

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

Maria Luiza Kovalski

# Variabilidade de alta frequência da velocidade do vento próximo à superfície no Nordeste do Brasil: clima presente e tendências futuras

São Paulo  
2023



Maria Luiza Kovalski

# Variabilidade de alta frequência da velocidade do vento próximo à superfície no Nordeste do Brasil: clima presente e tendências futuras

Dissertação apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de Concentração: Meteorologia  
Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Rosmeri Porfírio da Rocha.  
Coorientadora: Dr<sup>a</sup> Natália Machado Crespo

São Paulo  
2023

*“Somos como borboletas que voam por um dia e acham que é para sempre.”*  
*Carl Sagan*

## Agradecimentos

À minha orientadora. Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rosmeri Porfírio da Rocha, pela confiança e oportunidade dada nesta pesquisa, e à minha coorientadora Dr.<sup>a</sup> Natália Machado Crespo, que foi extremamente paciente e me ensinou muito.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro, sem o qual o desenvolvimento dessa pesquisa não teria sido possível.

Aos amigos e amigas que fiz no IAG nesse período, que são pessoas que espero encarecidamente levar para o meu futuro. Em especial cito o Danilo Couto de Souza, Matheus Bonjour, Renan Godoy e Jonathan Wendell Alves que me ajudaram, e muito, na programação em python.

À todos os professores do IAG, mas em especial à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rita Yuri Ynoue, que me acolheu na USP logo nos meus primeiros meses e me deu muitos conselhos. Além disso, ministrou a disciplina que se tornou a minha favorita da pós-graduação.

Aos meus pais, Margarete e Edson, e à minha irmã, Fernanda, que me deram muito apoio em toda essa trajetória.

Ao meu namorado, Thiago Minami, pelas pizzas veganas e pelos momentos de descontração. Obrigada por acreditar no meu potencial quando muitas vezes eu duvidei de mim.

E principalmente aos meus gatos, Ziggy e Logan, que me trouxeram alegria e conforto em tempos difíceis e são a principal razão pela qual eu consegui chegar tão longe.

## RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar as flutuações de alta frequência da velocidade do vento próximo à superfície, através das variações abruptas de vento ou rampas de vento, e avaliar tendências nos períodos futuros de médio e longo prazos no cenário RCP8.5 no Nordeste do Brasil (NEB). Foram utilizados dados de estações meteorológicas automáticas (EMAs), da reanálise ERA5 e de simulações com o modelo regional RegCM4. As simulações climáticas do RegCM4 foram forçadas pela ERA-Interim e pelos modelos globais HadGEM2 e MPI. Inicialmente, avaliou-se o padrão espacial dos ventos a 100 m de altura na região do NEB para o período de 1979 a 2014 separando a região em 5 subdomínios. Em todos os subdomínios selecionados as maiores velocidades de vento ocorrem entre agosto e outubro, e menores entre março e maio, correspondendo às estações seca e chuvosa, respectivamente. Para 8 localidades no NEB avaliou-se os dados de vento a 10 m da ERA5 e RegCM4-ERA1, e obteve-se que ambos conjuntos de dados tendem a apresentar maiores médias e medianas de velocidade do vento do que as EMAs em várias localidades, porém a ERA5 demonstra correlação superior à da simulação. Visando compreender a variabilidade do vento em alta frequência temporal, explorou-se as rampas de vento (aumento ou diminuição abruptas de velocidades). As rampas de vento apresentaram consistência no comportamento para localidades próximas ou no mesmo subdomínio. Além disso, é notável a influência de brisas terra-oceano, para as regiões litorâneas, e brisas vale-montanha, para regiões continentais na definição do horário preferencial de estabelecimento ou término das rampas. Por fim, investigou-se tendências futuras do vento a 10 m com os modelos RegCM4-HadGEM e RegCM4-MPI para o período futuro próximo (FP- 2040-2059) e futuro distante (FD - 2080-2099) em relação ao período de referência (PR - 1995-2014). Ambos os períodos futuros mostraram aumento consistente na mediana da velocidade do vento, indicando mudança na distribuição de frequência dos dados. Em relação às rampas de subida de vento obteve-se que áreas costeiras exibem tendência de aumento da frequência das rampas de vento, enquanto áreas continentais projetam tendência de redução para o FD.

## ABSTRACT

This study aimed to assess high-frequency fluctuations of the near surface wind speed, through abrupt wind variations or wind ramps, and evaluate future trends in medium and long-term periods in the RCP8.5 scenario in Northeast Brazil (NEB). Data from automatic weather stations (EMAs), ERA5 reanalysis , and regional model RegCM4 simulations were used. RegCM4 climate simulations were forced by ERA-Interim and HadGEM2 and MPI global models. Initially, the spatial pattern of 100 m wind speeds in the NEB region was evaluated for the period from 1979 to 2014, dividing the region into 5 subdomains. In all selected subdomains, the highest wind velocities occur between August and October, and the lowest ones from March to May, corresponding to the dry and rainy seasons, respectively. For 8 locations in NEB, wind speed at 10 m from ERA5 and RegCM4-ERA1 were evaluated, and it was found that both data tend to have higher wind speed means and medians than EMAs in various locations, but ERA5 presents higher correlation than simulation. In order to understand the high-frequency variability of wind, wind ramps (abrupt increases or decreases in speeds) were explored. It was found that wind ramps exhibit consistent behavior for nearby locations or within the same subdomain. Additionally, the influence of land-sea breezes for coastal regions and valley-mountain breezes for continental regions in defining the preferred time of onset or termination of ramps is notable. Finally, future trends of wind at 10 m were investigated with the RegCM4-HadGEM and RegCM4-MPI models for the near future period (NF - 2040-2059) and distant future period (DF - 2080-2099) compared to the reference period (RP- f 1995-2014). Both future periods indicate a consistent increase in the wind speed median, indicating a change in the frequency distribution of the data. Regarding wind ramps, coastal areas exhibited an increasing trend in the frequency of wind ramps, while for continental areas the trends are indicating wind ramps reduction for the DF.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de energia elétrica a partir de fonte eólica por estado em 2022 (MW médio). Fonte: ABEEólica, 2022 .....	16
Figura 2 - Representação esquemática dos sistemas atmosféricos na baixa e alta troposfera atuantes na América do Sul. Fonte: Reboita et al. (2010) .....	17
Figura 3 - Amostra de sinal de energia eólica. Adaptado de Sevlian & Rajagopal (2012) .....	23
Figura 4 - Subdomínios de estudo no NEB e suas delimitações: C1 ( $1^{\circ}06'S-4^{\circ}S$ , $46^{\circ}05'W-40^{\circ}55'W$ ), C2 ( $2^{\circ}27'S-5^{\circ}29'S$ , $40^{\circ}55'W-36^{\circ}22'W$ ), C3 ( $4^{\circ}40'S-10^{\circ}08'S$ , $36^{\circ}22'W-34^{\circ}21'W$ ), C4 ( $7^{\circ}50'S-12^{\circ}22'S$ , $43^{\circ}W-38^{\circ}33'W$ ) e C5 ( $12^{\circ}22'S-14^{\circ}55'S$ , $43^{\circ}27'W-40^{\circ}50'W$ ). Os pontos em azul representam os empreendimentos de energia eólica da região do NEB, segundo dados da ANEEL, e os triângulos representam o local de cada EMA .....	27
Figura 5 - Magnitude média sazonal do vento (m/s) a 100 m no período 1979-2014 para RegCM4-ERA5 (esquerda) e ERA5 (centro) e diferença entre RegCM4-ERA5 e ERA5 (direita) .....	31
Figura 6 - Função densidade de probabilidade da média da magnitude do vento (m/s) a 100 m de altura (a, c, e, g e i); esquerda) e média mensal e desvio padrão (b, d, f, h e j; direita) para os subdomínios C1 à C5 no período de 1979 a 2014 .....	36
Figura 7. Limiar de extremos de magnitude do vento (m/s) a 100 m de altura (percentil de 90%) no período 1979-2014 para RegCM4-ERA5 (esquerda), ERA5 (centro) e diferença entre RegCM4-ERA5 e ERA5 (direita) .....	38
Figura 8 - Séries temporais da velocidade do vento a 10 m de altura (m/s) a cada 3 h para períodos comuns da ERA5 (laranja), RegCM4-ERA5 (verde) e das EMAs (azul) .....	41
Figura 9 - Diagramas de Taylor da magnitude do vento (m/s) a 10 m para cada EMA. A estrela preta indica a observação e o círculo vermelho (cinza) a reanálise ERA5 (RegCM4-ERA5) .....	45
Figura 10 - Médias sazonais a cada 3h para as EMAs (preto tracejado), ERA5 (azul) RegCM4-ERA5 (vermelho) nas localidades de a) São Luís, b) Parnaíba, c) Fortaleza, d) Natal, e) João Pessoa, f) Petrolina, g) Irecê e h) Guanambi .....	50
Figura 11 - Boxplots a cada 3h para as EMAs (laranja), ERA5 (roxo) e RegCM4-ERA5 (azul) nas localidades de a) São Luís, b) Parnaíba, c) Fortaleza, d) Natal, e) João Pessoa, f) Petrolina, g) Irecê e h) Guanambi .....	54

Figura 12 - Frequência média mensal de rampas de subida (linha contínua) e de descida (linha tracejada) para o período de 1979-2005 para a ERA5 (laranja), RegCM4-ERA1 (vermelho), RegCM4-HadGEM (azul) e RegCM4-MPI (verde) nas localidades de a) São Luís, b) Parnaíba, c) Fortaleza, d) Natal, e) João Pessoa, f) Petrolina, g) Irecê e h) Guanambi .....	58
Figura 13 - Frequência relativa de rampas de subida a cada 3h para o período de 1979-2005 para os dados da ERA5 (laranja), RegCM4-ERA1 (vermelho), RegCM4-HadGEM (azul) e RegCM4-MPI (verde) para São Luís .....	60
Figura 14 - Semelhante à Figura 13, para Parnaíba .....	60
Figura 15 - Semelhante à Figura 13, para Fortaleza .....	61
Figura 16 - Semelhante à Figura 13, para Natal .....	61
Figura 17 - Semelhante à Figura 13, para João Pessoa .....	62
Figura 18 - Semelhante à Figura 13, para Petrolina .....	62
Figura 19 - Semelhante à Figura 13, para Irecê .....	63
Figura 20 - Semelhante à Figura 13, para Guanambi .....	63
Figura 21 - Frequência relativa de rampas de descida a cada 3h para o período de 1979-2005 para os dados da ERA5 (laranja), RegCM4-ERA1 (vermelho), RegCM4-HadGEM (azul) e RegCM4-MPI (verde) para São Luís .....	65
Figura 22 - Semelhante à Figura 21, para Parnaíba .....	65
Figura 23 - Semelhante à Figura 21, para Fortaleza .....	66
Figura 24 - Semelhante à Figura 21, para Natal .....	66
Figura 25 - Semelhante à Figura 21, para João Pessoa .....	67
Figura 26 - Semelhante à Figura 21, para Petrolina .....	67
Figura 27 - Semelhante à Figura 21, para Irecê .....	68
Figura 28 - Semelhante à Figura 21, para Guanambi .....	68
Figura 29 - Frequência relativa de não-rampas a cada 3h para o período de 1979-2005 para os dados da ERA5 (laranja), RegCM4-ERA1 (vermelho), RegCM4-HadGEM (azul) e RegCM4-MPI (verde) para São Luís .....	70

Figura 30 - Semelhante à Figura 29, para Parnaíba .....	71
Figura 31 - Semelhante à Figura 29, para Fortaleza .....	71
Figura 32 - Semelhante à Figura 29, para Natal .....	72
Figura 33 - Semelhante à Figura 29, para João Pessoa .....	72
Figura 34 - Semelhante à Figura 29, para Petrolina .....	73
Figura 35 - Semelhante à Figura 29, para Irecê .....	73
Figura 36 - Semelhante à Figura 29, para Guanambi .....	74
Figura 37 - Função densidade de probabilidade de frequência de intensidade (m/s) de rampas de subida para diferentes tempos de permanência (3, 6, 9, e 12 horas) para São Luís no período de DJF (cima) e JJA (abaixo) .....	76
Figura 38 - Semelhante à Figura 37 para Parnaíba .....	76
Figura 39 - Semelhante à Figura 37 para Fortaleza .....	77
Figura 40 - Semelhante à Figura 37 para Natal .....	77
Figura 41 - Semelhante à Figura 37 para João Pessoa .....	78
Figura 42 - Semelhante à Figura 37 para Petrolina .....	78
Figura 43 - Semelhante à Figura 37 para Irecê .....	79
Figura 44 - Semelhante à Figura 37 para Guanambi .....	79
Figura 45 - Função densidade de probabilidade de frequência na permanência de rampas de descida para São Luís no período de DJF (cima) e JJA (abaixo) .....	80
Figura 46 - Semelhante à Figura 45 para Parnaíba .....	80
Figura 47 - Semelhante à Figura 45 para Fortaleza .....	81
Figura 48 - Semelhante à Figura 45 para Natal .....	81
Figura 49 - Semelhante à Figura 45 para João Pessoa .....	82
Figura 50 - Semelhante à Figura 45 para Petrolina .....	82
Figura 51 - Semelhante à Figura 45 para Irecê .....	83
Figura 52 - Semelhante à Figura 45 para Guanambi .....	83

Figura 53 - Função densidade de probabilidade de frequência na permanência de não-rampas para São Luís no período de DJF (cima) e JJA (abaixo) .....	84
Figura 54 - Semelhante à Figura 53 para Parnaíba .....	84
Figura 55 - Semelhante à Figura 53 para Fortaleza .....	85
Figura 56 - Semelhante à Figura 53 para Natal .....	85
Figura 57 - Semelhante à Figura 53 para João Pessoa .....	86
Figura 58 - Semelhante à Figura 53 para Petrolina .....	86
Figura 59 - Semelhante à Figura 53 para Irecê .....	87
Figura 60 - Semelhante à Figura 53 para Guanambi .....	87
Figura 61 - Tendência sazonal do limiar extremo da magnitude do vento (m/s) a 10 m para RegCM4-HadGEM (esquerda) e RegCM4-MPI (direita) no período 2040-2059 com referência à 1995-2014 .....	89
Figura 62 - Tendência sazonal do limiar extremo da magnitude do vento (m/s) a 10 m para RegCM4-HadGEM (esquerda) e RegCM4-MPI (direita) no período 2080-2099 com referência à 1995-2014 .....	90
Figura 63 - Boxplot da magnitude do vento (m/s) a 10 m para RegCM4-MPI para o período de referência (PR), futuro próximo (FP) e futuro distante (FD) .....	93
Figura 64 - Tendência futura percentual (%) em rampas de subida para o FP (laranja) e FD (azul) .....	95

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Estações Meteorológicas Automáticas (EMAs) selecionadas para estudo .....	26
Tabela 2 - Estatísticas do vento a 100 m de altura para a ERA5 e RegCM-ERA1, obtidas com dados a cada 3 h em m/s, no período de 1979 a 2014 .....	32
Tabela 3 - Estatísticas da velocidade do vento (m/s) a 10 m de altura para a intersecção entre ERA5, RegCM4-ERA1 e EMAs .....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
CMIP5	<i>Coupled Model Intercomparison Project 5</i>
CORDEX	<i>Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment</i>
ECMWF	<i>European Center for Medium-Range Weather Forecast</i>
EMAs	Estações meteorológicas automáticas
FD	Futuro Distante
FP	Futuro Próximo
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>The Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
NEB	Nordeste do Brasil
PR	Período de Referência
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 CRISE CLIMÁTICA.....	14
1.2 POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO.....	15
1.3 REGIÃO NORDESTE: CLIMA E TENDÊNCIAS.....	16
1.3.1 BRISAS E VARIABILIDADE DOS VENTOS.....	17
1.3.2 DENSIDADE DE POTÊNCIA E PROJEÇÕES CLIMÁTICAS.....	19
1.3.3 AVALIAÇÃO.....	20
1.4 RAMPAS DE VENTO.....	21
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>24</b>
2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
<b>3 DADOS E METODOLOGIA.....</b>	<b>24</b>
3.1 DADOS.....	24
a) Reanálise.....	24
b) Simulações Climáticas Regionais +.....	25
c) Estações meteorológicas automáticas (EMAs).....	26
3.2 MÉTODOS UTILIZADOS.....	27
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>29</b>
4.1 TENDÊNCIAS REGIONAIS.....	30
4.2 VARIAÇÕES LOCAIS DO VENTO: EMAS, ERA5 E REGCM4.....	38
4.3 RAMPAS DE VENTO.....	55
4.3.1 Frequência média mensal.....	55
4.3.2 Ciclo diurno das rampas.....	59
4.3.3 Permanência das rampas.....	74
4.4 TENDÊNCIAS FUTURAS.....	88
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>95</b>
<b>6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>98</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>106</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CRISE CLIMÁTICA

As mudanças climáticas emergiram como um dos desafios mais prementes do nosso tempo, transcendendo fronteiras geográficas e impactando todos os aspectos da vida no planeta. De acordo com o *The Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) em seu *Sixth Assessment Report* (AR6) (IPCC, 2023), houve um aumento na temperatura da superfície do planeta de 1,1°C em 2011-2022, em relação à 1850-1900, que está relacionado às atividades humanas, principalmente através de emissões de gases de efeito estufa.

