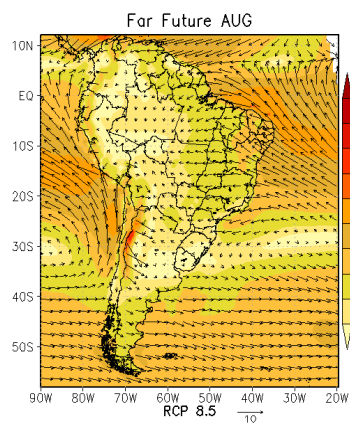
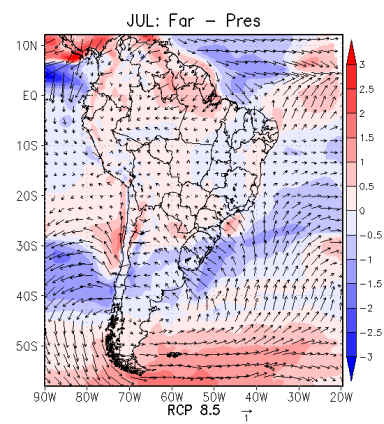
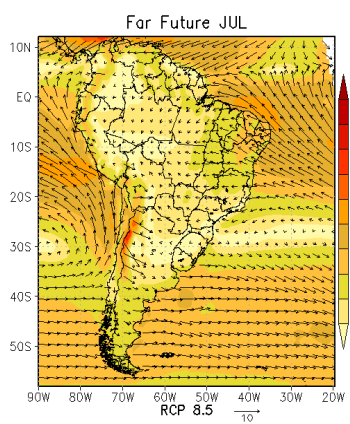
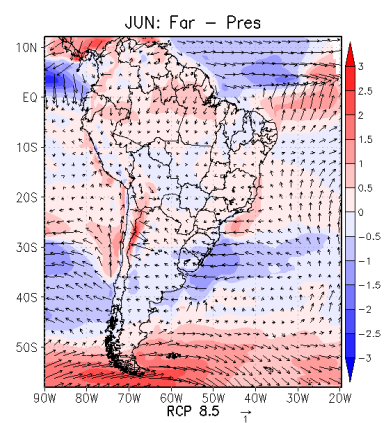
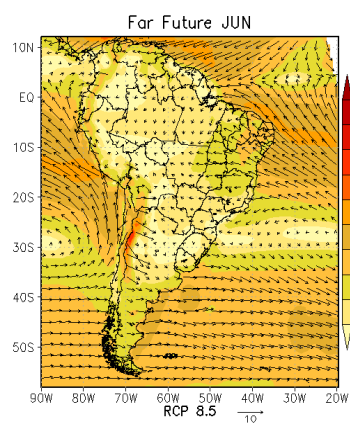
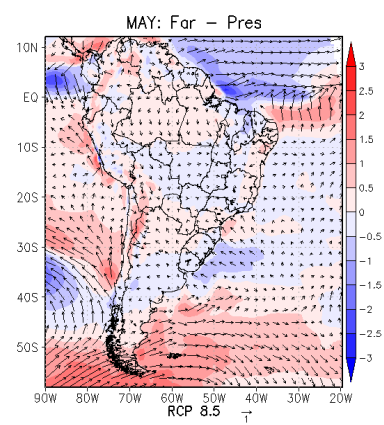
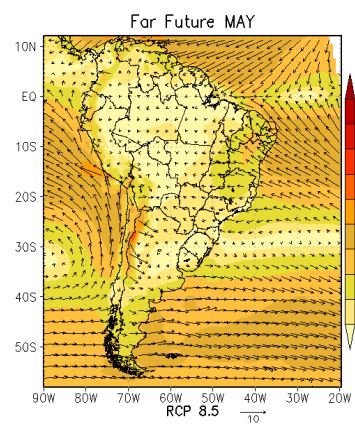


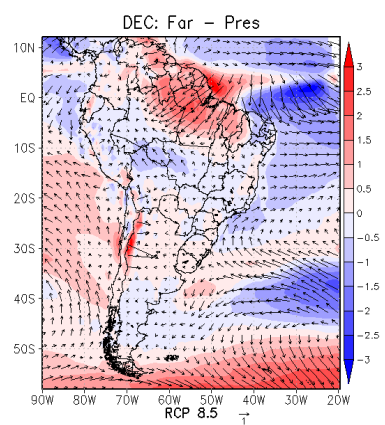