Cerca de 3,3 a 3,6 bilhões de pessoas vivem em ambientes amplamente suscetíveis aos impactos das mudanças climáticas (IPCC, 2023). Regiões e populações que enfrentam consideráveis obstáculos de desenvolvimento estão especialmente expostas aos perigos climáticos. A intensificação dos eventos climáticos extremos têm resultado na exposição de milhões de pessoas a crises alimentares urgentes e à diminuição da segurança hídrica. No período entre 2010 e 2020, a mortalidade humana ocasionada por inundações, secas e tempestades revelou-se 15 vezes maior em áreas altamente vulneráveis, contrastando com regiões de vulnerabilidade muito baixa (IPCC, 2023).

Um exemplo muito claro pode ser visto em julho no Brasil de 2023, onde 29 cidades no estado de Alagoas decretaram emergência devido às chuvas intensas (FARIAS, 2023). Paralelamente, no Uruguai, uma crise hídrica assolou o país, marcada pela pior seca dos últimos 70 anos (PIEPER, 2023). Além disso, no âmbito global, o mês de junho também apresentou uma marca inquietante. Registrhou-se como o junho mais quente já documentado em termos globais (RAMIREZ, 2023).

Diante da ausência na adoção de medidas de mitigação das mudanças climáticas por parte dos responsáveis pelas tomadas de decisões, uma ampla coalizão de jovens e cientistas em âmbito global está emergindo como uma força motriz de mudança. Esses atores têm se unido por meio de manifestações e iniciativas, amplificando suas vozes em prol de políticas climáticas mais robustas e eficazes. Dentre esses coletivos, merecem destaque o movimento *Fridays for Future* (<https://fridaysforfuture.org/>), que também se expande pelo Brasil, bem como o *Extinction Rebellion* (<https://rebellion.global/>) e o *Scientists for Extinction Rebellion* (<https://scientistrebellion.org/>). Esses grupos coletivos, pautados pela consciência da

urgência climática, vêm se destacando como catalisadores de conscientização e mobilização global para enfrentar a crise climática.

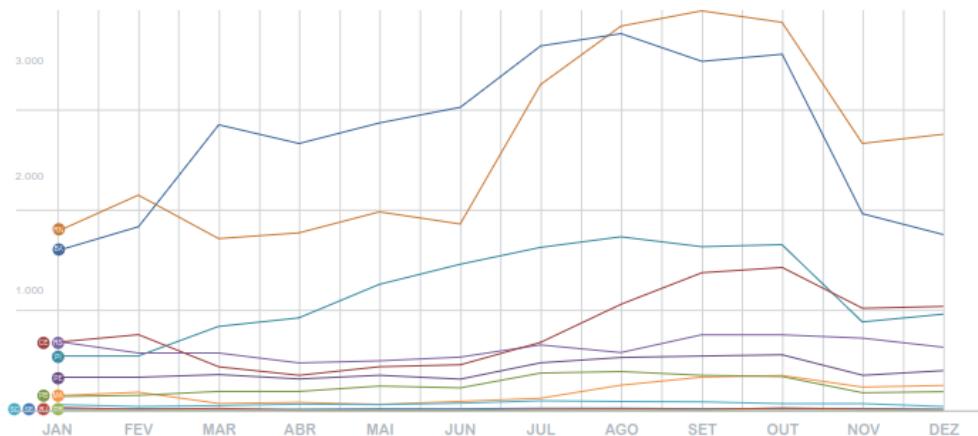
No cerne das aspirações desses grupos engajados reside uma chamada urgente à ação em direção a uma transformação abrangente do sistema energético global. A busca por uma trajetória sustentável é um componente central de suas demandas, destacando a necessidade de abandonar a dependência dos combustíveis fósseis e adotar, de maneira decisiva, fontes de energia limpas e renováveis.

Em um mundo interconectado, a resposta à crise climática requer colaboração internacional e compromissos tangíveis para salvaguardar o nosso planeta para as gerações futuras.

## 1.2 POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

Além da preocupação com as mudanças climáticas, a pandemia da COVID-19 e a invasão da Rússia na Ucrânia evidenciaram uma crise energética global, a qual revelou a vulnerabilidade decorrente da dependência contínua de combustíveis fósseis (GWEC, 2023). Nesse contexto, a busca por uma transição energética limpa e renovável também emerge como um imperativo para garantir a resiliência das nações diante de choques externos e limitações de recursos.

O Brasil, já reconhecido por sua matriz elétrica predominantemente hídrica, tem buscando ampliar ainda mais a presença de fontes limpas e renováveis. Dentre elas, a energia eólica apresenta-se como uma fonte alternativa de energia limpa com tendência de grande crescimento no país. O Brasil possui, atualmente, 916 usinas e 26 GW de potência eólica instalada, com uma presença de 13,0% da matriz elétrica brasileira e um crescimento de 27,0% em relação à 2020 (ABEEÓLICA, 2023). Desta capacidade, 94,6% da potência instalada e outorgada atualmente situa-se no Nordeste do Brasil (ANEEL, 2023), se posicionando como a região líder na produção eólica do país. Além disso, a região se destaca com os estados que tiveram maior geração em 2022 (Figura 1), entre os quais estão Bahia (24,2 TWh), Rio Grande do Norte (23,2 TWh), Piauí (10,3 TWh), Ceará (7,1 TWh) (ABEEÓLICA, 2022).



REGIÃO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
RN	1.838,2	2.157,8	1.703,5	1.788,9	1.998,5	1.866,4	3.282,6	3.815,1	3.944,0	3.894,6	2.652,6	2.785,8
BA	1.658,0	1.828,3	2.837,6	2.669,9	2.826,0	3.005,4	3.634,0	3.755,3	3.486,3	3.550,0	1.981,9	1.785,0
PI	568,5	553,8	825,2	913,6	1.259,4	1.456,9	1.638,8	1.725,5	1.610,2	1.654,9	868,2	966,8
RS	636,0	586,6	585,2	486,0	494,1	536,0	641,7	589,0	730,8	735,6	720,4	637,2
CE	616,6	744,7	419,3	357,1	435,8	466,9	672,7	1.061,7	1.375,9	1.412,2	1.006,1	1.096,0
PE	327,3	327,2	357,5	323,8	345,2	310,3	483,0	510,6	526,9	543,8	344,9	400,6
MA	146,6	185,8	75,4	83,3	70,4	93,7	113,3	248,5	337,2	342,5	224,3	251,6
PB	142,8	156,3	190,4	191,1	240,6	230,5	370,5	378,1	344,4	341,1	181,2	198,4
SC	50,9	43,4	55,4	60,6	69,6	77,1	94,3	86,5	84,4	63,9	64,7	48,6
SE	5,3	7,8	5,2	5,1	8,0	8,6	11,7	10,9	8,3	9,2	9,7	8,3
RJ	9,0	5,9	8,8	3,7	4,3	3,8	7,6	9,3	7,9	10,5	8,7	9,0
PR	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Figura 1 - Geração de energia elétrica a partir de fonte eólica por estado em 2022 (MW médio). Fonte: ABEEólica, 2022.

Partindo de uma perspectiva econômica, entre 2011 a 2020 foram investidos R\$35,8 bilhões no setor eólico brasileiro, o que movimentou R\$321 bilhões na economia (ABEEÓLICA, 2023). Segundo o relatório de 2023 elaborado pela *Global Wind Energy Council*, em 2022 o Brasil aparece com uma nova capacidade instalada de 4.065 MW, totalizando uma capacidade total instalada *onshore* de 25.632 MW. Além disso, é cotado como um dos países mais promissores em investimentos no setor eólico.

### 1.3 REGIÃO NORDESTE: CLIMA E TENDÊNCIAS

Geograficamente, o Nordeste do Brasil (NEB) situa-se entre 17°S-1°N de latitude e 35°O-45°O de longitude e é constituído pelos estados de: Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Piauí, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe, abrangendo uma área de 1.552.175,419 km<sup>2</sup>.

Devido à sua posição geográfica, o NEB sofre a interferência de alguns sistemas atmosféricos, dentre eles estão a Zona de Convergência Intertropical, ventos

alísios, ondas de leste, frentes e a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (REBOITA *et al.*, 2010; Figura 2). A região apresenta um ciclo anual bem definido, onde a velocidade do vento é maior no segundo semestre, entre o inverno e primavera, e menor durante o verão e outono (AMARANTE *et al.*, 2001).

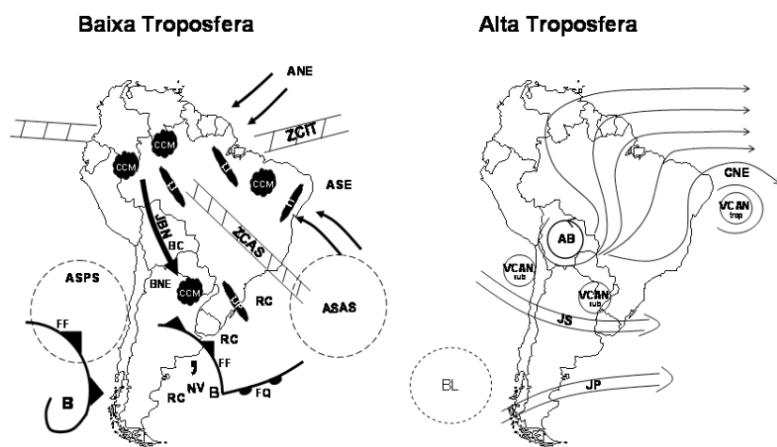


Figura 2 - Representação esquemática dos sistemas atmosféricicos na baixa e alta troposfera atuantes na América do Sul. Fonte: Reboita *et al.* (2010).

Em função da sua importância nas atividades humanas, um grande número de estudos sobre o clima do NEB tem como foco principal a precipitação, principalmente devido a secas severas que assolam a região. Estudos focados no vento são mais restritos.

### 1.3.1 BRISAS E VARIABILIDADE DOS VENTOS

A diferença entre a temperatura do continente e do oceano é responsável pela formação da brisa marítima e da brisa terrestre. Durante o dia, o continente aquece mais rapidamente do que o oceano, resultando em uma pressão mais baixa sobre o primeiro em comparação ao oceano. Isso provoca a formação da brisa marítima, um vento que sopra do mar em direção ao continente. Por outro lado, à noite, temos o efeito oposto, onde o continente perde calor mais rapidamente do que o oceano, resultando em pressões mais altas sobre o continente. Isso faz com que o vento sopre do continente em direção ao oceano, sendo conhecido como brisa terrestre (LIMA *et al.*, 2021).

Investigando a variação da precipitação diurna no NEB, Kousky (1980) examinou a interação entre as circulações locais de brisa com ventos alísios utilizando dados de superfície observacionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no

período de 1961-1970. De acordo com o autor, os picos de chuva durante a noite ocorrem devido à intensificação da brisa terrestre, que sopra em direção oposta ao fluxo médio dos ventos alísios. Isso cria uma convergência de massas de ar próxima à costa, favorecendo uma maior atividade convectiva durante a noite. Kousky (1980) também constatou a presença de máximo diurno, em áreas localizadas entre 100 e 300 km em relação à costa, devido à brisa marítima, porém para áreas mais interiores a variabilidade diurna da chuva está mais associada às brisas vale-montanha.

Mais especificamente para a região litorânea do Ceará, Lima *et al.* (2021) investigou o ciclo diário entre as brisas marítima e terrestre, com ênfase na *Sea Breeze Front* (SBF), para 4 regiões do litoral cearense na região leste e oeste. Utilizando dados do *Weather Research and Forecasting Model*, os autores constataram que em torno das 6 h (hora local) a componente *offshore* é mais intensa, e que às 12 h a SBF se encontra no continente, o que representa forte gradiente térmico entre continente-oceano. Lima *et al.* (2021) também demonstrou que, através de análise de imagens do satélite GOES-Leste/ABI, independente se em épocas de período seco ou chuvoso, a SBF pode ser identificada por um conjunto paralelo de nuvens.

Ainda para o Ceará, Teixeira (2008) investigou, para o período de 1974 a 1987, a frequência horária de chuva para os meses de período chuvoso e seco e constatou que há maior incidência de precipitação no período noturno, principalmente de madrugada, e relacionou esses eventos com a passagem da brisa terrestre até o período da manhã. Por outro lado, segundo o autor, a brisa marítima está relacionada com a menor incidência de chuva para o período da tarde. Tal estudo levou em consideração imagens de satélite, registros de chuva e campos de vento de modelos numéricos.

Embora o NEB apresente um ciclo anual bem definido, quando tratamos de aspectos dinâmicos do vento, além da dependência de variações nas condições de vento causadas por sistemas locais (OLIVEIRA; COSTA, 2011), há também a dependência de aspectos remotos controlados pela temperatura da superfície das bacias dos oceanos Atlântico e Pacífico, que influenciam a variabilidade climática do NEB (RAO *et al.*, 1993; HASTENRATH, 1990), e consequentemente de tendências climáticas em ambos. Recentemente, utilizando reanálise centenária, Brito (2018) investigou a influência da variabilidade de baixa frequência no vento próximo à superfície (a 10 m de altura) no NEB. Entre as principais conclusões estão que no outono (março-abril-maio) em anos de *El Niño* o vento se intensifica nessa região,

enquanto que em anos de *La Niña* observa-se o oposto. Por outro lado, a combinação de *El Niño* (*La Niña*) e Atlântico Norte mais quente (mais frio) tende a intensificar a anomalia positiva do vento.

### 1.3.2 DENSIDADE DE POTÊNCIA E PROJEÇÕES CLIMÁTICAS

O interesse em energias renováveis e quais os impactos das mudanças climáticas no vento e densidade de potência cresceu nas últimas décadas (GREENE *et al.*, 2010; TOBIN *et al.*, 2016; SAILOR *et al.*, 2008; PRYOR *et al.*, 2005). No entanto, na América do Sul poucos estudos investigaram projeções climáticas da intensidade do vento e em consequência a densidade de potência como revisado em Reboita *et al.* (2018). Dentre alguns estudos estão: (a) Pereira *et al.* (2013) que analisando projeções climáticas do modelo Eta no cenário 1B do CMIP3 (IPCC, 2007) obtiveram para o período 2070-2100 um aumento de 100% na densidade de potência no norte-nordeste do Brasil; (b) Reboita *et al.* (2018) que mostrou um aumento na intensidade do vento e da densidade de potência no norte do Brasil considerando projeções futuras do RegCM4; (c) Ramos (2021) que investigou a tendência no vento a 100 m de altura e seu impacto no potencial eólico do NEB, utilizando um conjunto de projeções climáticas realizadas com o RegCM4 para a primeira fase do *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment from World Climate Research Program - CORDEX* (GIORGIO *et al.* 2009; LLOPART *et al.*, 2014). Dentre os resultados encontrados por esses autores estão projeção de aumento da velocidade dos ventos, ao longo de todo ano, nos subdomínios costeiros, sendo mais intenso no período de outono (março-maio) do futuro distante (2070-2099); para a estação seca (junho-novembro) também projeta-se um aumento da velocidade do vento porém menor se comparado com o período de outono. É importante destacar que estes três estudos utilizaram simulações climáticas com resolução horizontal entre 40 e 50 km.

Devido à relação cúbica entre a velocidade do vento e o potencial eólico e ainda à importância de fatores locais na evolução da velocidade do vento, uma melhor representação de processos próximos à superfície em modelos regionais pode ser crucial, tanto no clima presente como no clima futuro. Vários estudos com modelos globais (CUSTÓDIO *et al.*, 2017) e regionais (DA ROCHA *et al.*, 2015; GUTOWSKI *et al.*, 2016) têm mostrado resultados mais realísticos e destacado a importância de utilizar espaçamentos de grade mais refinados nas regionalizações climáticas quando estão analisando a chuva e temperatura do ar próximo à superfície.

### 1.3.3 AVALIAÇÃO

Para a implementação de parques eólicos é importante conhecer o potencial que é oferecido na área. Para algumas regiões, dados observacionais podem ser escassos ou inexistentes, sendo assim, o uso de dados de reanálise e modelos atmosféricos tornam-se essenciais para a exploração dos ventos da região. No entanto, é necessário avaliar se esses dados são capazes de representar a climatologia de ventos da região a ser investigada.

Dentre os estudos que fazem esse tipo de avaliação, Fernandes *et al.* (2020) compararam dados do vento a 100 m da reanálise ERA5 com dados observacionais: de uma torre meteorológica no Maranhão, localizado no Centro de Lançamento de Alcântara, do *Light Detection and Ranging* (LIDAR) de um píer costeiro em Santa Catarina, e de uma plataforma de petróleo da Petrobrás, na Bacia de Santos. Os resultados encontrados apontaram boa adequação da reanálise para a velocidade do vento em escala diária e mensal, assim como para simulações de energia eólica. Porém, a ERA5 não demonstrou boa representação para a variabilidade diurna onde há influência de brisa marítima.

No trabalho realizado por Tavares *et al.* (2020), a magnitude dos ventos a 100 m das reanálises CFSv2, ERA5 e MERRA2 foram validadas com dados do programa PNBOIA para as regiões Sul e Sudeste do Brasil, incluindo as boias de Cabo Frio, Cabo Frio 2, Vitória, Santos e Itajaí. O conjunto de dados da ERA5 foi o que demonstrou melhor representar os ventos da região, seguido pelo conjunto CFSv2, com exceção de Itajaí, onde os dados da MERRA2 tiveram a segunda melhor representação. Para a análise do potencial *offshore* da área de estudo foram utilizados apenas os dados da ERA5, que demonstraram um potencial estimado de 344 GW para a região utilizando uma turbina de vento com densidade de capacidade de 3 MW/km<sup>2</sup>.

Gruber *et al.* (2022) também avaliou o desempenho do conjunto de dados de vento da ERA5 em relação à MERRA2 para alguns parques eólicos no Brasil, Estados Unidos, África do Sul e Nova Zelândia, onde dados do *Global Wind Atlas* foram utilizados para correção de viés. Nesse trabalho, a reanálise ERA5 mostrou melhores indicadores de correlação e raiz quadrada do erro-médio que a MERRA2, com exceção da Nova Zelândia.

Em seu trabalho sobre ciclones subtropicais, Cardoso (2019) realizou a validação das reanálises ERA5 e CFSR com dados diários de vento em superfície (10

m) para nove estações meteorológicas automáticas e cinco bóias meteoceanográficas localizadas na costa sudeste brasileira, além de realizar uma análise para dados de vento médios mensais e anuais. De maneira geral, notou-se que as reanálises superestimaram a intensidade dos ventos no continente e um comportamento oposto foi observado no oceano.

Recentemente, Crespo *et al.* (2022) avaliaram a magnitude dos ventos a 10 m, a cada 6h, em plataformas e bóias sobre as bacias do sudeste brasileiro com as reanálises CFSR, ERA5 e MERRA2, além de dados de satélite do CCMP. De forma geral, os quatro conjuntos de dados representam as características de bóias e plataformas, no entanto CCMP e CFSR são os conjuntos que melhor representam os extremos de vento para a maior parte das observações, enquanto que ERA5 e CCMP representam melhor os ventos médios. Apesar disso, trabalhos que avaliam a magnitude dos ventos próximos à superfície nas reanálises para a região Nordeste do país são escassos.

#### 1.4 RAMPAS DE VENTO

Embora os ventos possam ser uma fonte de energia renovável e limpa, sua inconstância pode aumentar os custos de geração e reduzir a confiabilidade do sistema de energia, dificultando seu desenvolvimento e aplicação, uma vez que pode causar problemas no fornecimento de energia. Por isso, obter uma previsão precisa do vento pode garantir maior eficiência dos sistemas de geração de energia eólica, assim como aumentar a confiabilidade dos sistemas. Dentre os estudos realizados para melhorar a previsão dos ventos está a previsão de eventos de rampas (YANG *et al.*, 2020; GALLEGO-CASTILLO *et al.*, 2015; D'AMICO *et al.* 2022).

Rampas são caracterizadas por mudanças abruptas e significativas na intensidade dos ventos, conhecidas como rampas de vento (*wind ramps*), ou nas perspectivas de geração eólica, chamadas de rampas de potencial (*wind-power ramps*). As rampas de vento podem fornecer informações valiosas sobre os fenômenos atmosféricos que influenciam uma determinada região, como brisas, tempestades, furacões e frentes frias. Por outro lado, as rampas de potencial, obtidas a partir do potencial de parques eólicos, são mais relacionadas ao gerenciamento desses parques do que aos fenômenos atmosféricos em si (PEREYRA-CASTRO & CAETANO, 2022).

O estudo das rampas pode ser uma ferramenta essencial para identificar condições climáticas que impactam o potencial de geração de energia eólica. Através

da compreensão da dinâmica dos ventos em diferentes regiões, é possível aprimorar a previsão e o planejamento para a produção eficiente de energia eólica. Dessa forma, as rampas nos oferecem uma visão abrangente tanto das variações meteorológicas locais quanto da gestão otimizada da energia eólica.

Gallego-Castillo *et al.* (2015) analisaram estudos de rampas entre os anos de 2007 até agosto de 2014, e constataram um aumento anual de estudos publicados e/ou apresentados em conferências sobre o tema. Os autores buscaram definir rampas a partir das determinações encontradas na literatura. Primeiramente, segundo os autores, uma rampa de vento ou uma rampa de potencial, pode ser caracterizada por cinco parâmetros:

- 1) Magnitude ( $\Delta Pr$ ): variação da intensidade do vento ou potencial durante um evento;
- 2) Duração ( $\Delta t$ ): período em que uma grande variação do vento ou potencial ocorre;
- 3) Taxa da rampa: intensidade da rampa, que é determinada pela magnitude e duração do evento;
- 4) Tempo ( $t_0$ ): instante no tempo relacionado à ocorrência da rampa;
- 5) Direção: se será uma rampa de subida ou descida, baseada na variação do potencial ou na intensidade dos ventos.

Dentre esses parâmetros, Gallego-Castillo *et al.* (2015) observaram que os trabalhos mostram diferentes formas de análise. Por exemplo, para a magnitude alguns estudos utilizam valores absolutos enquanto outros usam valores percentuais. Já para a duração, há uma variação entre 10 min até 8 h.

Com relação à definição de rampa, em geral é utilizada uma classificação binária (0 e 1), onde é classificada como rampa (classificação 1) onde há uma variação na velocidade ou potencial positiva (rampa de subida) ou negativa (rampa de descida) em um valor superior à magnitude ( $\Delta Pr$ ) em um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ). Caso essa variação seja menor que o módulo da magnitude, então é considerado como não-rampa (classificação 0). A Figura 3 representa uma rampa de forma simplificada.

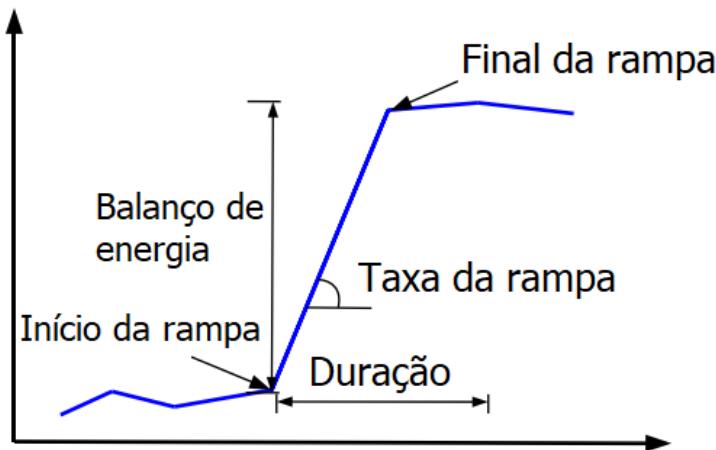


Figura 3 - Amostra de sinal de energia eólica. Adaptado de Sevlian & Rajagopal (2012).

Dentre os estudos em detecção de rampas está a pesquisa realizada por Walton *et al.* (2013), que teve como objetivo analisar a consistência espacial de eventos de rampa utilizando dois parques eólicos nos Estados Unidos com dados da velocidade do vento a 80 e 10 m. O estudo mostrou que dentro de 160 km, distância entre um parque localizado em Pomeroy e outro no centro do estado de Iowa, as rampas se mostram espacialmente consistentes onde foi possível detectar rampas de vento no Iowa 2-3 h após a ocorrência de rampas em Pomeroy. Eles investigaram que para essas regiões os eventos de rampa são geralmente causados por um forte gradiente de pressão ou pela passagem de uma frente.

Em Sherry e Rival (2015) são analisados ventos em diferentes alturas para um período de 2 anos (2012 e 2013), em uma estação próxima às montanhas rochosas na província canadense de Alberta. Os resultados mostraram que as rampas são um fenômeno sazonal, com eventos de rampa de subida mais prevalentes do que eventos de rampa de descida. Esses eventos são influenciados por eventos de vento Foehn, conhecido localmente como vento Chinook, que esteve presente em mais de 50% do tempo em análises de grandes rampas de energia eólica (mudanças de mais de 50% em até 4 h).

Dentre os recentes estudos de rampas está a análise realizada por Pereyra-Castro e Caetano (2022). Os autores caracterizaram, para quatro localidades do México, rampas de ventos extremas e observaram que no verão as rampas de vento têm sua formação mais propícia devido à atividade de ciclones tropicais que causam eventos de 1 a 3 h de duração. Para o inverno, os sistemas meteorológicos de latitudes médias foram os que mais deram origem a rampas extremas, com 1 a 4 h de

duração e persistência de ventos intensos variando entre 5 a 40 h.

No Brasil existem poucos estudos sobre rampas de vento. Por essa razão, esse trabalho também visa contribuir com uma análise de rampas de vento a 10 m de altura na região NEB.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVOS GERAIS

O principal objetivo deste trabalho é investigar a variabilidade de alta frequência na velocidade do vento no clima presente, através das características das rampas de vento, e suas tendências em projeções climáticas do RegCM4, de médio e longo período, sobre o NEB.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar como o ERA5 e o RegCM4 representam o vento próximo da superfície no clima presente, através de dados observados de estações meteorológicas a cada 3 h, e a variabilidade de alta frequência do vento;
- Identificar e analisar regionalmente, e sazonalmente, as rampas de vento no clima presente;
- Identificar tendências climáticas na intensidade dos ventos por meio de projeções climáticas do RegCM4 para o futuro;
- Avaliar o impacto das tendências climáticas na ocorrência de rampas de vento, analisando o possível aumento ou diminuição ao longo do tempo.

## 3 DADOS E METODOLOGIA

### 3.1 DADOS

#### a) Reanálise

Como observações diretas do vento a 100 m de altura são muito escassas em todo o Brasil, a qualidade das simulações climáticas é avaliada através de comparações com dados de reanálise no clima presente (1979-2014). Uma reanálise assimila as mais diversas fontes possíveis de observações (radiossondagens, estações de superfície, produtos de satélite etc.) para reconstrução de variáveis atmosféricas utilizando modelo numérico com ciclo de previsão de curto período. Em geral, reanálises que assimilararam maior quantidade de observações possuem maior habilidade de representar fatores locais e são consideradas uma fonte indispensável

para validar simulações climáticas do estado da atmosfera (REBOITA *et al.*, 2014). Neste trabalho são utilizadas os componentes u e v do vento da reanálise ERA5 (HERSBACH; DEE, 2016), pertencente ao *European Center for Medium-Range Weather Forecast - Copernicus Climate Change Service* (ECMWF-C3S) a 100 e 10 m de altura para o período de 1979 a 2018. A resolução espacial utilizada é de 0,25° x 0,25° de longitude por latitude, com resolução temporal de 3 em 3 h.

### b) Simulações Climáticas Regionais

Neste trabalho foram utilizadas as saídas das simulações do modelo climático regional RegCM4 (GIORGİ *et al.*, 2012). O RegCM4 é uma evolução do RegCM3 (PAL *et al.*, 2007) e apresenta várias atualizações no que diz respeito à física do modelo. Em linhas gerais, o RegCM4 resolve as equações para uma atmosfera compressível em área limitada em coordenada vertical sigma-pressão e pode ser executado utilizando núcleo dinâmico hidrostático ou não-hidrostático. O RegCM tem sido usado por diversas instituições de pesquisa e para variadas aplicações em estudos do clima atual e mudanças climáticas (GIORGİ; MEARNS 1999; PAL *et al.* 2007; GIORGI *et al.*, 2012; DA ROCHA *et al.*, 2014). A partir de 2014, uma das maiores inovações no RegCM4 foi a inclusão do *Community Land Model* versão 4.5 (CLM4.5, OLESON *et al.*, 2013) como uma alternativa ao *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme* (BATS, DICKINSON *et al.*, 1993). O CLM4.5 representa o estado-da-arte em modelagem de superfície, sendo uma evolução em termos de descrição da temperatura e umidade do solo, da vegetação e dos processos hidrológicos.