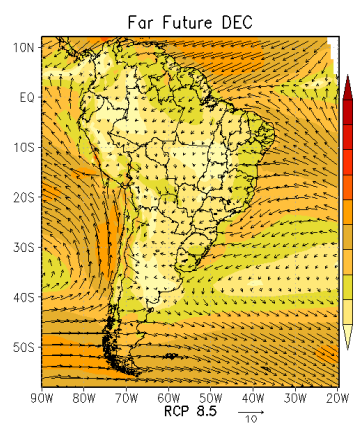
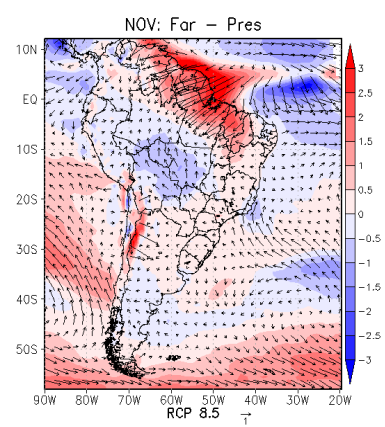
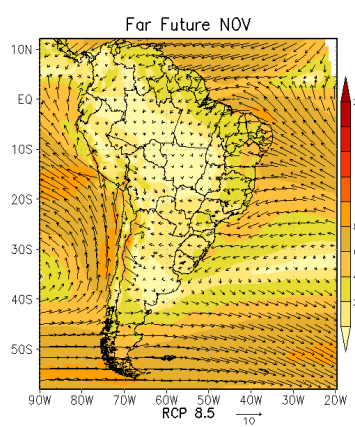
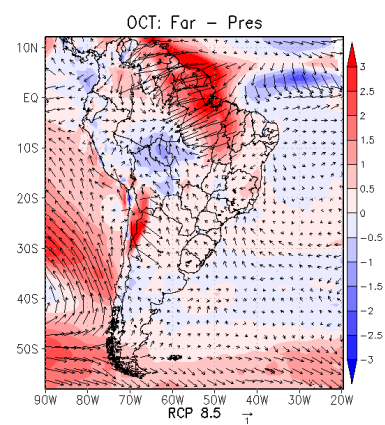
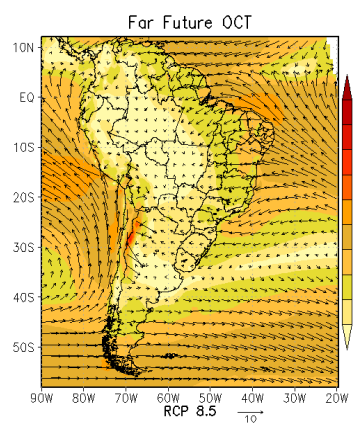
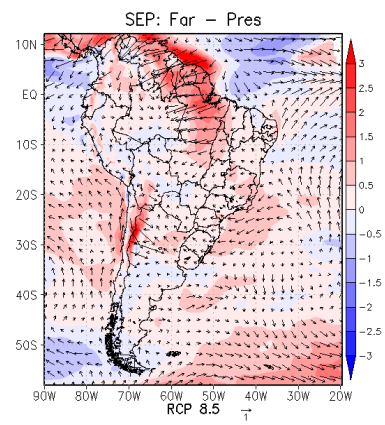
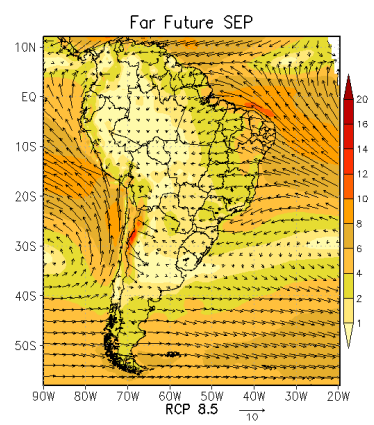




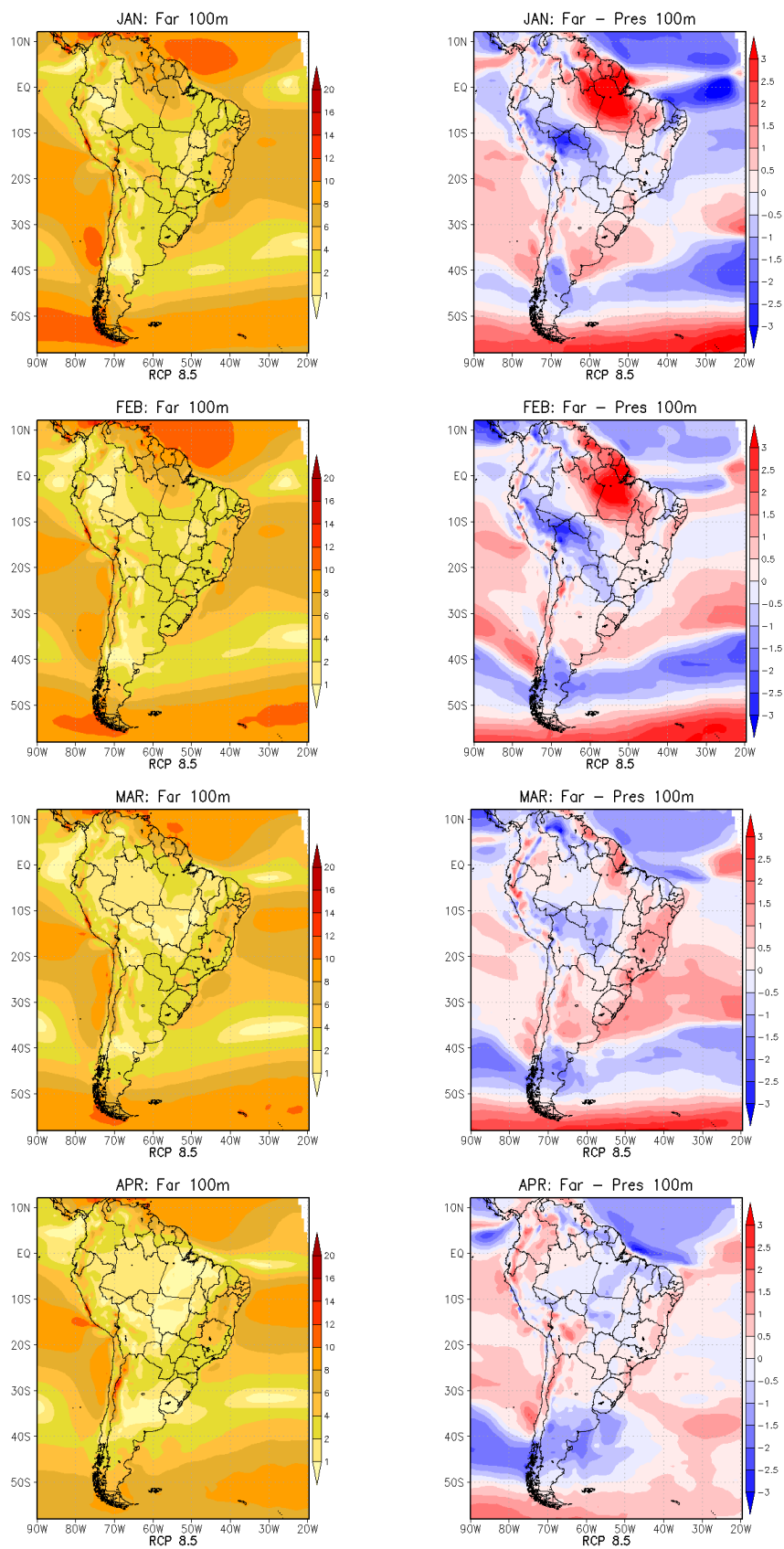