As projeções climáticas que são utilizadas nessa pesquisa provêm do projeto “*Western South Atlantic Climate Experiment*” (CRESPO *et al.*, 2022) e possuem o domínio recomendado para simulações do CORDEX (GIORGİ *et al.*, 2009) para América do Sul. Para o clima presente, será avaliada a simulação de avaliação, onde o RegCM4 utilizou resolução horizontal de 25 km e condição inicial e de fronteira dados das reanálises ERA-Interim (DEE *et al.*, 2011) para o período 1979-2014 (será referida como RegCM4-ERA1), e os modelos de circulação global do CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project 5*), HadGEM2-ES (referido como RegCM4-HadGEM) e MPI-ESM-MR (referido como RegCM4-MPI), ambos para o período 1979-2005. Em síntese o HadGEM2-ES é um modelo global acoplado pertencente à família de configurações climáticas HadGEM2 do *Met Office Hadley Centre*, que possui uma componente terrestre (*Earth-System*, ES) com 38 níveis verticais e resolução espacial

de 1,25° de latitude e 1,87° de longitude. O modelo inclui em sua configuração processos com ciclo de carbono terrestre, superfície terrestre e hidrologia, aerossóis, troposfera, oceano e gelo marinho, química e biogeoquímica oceânica (COLLINS *et al.*, 2008; MARTIN *et al.*, 2011). Já o modelo *Max-Planck-Institute Earth System Model* (MPI-ESM) em sua versão de resolução mista (MR) contém 95 níveis verticais e resolução de 1,9° de latitude x longitude. É composto por um sistema acoplado de circulação geral oceano-atmosfera e modelos de superfície, vegetação e bioquímica marinha, unidos pelo programa de acoplamento OASIS (GIORGETTA *et al.*, 2013).

Para a avaliação do clima futuro, as projeções foram realizadas para o cenário de mudanças climáticas considerado extremo que é representado pelo cenário de aumento de concentração denominado *Representative Concentration Pathways* (RCP8.5 de alta emissão), cujas concentrações são fornecidas em Van Vuuren *et al.* (2011). O clima futuro será representado pelo período de 2040-2059 (futuro próximo) e 2080-2099 (futuro distante), e será realizada uma avaliação na mudança da intensidade dos ventos de alta frequência e no impacto gerado nas rampas de subida e descida nas localidades da área de estudo.

### c) Estações meteorológicas automáticas (EMAs)

Os componentes zonal (u) e meridional (v) do vento a 10 m de estações meteorológicas automáticas (EMAs) foram utilizados para a validação da reanálise ERA5 no período 1979-2018. Na Tabela 1 são apresentadas as EMAs selecionadas provenientes do INMET com resolução horária, variando entre os anos de 2003 e 2015. As EMAs foram escolhidas baseadas I) nos subdomínios de estudo, que possuem distribuição semelhante à utilizada por Brito (2018) e Ramos (2021), e II) considerando a proximidade com a distribuição de empreendimentos de energia eólica do NEB, de acordo como banco de dados abertos fornecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para o Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), como pode ser visto na Figura 4.

Tabela 1 - Estações Meteorológicas Automáticas (EMAs) selecionadas para estudo

SUBDOMÍNIO	CÓDIGO DA EMA	CIDADE	ESTADO	COORDENADAS	
1	A203	São Luís	MA	2.52°S	44.2°W
	A308	Parnaíba	PI	3.08°S	41.78°W
2	A305	Fortaleza	CE	3.81°S	38,54°W

	A304	Natal	RN	5.84°S	35.21°W
3	A320	João Pessoa	PB	7.16°S	34.81°W
4	A307	Petrolina	PE	9.39°S	40.52°W
	A424	Irecê	BA	11.32°S	41.86°W
5	A426	Guanambi	BA	14.21°S	42.74°W

Localização das estações meteorológicas automáticas

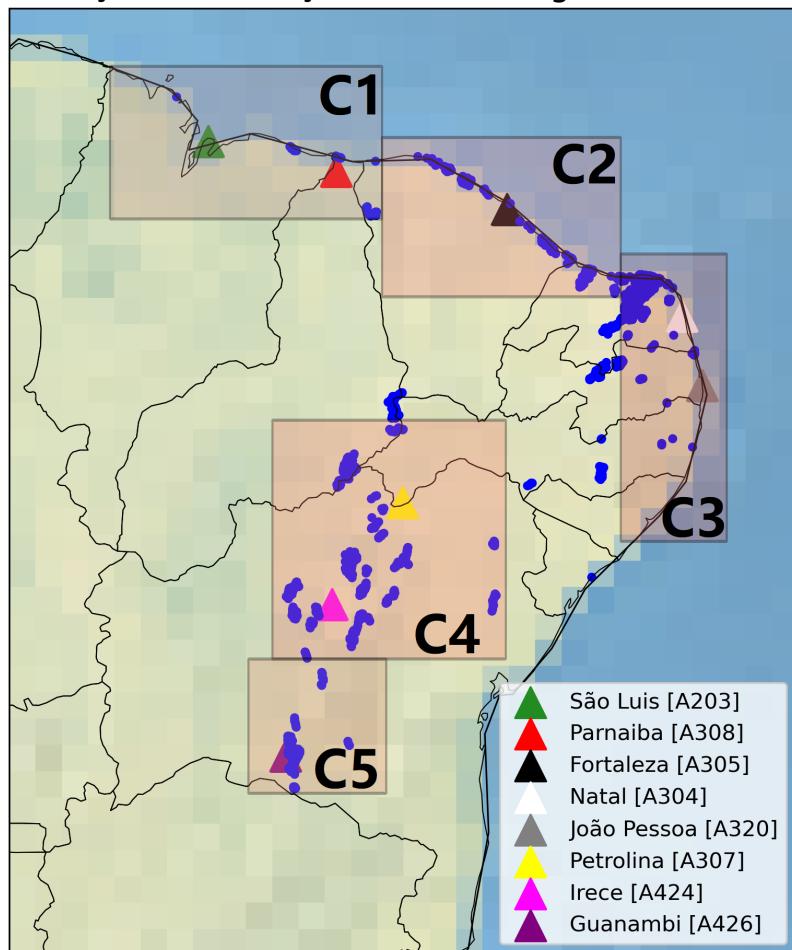


Figura 4 - Subdomínios de estudo no NEB e suas delimitações: C1 ( $1^{\circ}06'S-4^{\circ}S$ ,  $46^{\circ}05'W-40^{\circ}55'W$ ), C2 ( $2^{\circ}27'S-5^{\circ}29'S$ ,  $40^{\circ}55'W-36^{\circ}22'W$ ), C3 ( $4^{\circ}40'S-10^{\circ}08'S$ ,  $36^{\circ}22'W-34^{\circ}21'W$ ), C4 ( $7^{\circ}50'S-12^{\circ}22'S$ ,  $43^{\circ}W-38^{\circ}33'W$ ) e C5 ( $12^{\circ}22'S-14^{\circ}55'S$ ,  $43^{\circ}27'W-40^{\circ}50'W$ ). Os pontos em azul representam os empreendimentos de energia eólica da região do NEB, segundo dados da ANEEL, e os triângulos representam o local de cada EMA.

### 3.2 MÉTODOS UTILIZADOS

Este estudo apresenta a análise dos campos espaciais sazonais de vento a 100 m da reanálise ERA5 e do modelo RegCM4-ERA1 para a região do NEB para o clima presente (1979-2014). Além disso, para as séries em cada domínio de estudo, outras estatísticas (média, quartis, máximos, mínimos e tendência das séries) foram

exploradas nas séries temporais a cada 3 h em ambos os conjuntos, bem como extremos de vento através dos percentis de 90% e 95%. Uma análise do ciclo anual da magnitude do vento também foi realizada com o intuito de avaliar os meses de maior e menor intensidade dos ventos (m/s). Por fim, para o estudo da média dos domínios, foi realizada uma avaliação espacial dos extremos acima do percentil de 90% para a região do NEB.

Para realizar a avaliação da ERA5 em comparação com dados das EMAs, a fim de identificar se a reanálise é capaz de representar a climatologia de ventos na região, calculou-se a magnitude do vento a partir dos componentes zonal e meridional do vento a cada 10 m e a cada 3 h. Em seguida, selecionou-se o ponto de grade mais próximo da localização das estações, ao mesmo tempo que foi considerado apenas os pontos que possuísem valores de elevação > 0,5 a partir da máscara Terra-Oceano da reanálise. Esse valor é usualmente utilizado para considerar um ponto de grade como continental, isto é, considera-se continente se o mesmo possuir mais de 50% de cobertura de terra, uma vez que a máscara possui variação de 0 (*grid* coberto apenas pelo oceano) a 1 (*grid* coberto apenas pelo continente).

Os dados de cada ponto de grade selecionados foram interseccionados com os dados de sua respectiva EMA, utilizando apenas os horários em que não houve ausência de dados observacionais. Para cada conjunto de dados foram calculadas as médias, quartis (25%, 50% e 75%), máximos e mínimos. Além disso, realizou-se uma análise da variabilidade, utilizando o desvio padrão e verificando a correlação entre as variáveis através do diagrama de Taylor. A avaliação dos dados do RegCM4-ERA1 para 10 m também foi incluída nesse processo. Por fim, foi analisada a variação diária sazonal para cada estação, a partir das médias a cada 3 h e por meio de gráficos de boxplot.

Para a análise de rampas foram utilizados os dados de vento da reanálise ERA5 (componentes u e v do vento a 10 m) e as simulações do modelo RegCM4 aninhado na reanálise ERA1 e nos modelos globais HadGEM e MPI para o período de 1979-2005. Seguindo a definição de Pereyra-Castro e Caetano (2022), foi utilizado o limiar de 0,5 m/s para realizar a definição das rampas, ou seja, variações de velocidade em 3 h superior a 0,5 m/s identificam o início de uma rampa de subida, enquanto variações inferiores a -0,5 m/s identificam o início de rampa de descida, e variações intermediárias são consideradas eventos de não-rampa. Após identificados cada um destes eventos, calculou-se o número médio mensal de rampas de subida e descida

no período de análise. Para a análise sazonal, foram calculadas as ocorrências relativas a cada 3 h para cada local estudado, buscando identificar em quais períodos do dia as rampas ocorrem com mais e menos frequência e quais fenômenos meteorológicos podem afetar a ocorrência de rampas sazonalmente e de forma horária.

Para compreender para quais intensidades do vento (m/s) a permanência de rampas ocorrem, analisou-se a distribuição de probabilidade para permanências entre 3-12 h, onde é definido como permanência a continuidade de uma mesmo tipo de rampa depois de um passo de tempo (3 h). Essa avaliação foi realizada para o período chuvoso (DJF) e seco (JJA).

A análise prospectiva dos dados projetados foi efetuada considerando as tendências dos campos sazonais de extremos, focando particularmente no percentil de 90 (P90%), utilizando as simulações RegCM4-HadGEM e RegCM4-MPI. Essa análise abarcou dois horizontes temporais: o futuro próximo, englobando o período de 2040-2059, e o futuro distante, correspondendo a 2080-2099, em ambos os casos tendo como referência o intervalo de 1995-2014.

Além dessa avaliação espacial, uma análise detalhada em nível local foi empreendida exclusivamente para o modelo RegCM4-MPI. Os resultados dessa avaliação foram apresentados por meio de boxplots, o que proporciona uma compreensão das variações climáticas projetadas.

No que se refere às rampas de vento, a avaliação concentrou-se exclusivamente no modelo RegCM4-MPI para os cenários de futuro próximo e futuro distante. Essa avaliação contemplou a análise das rampas de subida, quantificadas como variações percentuais de mudança. Esse enfoque específico permitiu uma compreensão mais precisa da possível evolução dos padrões de vento e seus efeitos no cenário climático projetado.

## 4 RESULTADOS

Este capítulo está subdividido em 4 seções. Na primeira seção, apresentam-se os resultados da magnitude do vento a 100 m na região do NEB e dos cinco subdomínios selecionados para o estudo (Figura 4) utilizando os dados da ERA5 e RegCM-ERA1. A segunda seção apresenta uma análise mais detalhada dos subdomínios, utilizando dados da velocidade do vento a 10 m de EMAs, ERA5 e RegCM4-ERA1. Em seguida, na seção 3, são apresentadas análises sobre o acúmulo

de rampas de vento mensal e sazonal, além da frequência de permanência das mesmas localidades, com o acréscimo dos modelos RegCM4-HadGEM e RegCM4-MPI. Por fim, na seção 4, são analisadas as projeções do futuro para o cenário RCP 8.5 de forma espacial e para algumas EMAs.

#### 4.1 TENDÊNCIAS REGIONAIS

Na Figura 5 são apresentados os campos sazonais de vento a 100 m do RegCM4-ERA5 (esquerda), ERA5 (centro) e a diferença (*bias*) entre RegCM4-ERA5 e ERA5 (direita). Sobre o Atlântico, principalmente no verão (dezembro, janeiro e fevereiro; DJF) e outono (março, abril e maio; MAM), a magnitude dos ventos apresenta *bias* negativo (~ -3,00 m/s). Já na faixa litorânea, desde Pernambuco até Bahia, o modelo superestima as velocidades comparado com a reanálise. Na área continental, o RegCM4-ERA5 simula a magnitude do vento com valores muito próximos aos da ERA5 nas regiões do Piauí e parte do Ceará (verão e outono), porém em todas as estações o modelo superestima a ERA5 em toda a extensão da Bahia, com algumas pequenas regiões atingindo diferenças maiores que 3,00 m/s no inverno (junho, julho e agosto; JJA). No oeste de Pernambuco, com exceção da primavera (setembro, outubro e novembro; SON), nota-se uma pequena região com fraca subestimativa na velocidade pelo RegCM4-ERA5. *Bases* negativos também são notados na parte norte do Maranhão (verão e outono). Na faixa leste, entre o Rio Grande do Norte e Sergipe, o modelo simula a magnitude do vento mais próxima da ERA5 para as estações de verão-outono do que no inverno-primavera.

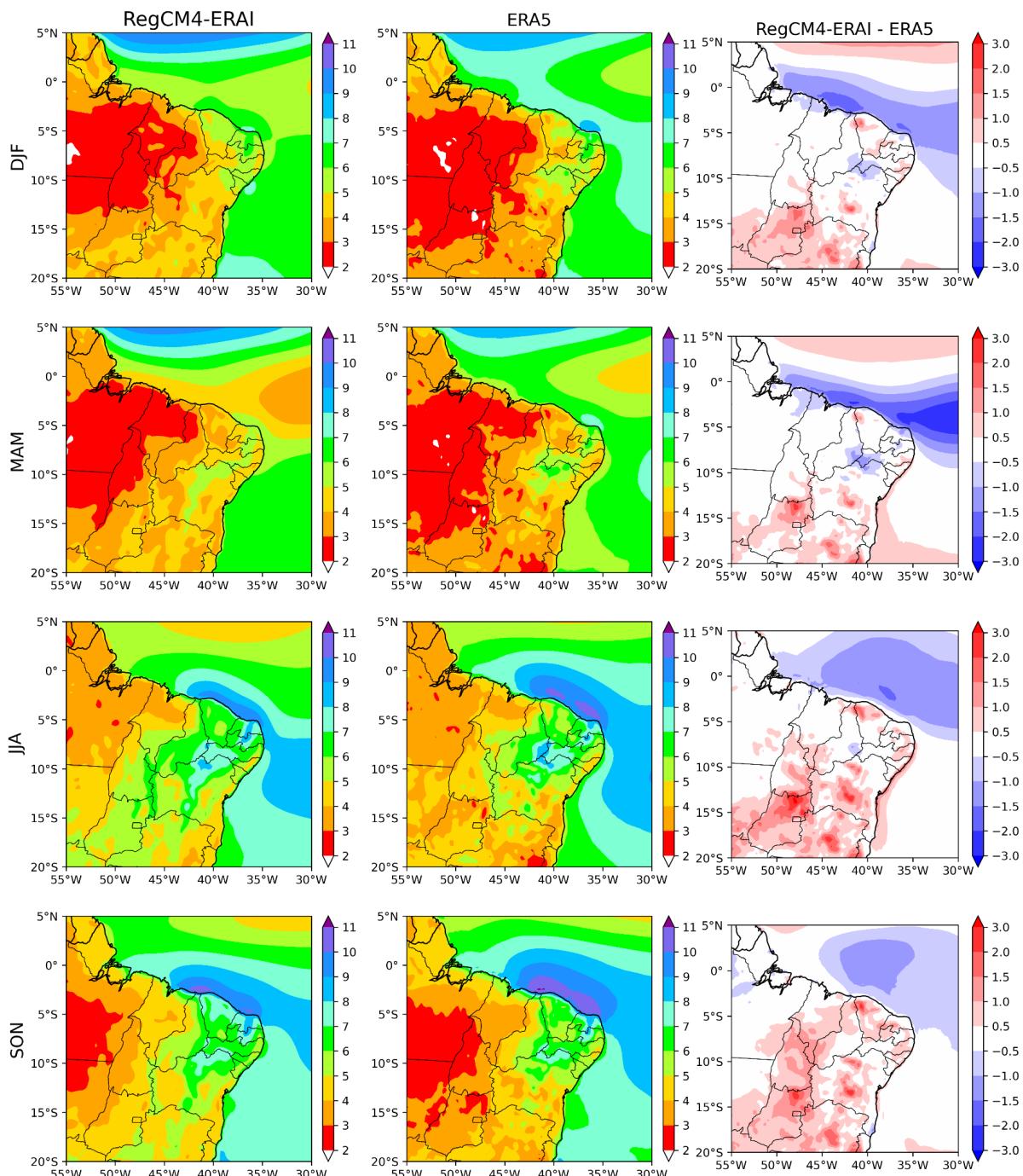


Figura 5 - Magnitude média sazonal do vento (m/s) a 100 m no período 1979-2014 para RegCM4-ERAI (esquerda) e ERA5 (centro) e diferença entre RegCM4-ERAI e ERA5 (direita).

A Tabela 2 apresenta uma análise exploratória da magnitude do vento a 100 m em diferentes subdomínios e para todo o NEB. Nota-se para todos os subdomínios (Figura 4) uma tendência positiva e de maior magnitude para o subdomínio C3 tanto no RegCM4-ERAI como na ERA5.

Em termos de climatologia, a maior média em ambos os dados pertencem à região C2, com velocidades de 6,96 m/s (ERA5) e 6,60 m/s (RegCM4-ERAI). As

menores médias são identificadas para a região C5, exibindo velocidades de 4,26 m/s (ERA5) e 5,12 m/s (RegCM4-ERA1). Os maiores máximos de velocidade são encontrados nas regiões C2 na ERA5 (12,30 m/s) e C3 no RegCM4-ERA1 (15,32 m/s). As menores velocidades máximas pertencem às regiões C1 no RegCM4-ERA1 (10,89 m/s) e C5 na ERA5 (9,99 m/s).

Para os valores de mediana (P50%), os maiores valores de magnitude dos ventos são pertencentes à região C2 com 7,22 m/s (ERA5) e 6,82 m/s (RegCM4-ERA1), assim como para o P75% com velocidades de 8,37 m/s (ERA5) e 8,32 m/s (RegCM4-ERA1) na mesma região. Para os extremos, observa-se que as maiores velocidades de P90% e P95% pertencem às regiões C2 para a ERA5 (9,17 m/s e 9,59 m/s, respectivamente) e RegCM4-ERA1 (9,25 m/s e 9,70 m/s, respectivamente). Já os menores valores de velocidade para esses percentis são observados no subdomínio C5: 6,01 m/s e 6,41 m/s para a ERA5 e 7,32 m/s e 7,90 m/s para o RegCM4-ERA1, respectivamente.

Tabela 2 - Estatísticas do vento a 100 m de altura para a ERA5 e RegCM-ERA1, obtidas com dados a cada 3 h em m/s, no período de 1979 a 2014

REGIÃO	DADOS	MÉDIA	MÍN	MÁX	P25%	P50%	P75%	P90%	P95%	TEND ( $\theta$ )
NEB	ERA5	5,28	2,36	8,72	4,69	5,24	5,85	6,41	6,74	2,09E-06
	RegCM-ERA1	5,28	2,46	9,15	4,64	5,19	5,85	6,53	6,91	9,67E-07
C1	ERA5	5,64	0,84	10,57	4,53	5,73	6,82	7,66	8,10	1,00E-06
	RegCM-ERA1	5,20	0,60	10,89	3,76	5,11	6,72	7,77	8,22	9,65E-07
C2	ERA5	6,96	1,00	12,30	5,76	7,22	8,37	9,17	9,59	3,07E-06
	RegCM-ERA1	6,60	0,71	12,36	4,98	6,82	8,32	9,25	9,70	2,54E-06
C3	ERA5	6,39	0,98	11,65	5,55	6,47	7,30	8,05	8,53	4,37E-06
	RegCM-ERA1	6,37	0,80	15,32	5,33	6,48	7,48	8,35	8,88	2,93E-06
C4	ERA5	5,59	0,97	11,75	4,44	5,77	6,82	7,59	8,01	2,61E-06
	RegCM-ERA1	5,59	0,89	11,78	4,13	5,66	7,02	8,05	8,61	2,28E-06
C5	ERA5	4,26	0,78	9,99	3,23	4,33	5,27	6,01	6,41	2,27E-06
	RegCM-ERA1	5,12	0,67	11,50	3,81	5,22	6,38	7,32	7,90	1,37E-06

A função densidade de probabilidade do vento a 100 m, calculada com valores a cada 3 h, mostra que para o subdomínio C1 (Figura 6.a) a ERA5 apresenta uma curva com frequências mais altas para velocidades em torno da média, enquanto o RegCM4-ERA1 apresenta maiores frequências para percentis mais baixos. Para

percentis mais altos nota-se um melhor ajuste entre o RegCM4-ERA5 e ERA5, com pequena superestimativa em relação ao ERA5.

Avaliando o ciclo anual da magnitude do vento para a região C1 (Figura 6.b), entre novembro a julho os dados do RegCM4-ERA5 subestimam os dados da ERA5, porém entre agosto e setembro ocorre o inverso. Observa-se que a magnitude dos ventos aumenta de forma acentuada a partir de abril, com valores mínimos entre 3,00 a 4,00 m/s, tendo valores máximos em setembro de ~ 7,50 m/s para o RegCM4-ERA5 e ~ 7,00 m/s para a ERA5.

Para o subdomínio C2, a Figura 6.c indica frequências mais altas para velocidades de ~8,00 m/s na ERA5, porém no RegCM4-ERA5 tem-se maiores frequências para velocidades ligeiramente mais altas e uma superestimativa da frequência de velocidades menores. Assim como na região C1, na região C2 os maiores percentis no RegCM4-ERA5 são próximos da ERA5. A região C2 (Figura 6.d) apresenta ciclo anual semelhante à região C1, com ventos mais fracos em março e abril (~4,00 m/s para RegCM4-ERA5 e 5,00 m/s para ERA5) e máximo em setembro (~9,00 m/s para ambos os conjuntos).

Para a densidade de frequência, nota-se que a região C3 é a que possui as curvas de distribuição de frequência simuladas e da ERA5 mais semelhantes entre si (Figura 6.e). No entanto, as magnitudes do vento do RegCM4-ERA5 apresentam menores frequências ao redor da média e maiores frequências tanto para percentis mais baixos como mais altos quando comparado à ERA5. Em termos de ciclo anual nessa região (Figura 6.f), as magnitudes do vento apresentam valor mínimo em março (~5,25 m/s e ~4,75 m/s para a ERA5 e RegCM4-ERA5, respectivamente) e máximo no mês de agosto (~ 7,50 m/s e ~ 7,25 m/s para a ERA5 e RegCM4-ERA5, respectivamente).

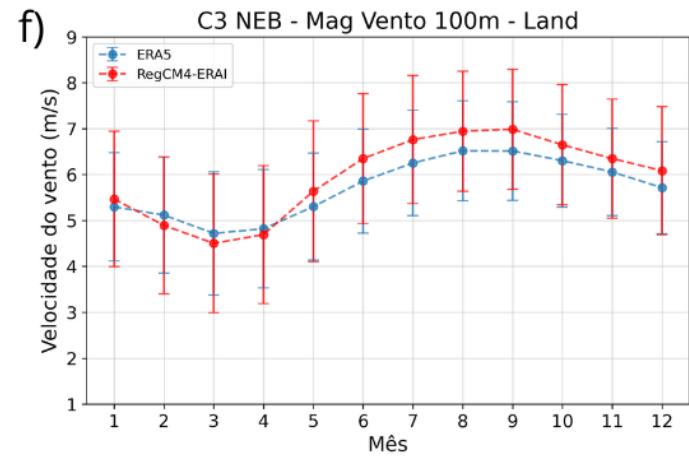
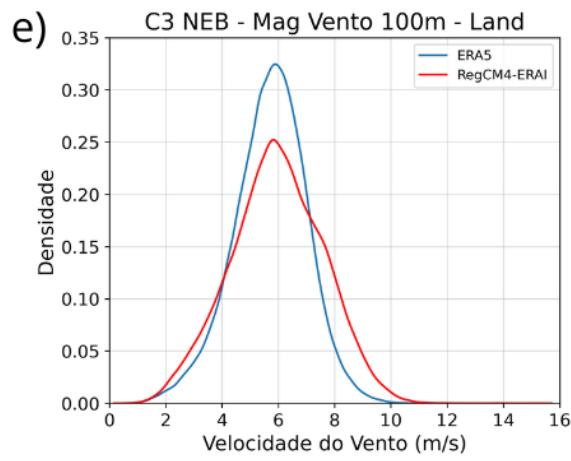
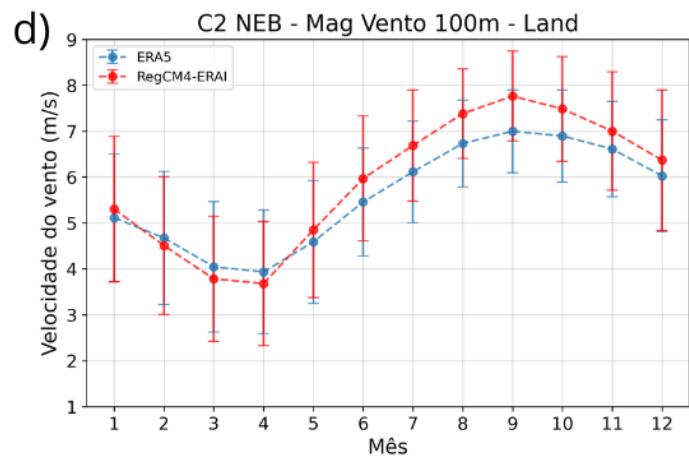
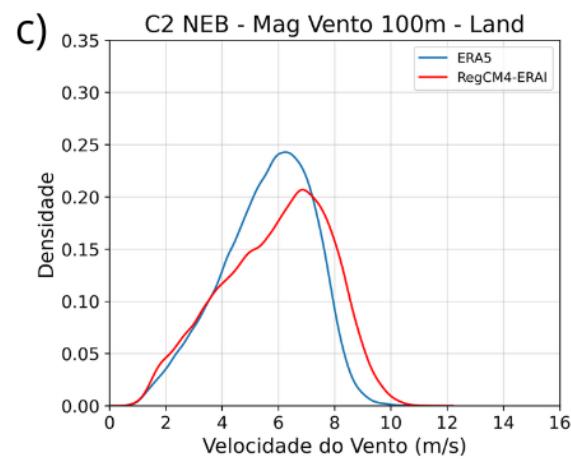
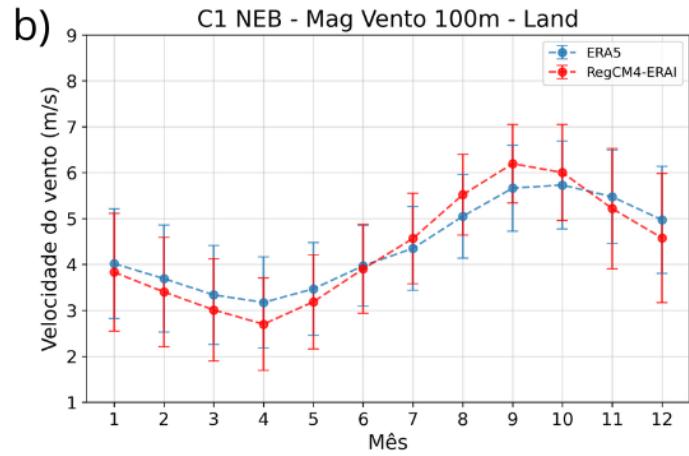
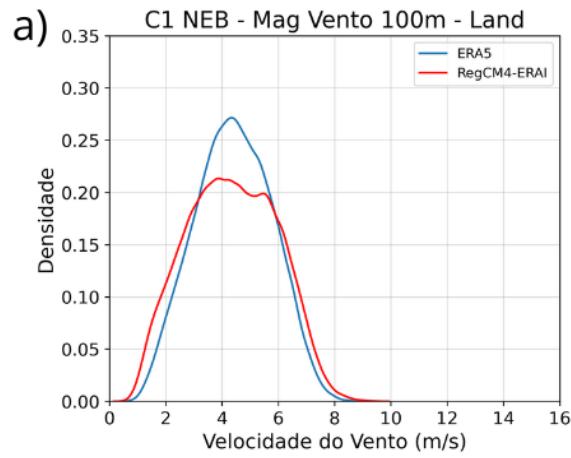
A densidade de frequência da região C4 (Figura 6.g) mostra que o RegCM4-ERA5 possui maiores frequências tanto para velocidades nos percentis inferiores quanto superiores, frequência menor de eventos ao redor da mediana em comparação à ERA5. Para o subdomínio C4 (Figura 6.h), menores valores de magnitude de vento ocorrem em março (~ 4,00 m/s para RegCM4-ERA5 e ~ 4,50 m/s para a ERA5) com o máximo encontrado em agosto para a ERA5 (~ 6,75 m/s) e em setembro para o RegCM4-ERA5 (~ 7,25 m/s).