APÊNDICE I - Climatologia Mensal do Vento a 10 m (Futuro Distante, RCP8.5)

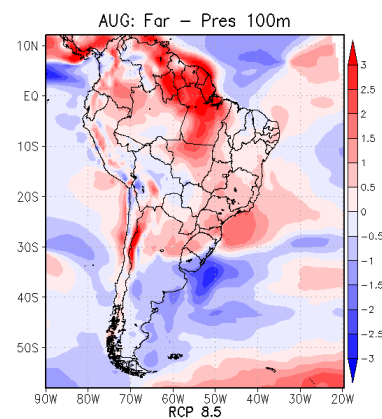
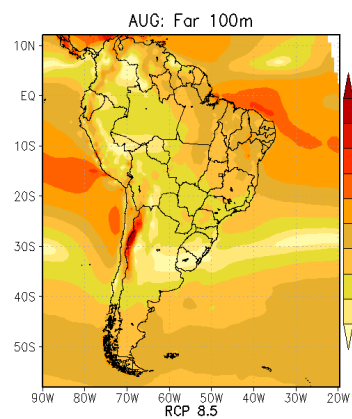
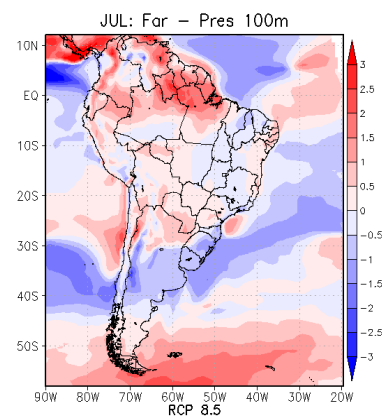
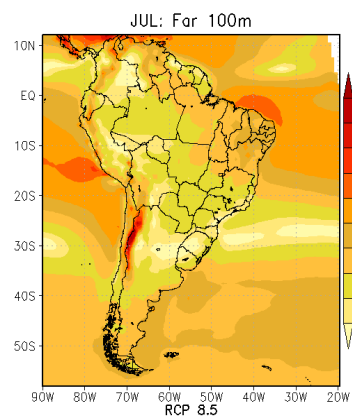
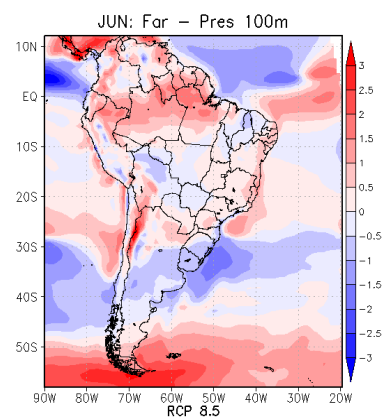
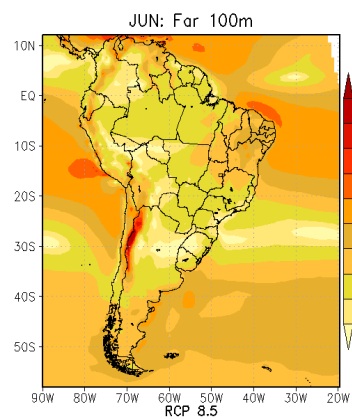
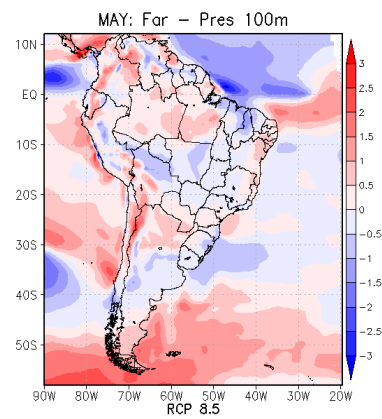
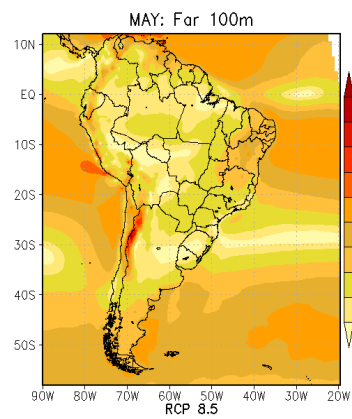


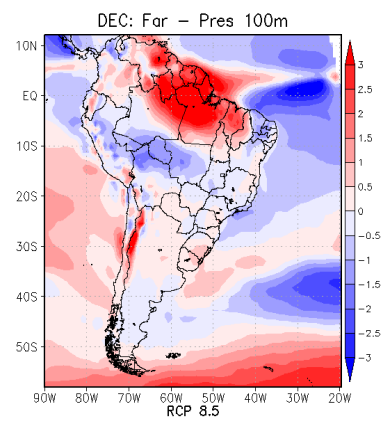
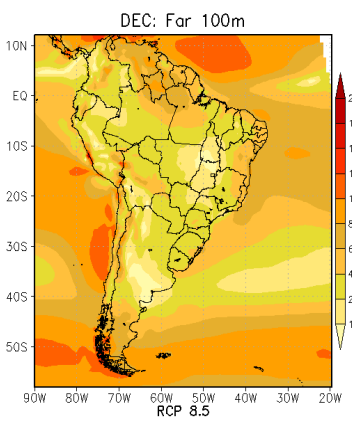
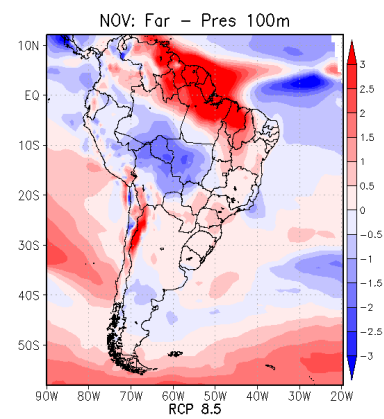
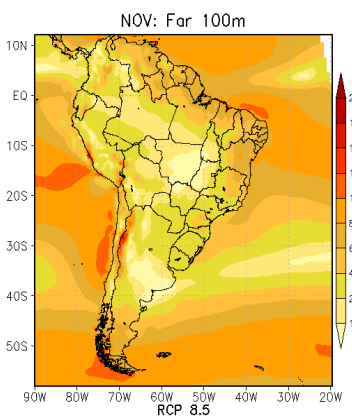
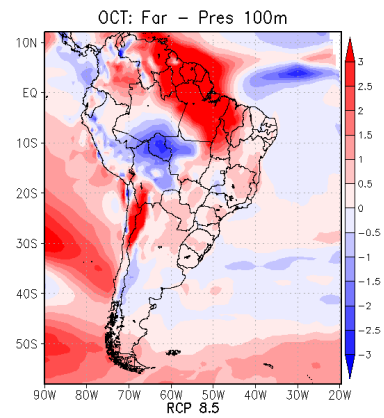
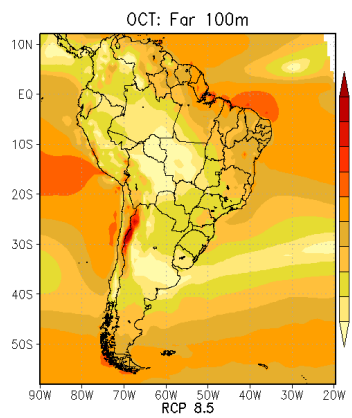
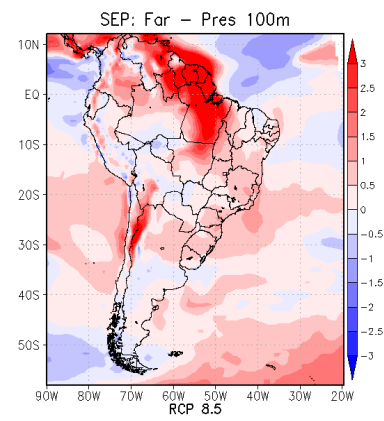