Comparando os quatro subdomínios (C1-C4), nota-se que os valores da velocidade do vento encontrados para a ERA5 são superiores àqueles estudados por

Brito (2018) na reanálise ERA-20C, enquanto os resultados obtidos por Ramos (2021) mostram valores mais próximos ou levemente inferiores para o RegCM4-ERA1. Alguns fatores podem justificar essas diferenças. Por exemplo, Brito (2018) utilizou reanálise com resolução horizontal ( $1^{\circ}$ ) mais grosseira e valores médios mensais do componente do vetor velocidade e então calculou a magnitude média mensal, ambos os fatores contribuem para menores velocidades. Por outro lado, Ramos (2021) utilizou uma resolução horizontal de  $0,75^{\circ}$  (ERA-Interim), enquanto que para as simulações, as diferenças podem estar relacionadas às parametrizações utilizadas.

A região C5 mostra a densidade de probabilidade (Figura 6.i) deslocada para a direita no RegCM4-ERA1 comparada com a ERA5, o que indica maiores frequências para magnitude dos ventos em percentis superiores. Diferentemente dos outros subdomínios, neste caso a ERA5 apresenta maiores frequências do que o RegCM4-ERA1 para percentis inferiores.

O subdomínio C5 possui o seu ciclo anual da magnitude do vento (Figura 6.j) com mínimo em março (~ 3,50 m/s para ERA5 e 4,00 m/s para RegCM4-ERA1) e máximo em setembro (~ 5,00 m/s para ERA5 e 6,50 m/s para RegCM4-ERA1). Esse resultado é também condizente, assim como para os outros subdomínios, com os resultados de Dos Santos e Silva (2013) que investigaram a magnitude dos ventos no NEB e avaliaram que as maiores médias se encontram nos meses de inverno e primavera . Para essa região, o RegCM4-ERA1 superestima a velocidade do vento em relação à ERA5 em todos os meses do ano.



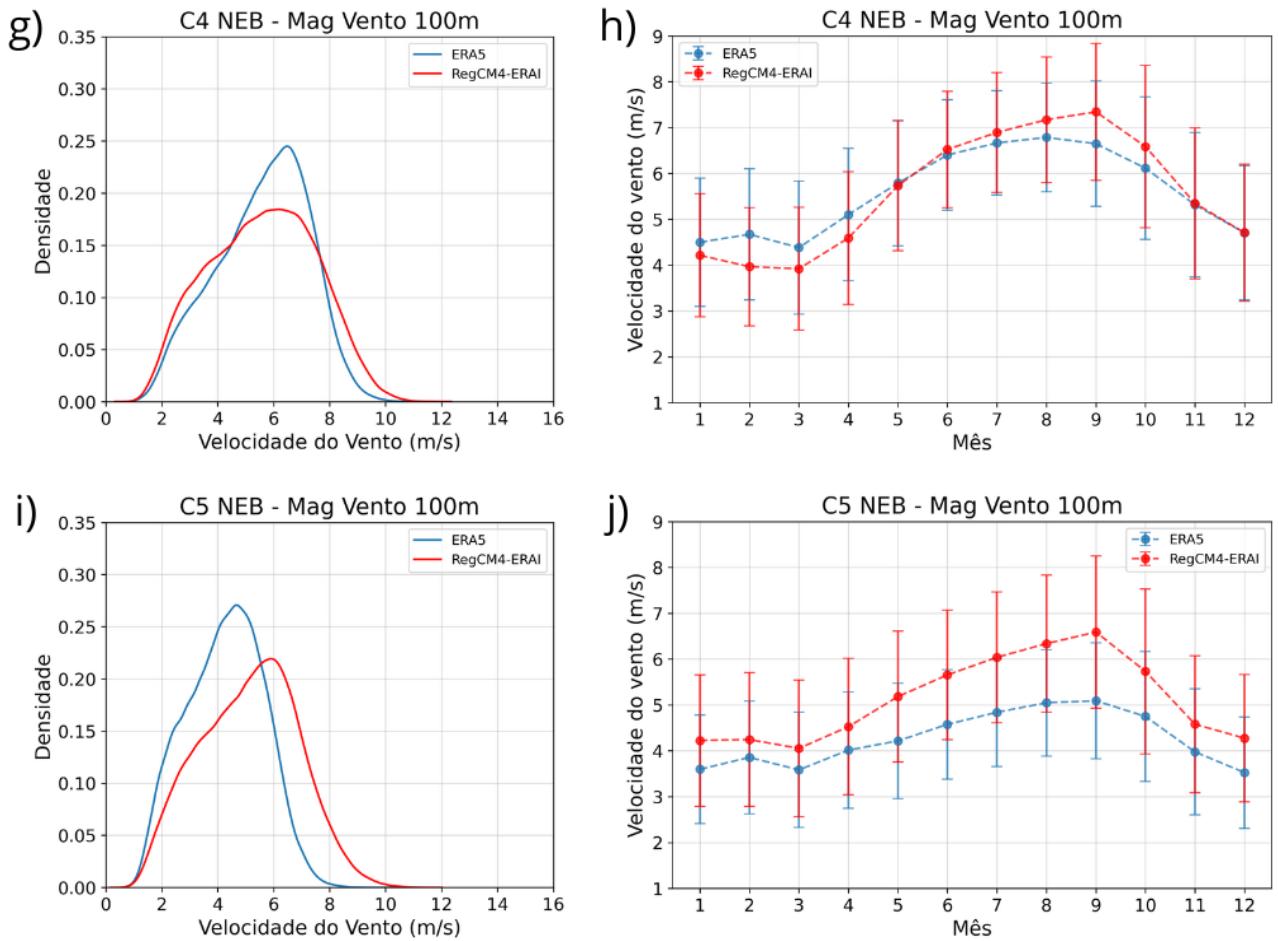


Figura 6 - Função densidade de probabilidade da média da magnitude do vento (m/s) a 100 m de altura (a, c, e, g e i); esquerda) e média mensal e desvio padrão (b, d, f, h e j; direita) para os subdomínios C1 à C5 no período de 1979 a 2014.

Na Figura 7 são apresentados os campos sazonais do limiar de extremos, percentil de 90 (P90%), de vento a 100 m do RegCM4-ERA1 (esquerda), da ERA5 (centro) e a diferença (*bias*) entre RegCM4-ERA1 e ERA5 (direita) no período de 1979 a 2014. Para os meses de verão e outono, os maiores extremos de vento estão localizados próximos da latitude de 5°N, ao norte do NEB e ao sul de 17°S sobre o oceano Atlântico. Na área continental, as maiores velocidades estão localizadas entre Rio Grande do Norte e Sergipe, onde o RegCM4-ERA1 subestima os valores se comparado com a reanálise (principalmente no verão), enquanto na ERA5 observa-se valores de extremos maiores para a faixa litorânea ao norte do Maranhão ao Rio Grande do Norte. Para os meses de inverno e primavera, os maiores extremos localizam-se entre as latitudes 0° a 5°S, na região oceânica do Maranhão ao Rio Grande do Norte, estendendo-se até uma vasta região do oceano Atlântico Sul. Para

essas estações também são encontrados os maiores extremos na região da Bahia, principalmente no RegCM4-ERA1.

Uma das explicações para esse perfil de extremos na região do NEB, principalmente no litoral, seria o estabelecimento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que oscila sua posição no decorrer do ano entre  $\sim 4^{\circ}\text{S}$  (verão e outono) e  $\sim 10^{\circ}\text{N}$  (inverno) (REBOITA *et al.*, 2010). Quando a ZCIT encontra-se mais ao norte, por exemplo, com adição da atuação da ASAS, que se encontra na sua posição mais próxima ao continente e ao norte, há o fortalecendo dos ventos alísios de sudeste (CAVALCANTI *et al.*, 2009; REBOITA *et al.*, 2010), que propicia o potencial eólico da região. Segundo Oliveira e Costa (2011), a ZCIT e as anomalias de TSM no Pacífico e Atlântico representam grande domínio em alterações na atuação dos ventos nesta região.

De forma geral, tem-se que o RegCM4-ERA1 subestima o limiar dos extremos sobre o oceano Atlântico ao norte do NEB, enquanto superestima sobre o continente, principalmente nos estados do leste do NEB, norte do Ceará e interior da Bahia (vale do São Francisco).

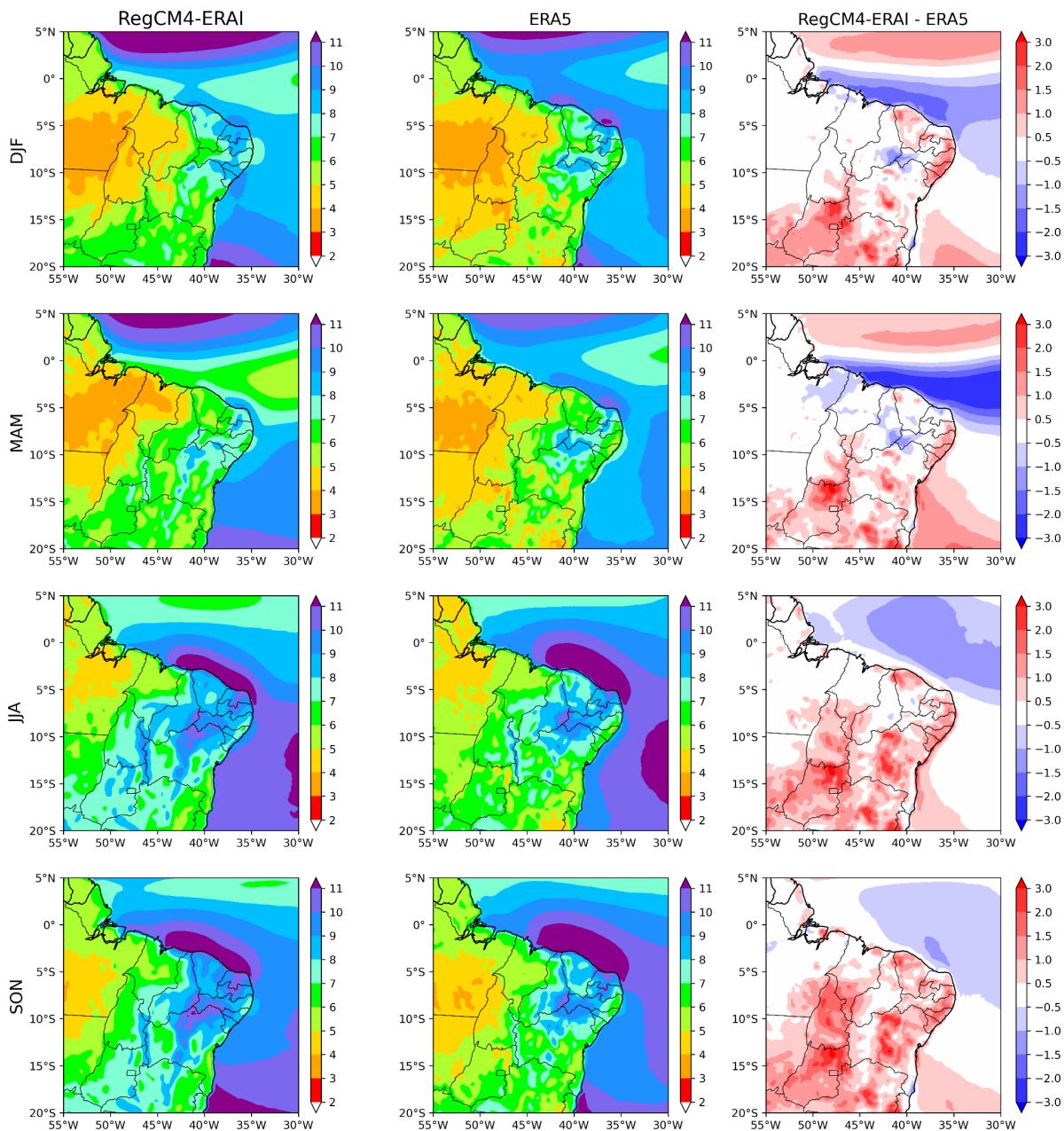


Figura 7 - Limiar de extremos de magnitude do vento (m/s) a 100 m de altura (percentil de 90%) no período 1979-2014 para RegCM4-ERA1 (esquerda), ERA5 (centro) e diferença entre RegCM4-ERA1 e ERA5 (direita).

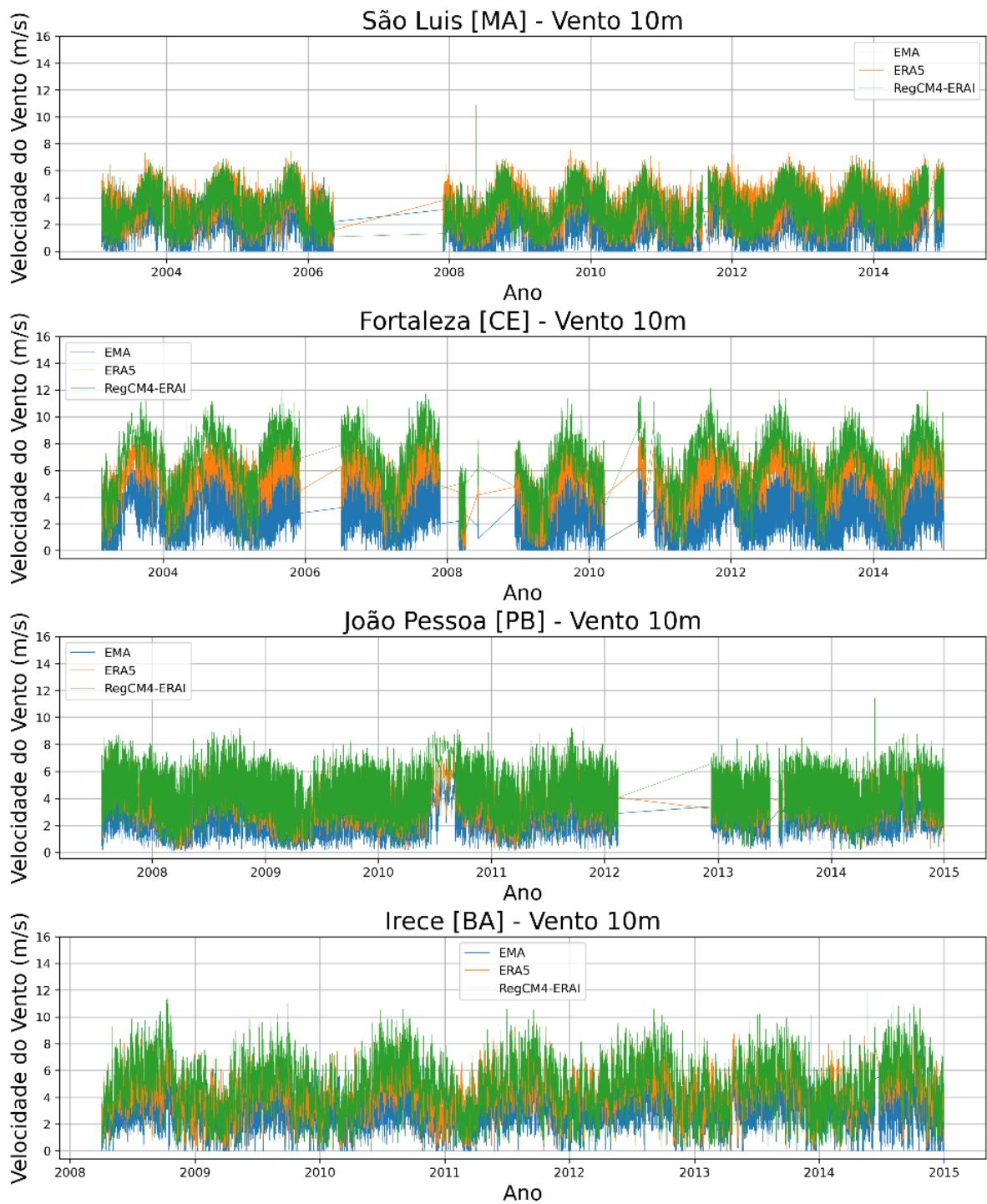
#### 4.2 VARIAÇÕES LOCAIS DO VENTO: EMAS, ERA5 E REGCM4

Saindo de uma perspectiva regional, nesta seção são comparados os ventos das EMAS com a reanálise ERA5 e a simulação RegCM4-ERA1, a fim de avaliar se esses conjuntos são capazes de representar fatores locais da climatologia de ventos na região. Avaliar se a reanálise ERA5 reproduz os principais aspectos do vento observado é especialmente importante desde que as estações meteorológicas apresentam períodos curtos de observações e muitas falhas, limitando o seu uso para

identificação de rampas de vento. Considerando que os erros na reprodução de aspectos locais do vento sejam aceitáveis na ERA5, a mesma poderá ser utilizada na avaliação das rampas simuladas pelo RegCM4.