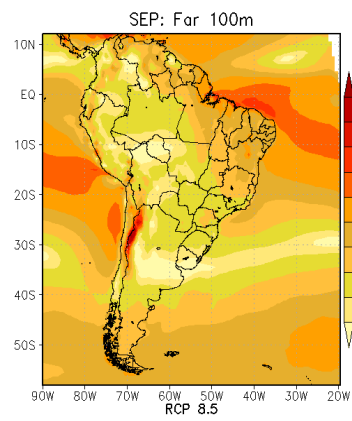




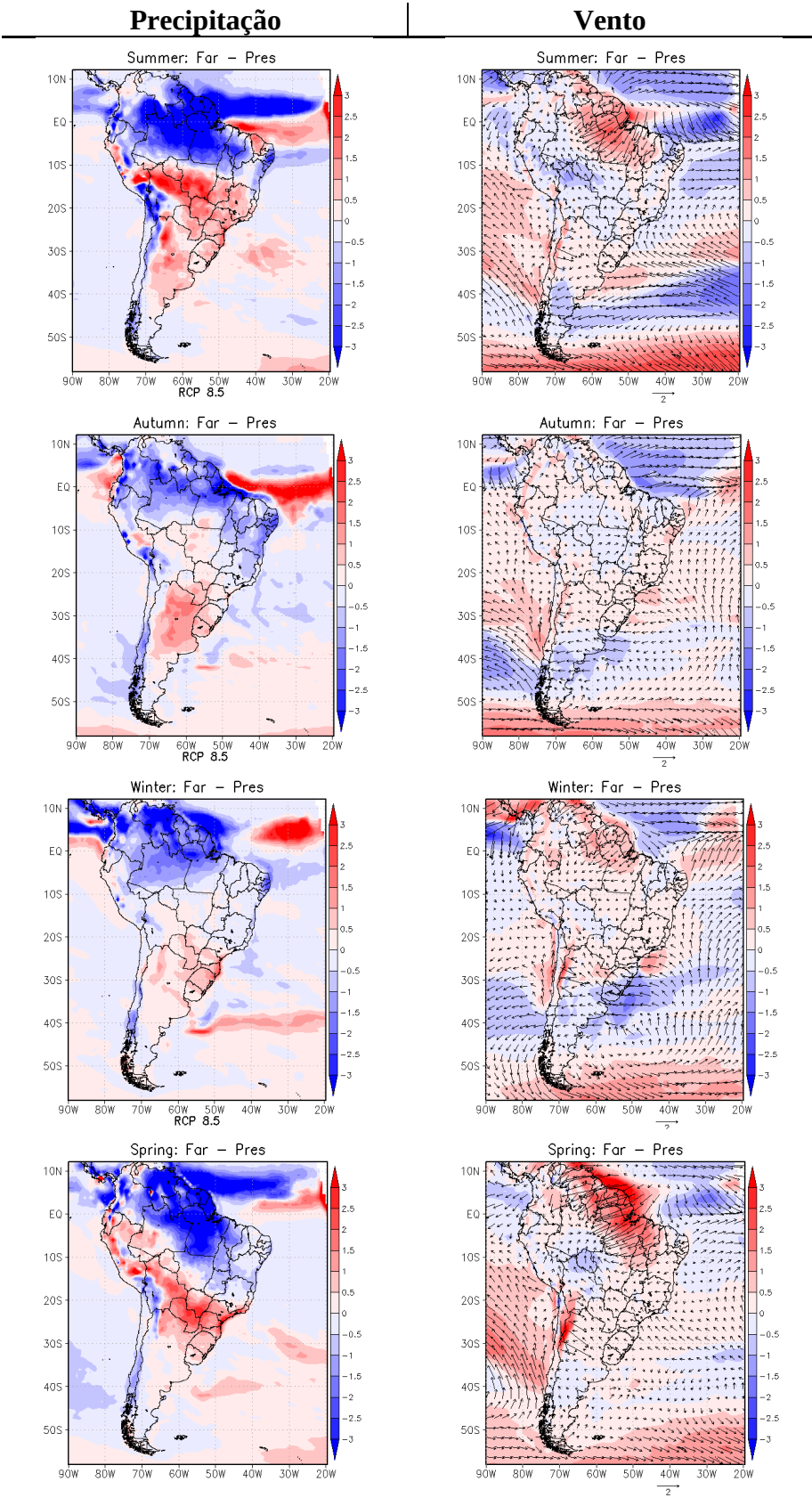
APÊNDICE J - Climatologia Mensal do Vento a 100 m (Futuro Distante, RCP8.5)







APÊNDICE L- Climatologia Sazonal Precipitação x Vento (Futuro, RCP8.5)



**APÊNDICE M – Resultado do teste de Man-Kendall para reta de tendência
(Futuro Distante, RCP8.5)**

Tabela6- Resultado do teste de Man-Kendall para reta de tendência. H indica o resultado do teste de significância sendo 1 significativo e 0 sem significância estatística. A inclinação da reta de tendência é dada por Sen'sslope.

	Nordeste				Sul			
	V	O	I	P	V	O	I	P
H	0	1	1	1	1	0	1	0
Sen'sslope	0,10	0,32	0,89	0,61	0,22	0	-0,16	0,02