As EMAs selecionadas dentro dos subdomínios têm suas séries temporais da magnitude do vento a 10 m, a cada 3h, apresentadas na Figura 8. Na Figura 8 tem-se as séries temporais das EMAs (azul) juntamente com ERA5 (laranja) e RegCM4-ERA1 (verde). Os períodos variam entre 2003 a 2015, e as falhas nos dados observacionais são mais evidentes em Natal (C3) e Fortaleza (C2); considerando lacunas para períodos mais longos (quase um ano), esse fator ocorre em São Luís (C1) e João Pessoa (C3).

Nota-se que a variabilidade do vento da EMA é maior para Guanambi (C5), que apresenta os maiores valores máximos (Figura 8). De maneira geral, a ERA5 superestima as velocidades observadas nas EMAs, principalmente para Fortaleza (C2) e Natal (C3), e o contrário ocorre em Guanambi (C5). Resultado semelhante foi encontrado por Cardoso (2019), que mostrou superestimativa dos ventos em superfície (10 m) para a ERA5 em regiões continentais próximas da costa Sudeste do país. Com relação ao RegCM4-ERA1, em geral tem-se uma superestimativa com relação aos demais conjuntos de dados (EMAS e ERA5), que é maior para Fortaleza (C2). No estudo realizado por Crespo *et al.* (2022) para a região do sudeste brasileiro, também foi observada uma superestimativa nos ventos pelo modelo RegCM4 sobre o oceano.



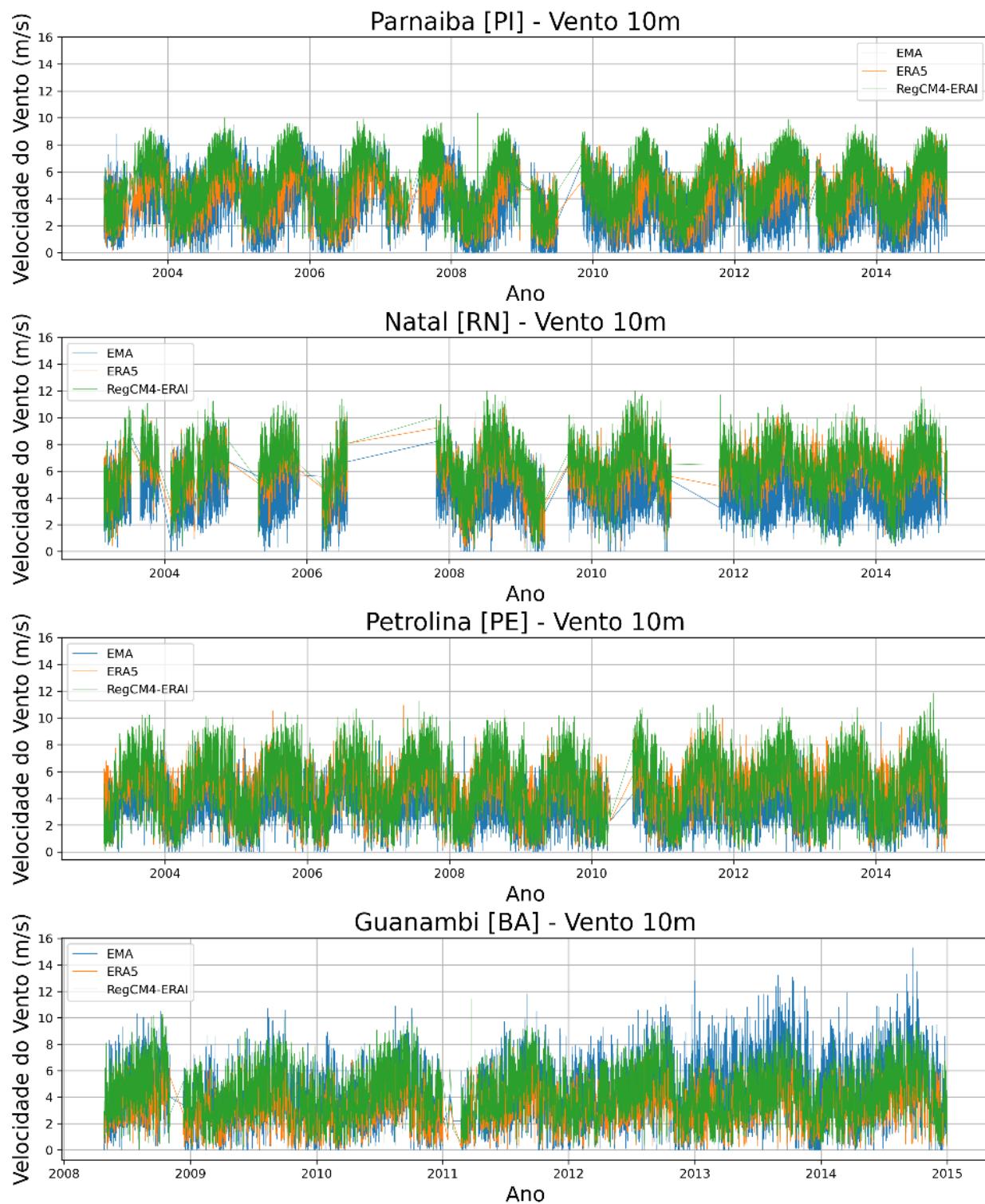


Figura 8 - Séries temporais da velocidade do vento a 10 m de altura (m/s) a cada 3 h para períodos comuns da ERA5 (laranja), RegCM4-ERAI (verde) e das EMAs (azul).

A Tabela 3 apresenta uma análise exploratória da magnitude do vento a 10 m para os diferentes pontos dos cinco subdomínios. Nota-se para todos os subdomínios, com exceção da região C5 (Guanambi), que a ERA5 superestima as velocidades do

vento, sendo a maior média encontrada em Natal (C3), enquanto que o RegCM4 superestima tanto a reanálise quanto as EMAs, com exceção de São Luís que apresenta menor média se comparada com a ERA5. Em Caetité, região sul da Bahia, próximo à localidade de Guanambi, o estudo conduzido por Da Silva *et al.* (2002) identificou um notável pico no potencial eólico. No entanto, essa intensidade máxima decresce rapidamente pela área, possivelmente devido à influência da topografia local. Esta característica pode ser uma explicação para a subestimação dos valores por parte da ERA5 para essa região.

As menores médias estão em São Luís (C1) para a ERA5 e RegCM4, enquanto que entre as EMAs a menor média está em João Pessoa (C3). Para os máximos de velocidade, a reanálise superestima os valores de vento, com exceção de Parnaíba (C1), Irecê (C4) e Guanambi (C5). O maior máximo da ERA5 é encontrado em Petrolina (10,9 m/s), enquanto que entre as EMAs esse valor ocorre em Guanambi (15,3 m/s) e para o RegCM4-ERA1 este valor é observado em Natal (12,3 m/s). As menores velocidades máximas de vento estão em São Luís com 6,4 m/s (EMA) e 7,5 m/s (ERA5) e Parnaíba com 10,37 m/s (RegCM4-ERA1). Os resultados diferem dos encontrados por Fernandes *et al.* (2020) que, para 100 m de altura, a reanálise subestimou as velocidades média e máxima para os dados observacionais no Maranhão. Para mediana (P50%), assim como a média, as velocidades da ERA5 superestimam os dados das EMAs, com exceção de Guanambi (C5). Analisando os valores da simulação, são encontrados valores de mediana que superestimam os dados das estações assim como da ERA5, com exceção de São Luís (C1) comparando com esse último. Os maiores valores de mediana ocorrem em Natal (C3) com 4,5 m/s (EMA) e 4,5 m/s (ERA5) e Fortaleza com 6,66 m/s (RegCM4-ERA1).

Tabela 3 - Estatísticas da velocidade do vento (m/s) a 10 m de altura para a intersecção entre ERA5, RegCM4-ERA1 e EMAs

ÁREA	LOCAL	DADO	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	25%	50%	75%
1	São Luís	EMA	2,00	0,00	6,40	0,90	2,00	3,00
		ERA5	3,24	0,03	7,53	2,23	3,21	4,21
		RegCM4-ERA1	2,98	0,21	10,89	1,90	2,84	3,97
	Parnaíba	EMA	3,44	0,00	9,50	2,00	3,30	4,80
		ERA5	4,41	0,03	9,14	3,20	4,53	5,71
		RegCM4-ERA1	4,82	0,04	10,37	3,07	4,88	6,47

2	Fortaleza	EMA	2,81	0,00	7,70	1,70	2,80	3,90
		ERA5	5,30	0,05	9,56	4,29	5,50	6,49
		RegCM4-ERA5	6,47	0,06	12,13	5,01	6,66	8,11
3	Natal	EMA	4,57	0,00	10,30	3,40	4,50	5,70
		ERA5	6,07	0,25	10,88	5,17	6,14	7,08
		RegCM4-ERA5	6,35	0,07	12,30	5,21	6,43	7,60
	João Pessoa	EMA	2,36	0,10	7,30	1,60	2,30	3,00
		ERA5	3,57	0,14	7,96	2,68	3,51	4,40
		RegCM4-ERA5	4,12	0,11	11,45	2,67	3,75	5,60
4	Petrolina	EMA	3,63	0,00	9,70	2,80	3,60	4,50
		ERA5	4,67	0,03	10,95	3,74	4,82	5,73
		RegCM4-ERA5	4,96	0,04	11,87	3,18	5,07	6,70
	Irece	EMA	2,86	0,00	10,10	2,00	2,80	3,70
		ERA5	4,12	0,01	9,61	3,18	4,23	5,10
		RegCM4-ERA5	4,80	0,03	11,85	3,35	4,85	6,25
5	Guanambi	EMA	3,96	0,00	15,30	2,40	3,70	5,30
		ERA5	3,27	0,01	8,17	2,12	3,34	4,34
		RegCM4-ERA5	4,35	0,05	11,44	2,82	4,37	5,76

Na Figura 9 estão apresentados os diagramas de Taylor para cada local de análise. A partir do diagrama de Taylor pode-se extrair informações sobre o desempenho de reprodução de um modelo (TAVARES *et al.*, 2020) em relação a um dado observado, por exemplo. Nesse tipo de diagrama é possível ver o desvio padrão observado juntamente com o desvio padrão de modelos ou outros conjuntos de dados, assim como observar a correlação entre ambos.

Para avaliar a correlação ( $r$ ) entre os dados analisados, determinou-se :  $r < 0,25$  indicando que não há uma associação linear aparente entre as variáveis em análise;  $0,25 \leq r \leq 0,5$  para associações fracas;  $0,5 < r \leq 0,7$  para correlações moderadas;  $r > 0,7$  correlação forte.

Para São Luís (C1) e Natal (C3) tem-se uma correlação moderada, com valor  $> 0,6$ , enquanto que para as outras regiões as correlações são consideradas altas, isto é, apresentam valores  $> 0,7$ . A maior correlação entre a ERA5 e as EMAs é encontrada em João Pessoa (C3) com 0,8. Tavares *et al.* (2020) e Fernandes *et al.* (2021) também encontraram valores altos e moderados para correlação da reanálise ERA5 para demonstrar a climatologia no Brasil, o primeiro encontrando valores  $> 0,6$  para regiões da costa Sudeste e Sul e o segundo com correlações  $> 0,7$  para o

Maranhão e Santa Catarina. Em comparação, a correlação entre RegCM4-ERA1 e EMAs apresenta valores que variam entre 0,44 (Guanambi) e 0,68 (João Pessoa) demonstrando correlação fraca a moderada.

Com relação ao desvio padrão, tem-se valores superiores de dispersão da ERA5 em Fortaleza (C2), João Pessoa (C3), Petrolina e Irecê (C4), em comparação com o RegCM4-ERA1. O maior desvio padrão para os dados de EMAs são encontrados em Guanambi (C5) com 2,1 m/s, também perceptível em sua série temporal na Figura 8. É razoável supor que as grandes variações relacionam-se com a orografia da região que encontra-se na Serra do Espinhaço, uma das áreas promissoras destacadas pelo Atlas Eólico da Bahia (2013) para empreendimentos eólicos.

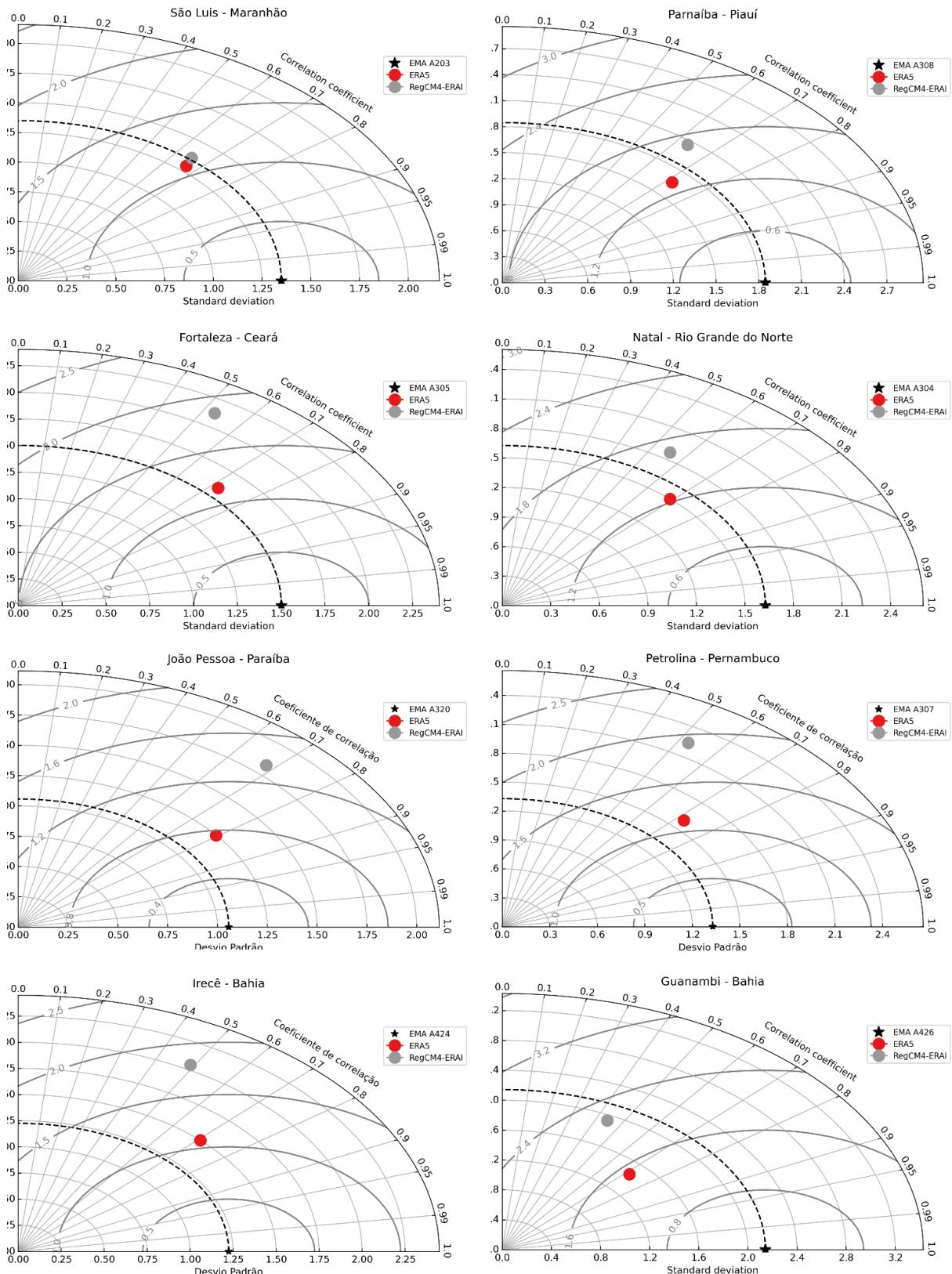
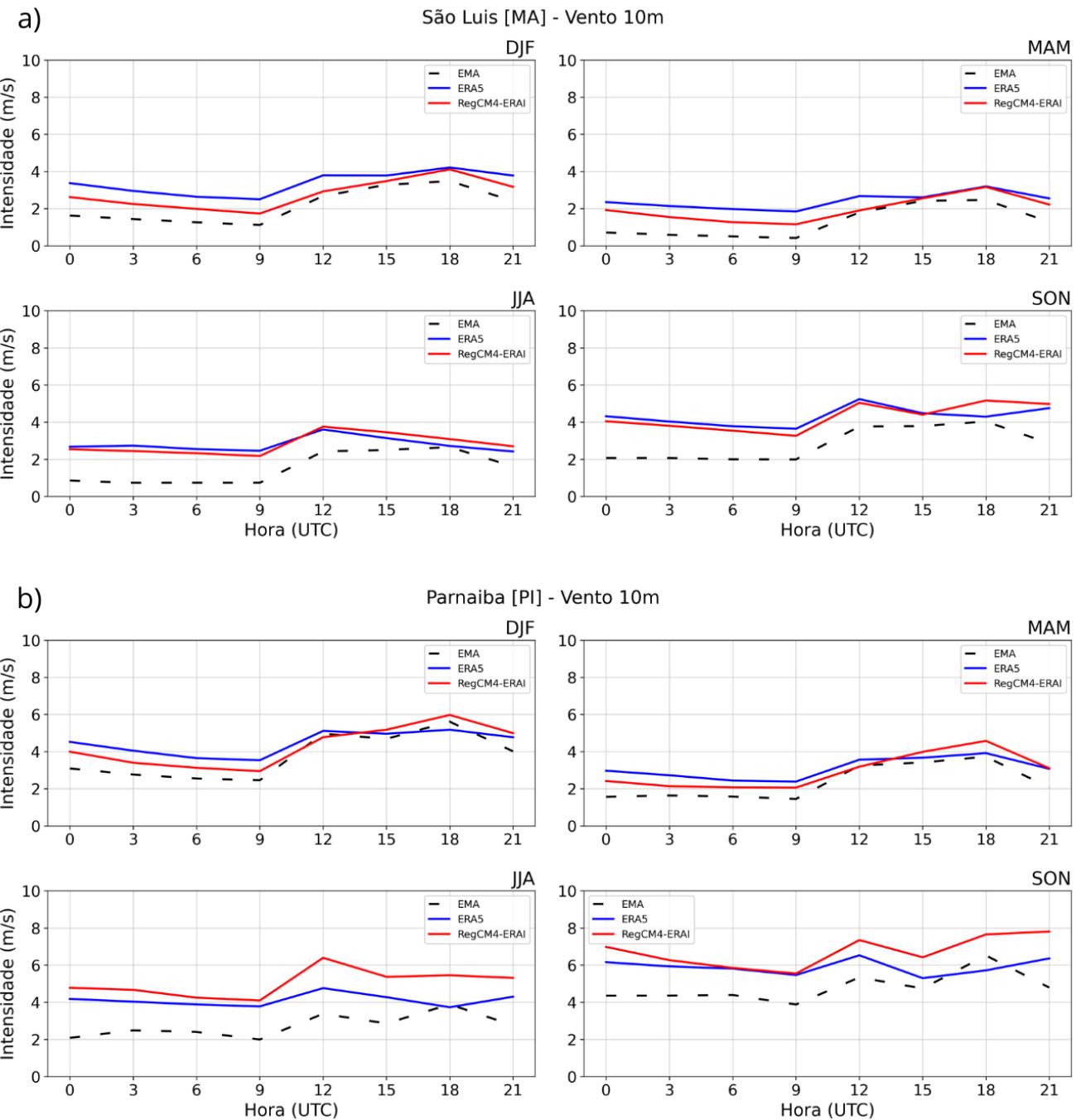
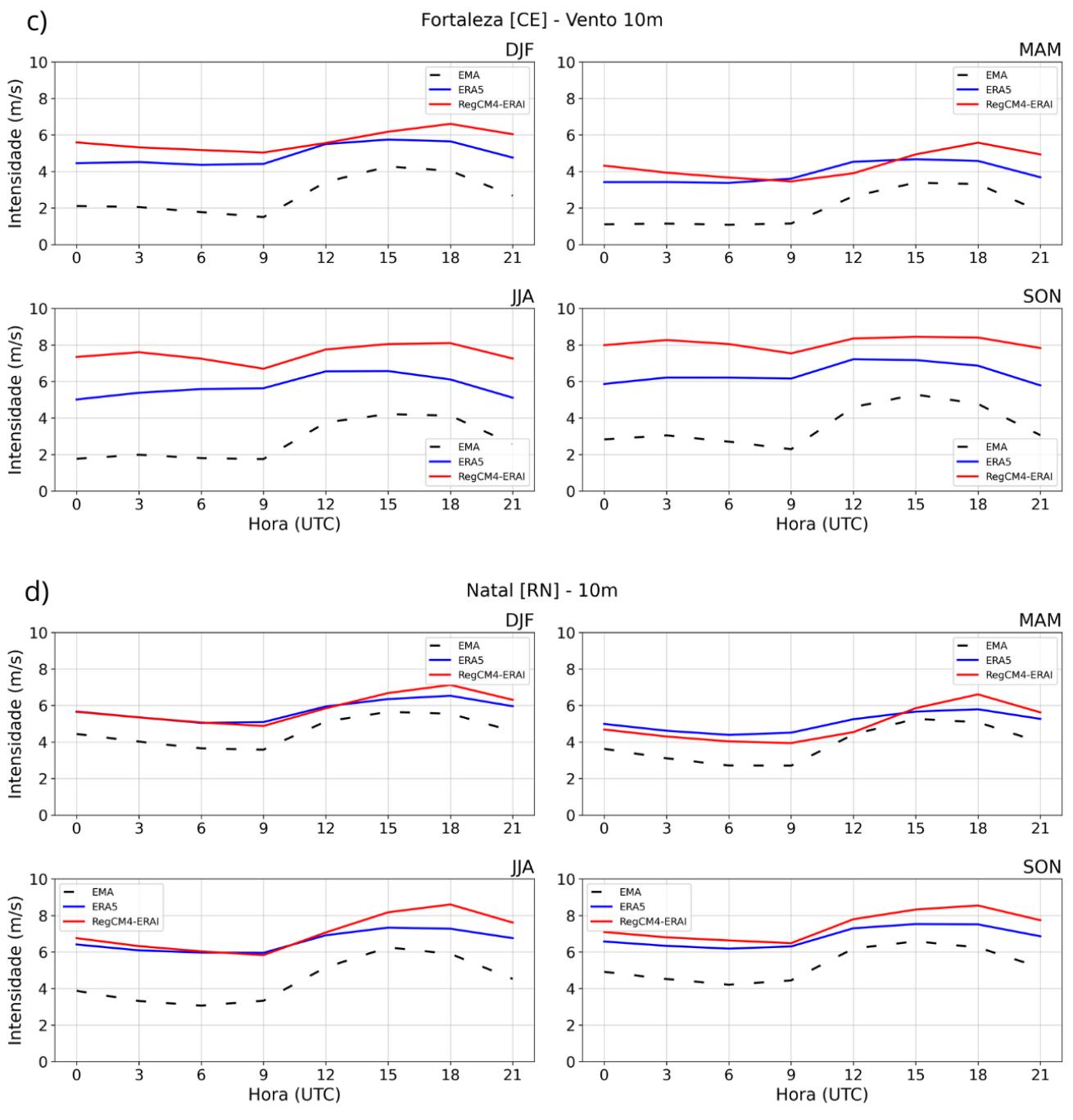


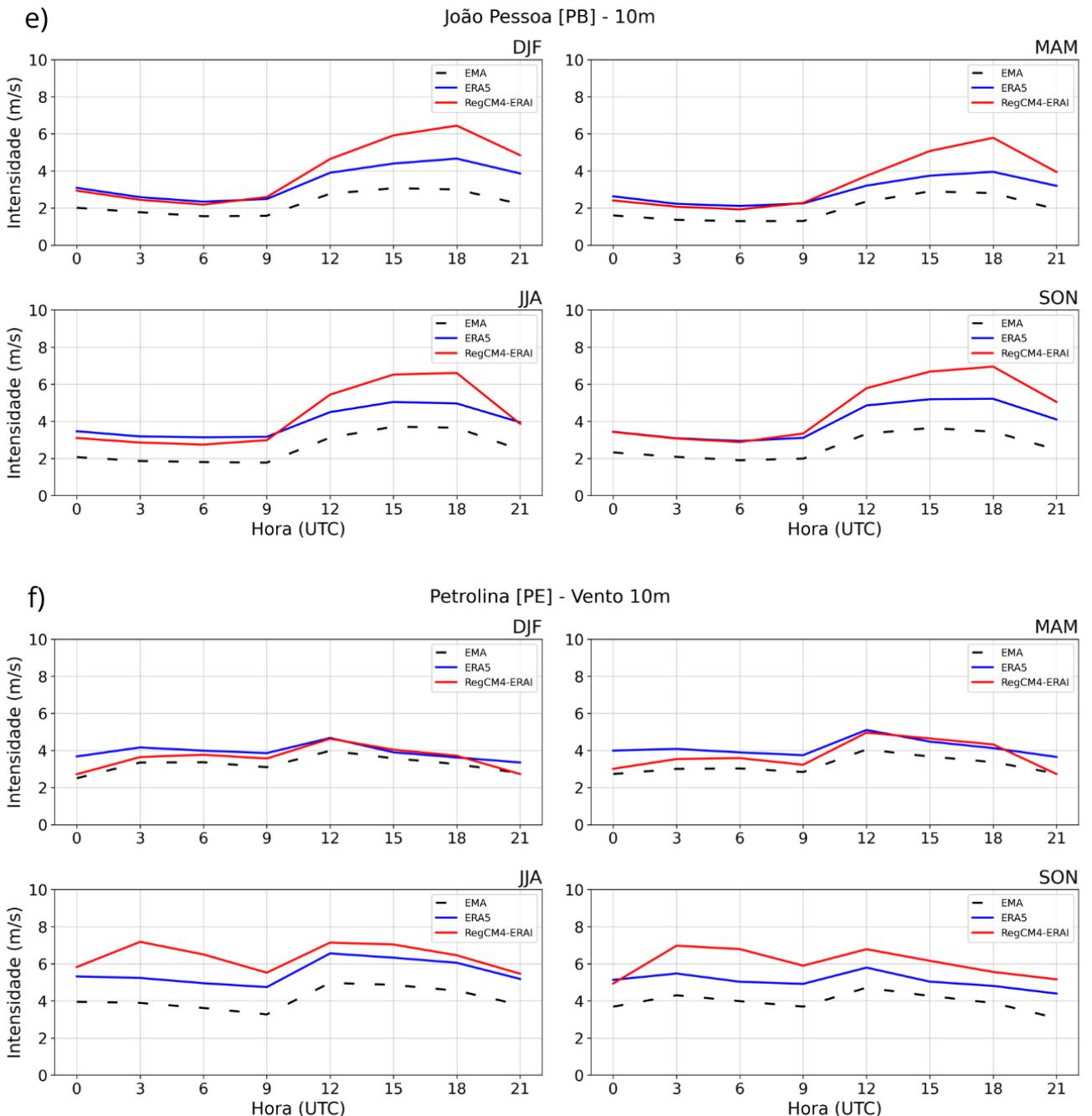
Figura 9 - Diagramas de Taylor da magnitude do vento (m/s) a 10 m para cada EMA. A estrela preta indica a observação e o círculo vermelho (cinza) a reanálise ERA5 (RegCM4-ERA1).

Na Figura 10 são apresentadas as médias sazonais e a Figura 11 mostra os boxplots a cada 3 h para cada EMA. Avaliando as médias, há uma superestimativa da ERA5 e o RegCM4-ERA1 com relação aos dados das EMAs. Apenas para Parnaíba e Guanambi (Figuras 10.b,h), em 1800 UTC, que a reanálise subestima a intensidade do vento. Para os locais que compreendem as regiões de C1-C3 (Figuras 10.a-e) os dados das EMAs, em geral, mostram um aumento da média para os horários de 1500 UTC e 1800 UTC, enquanto isso para os locais das regiões de C4 e C5 (Figuras 10.f-h) os picos nos valores médios encontram-se em 1200 UTC. Esse padrão está, provavelmente, relacionado à brisa terra-mar para as áreas costeiras e vale-montanha para as áreas no interior do continente.

Avaliando os gráficos de boxplot sazonais (Figuras 11.a-h), o RegCM4-ERA1 e a ERA superestimam os valores das EMAs para todos os horários, exibindo um padrão similar da média (avaliada anteriormente) e mediana. Com relação à variação dos dados, Guanambi (Figura 11.h) apresenta dados das EMAs mais dispersos, principalmente para a primavera, quando comparado com as demais estações e outras localidades. Avaliando os extremos, notam-se *outliers* principalmente para valores mais fracos de vento; no entanto, *outliers* com extremos mais intensos são visualizados principalmente no outono para todas EMAs.







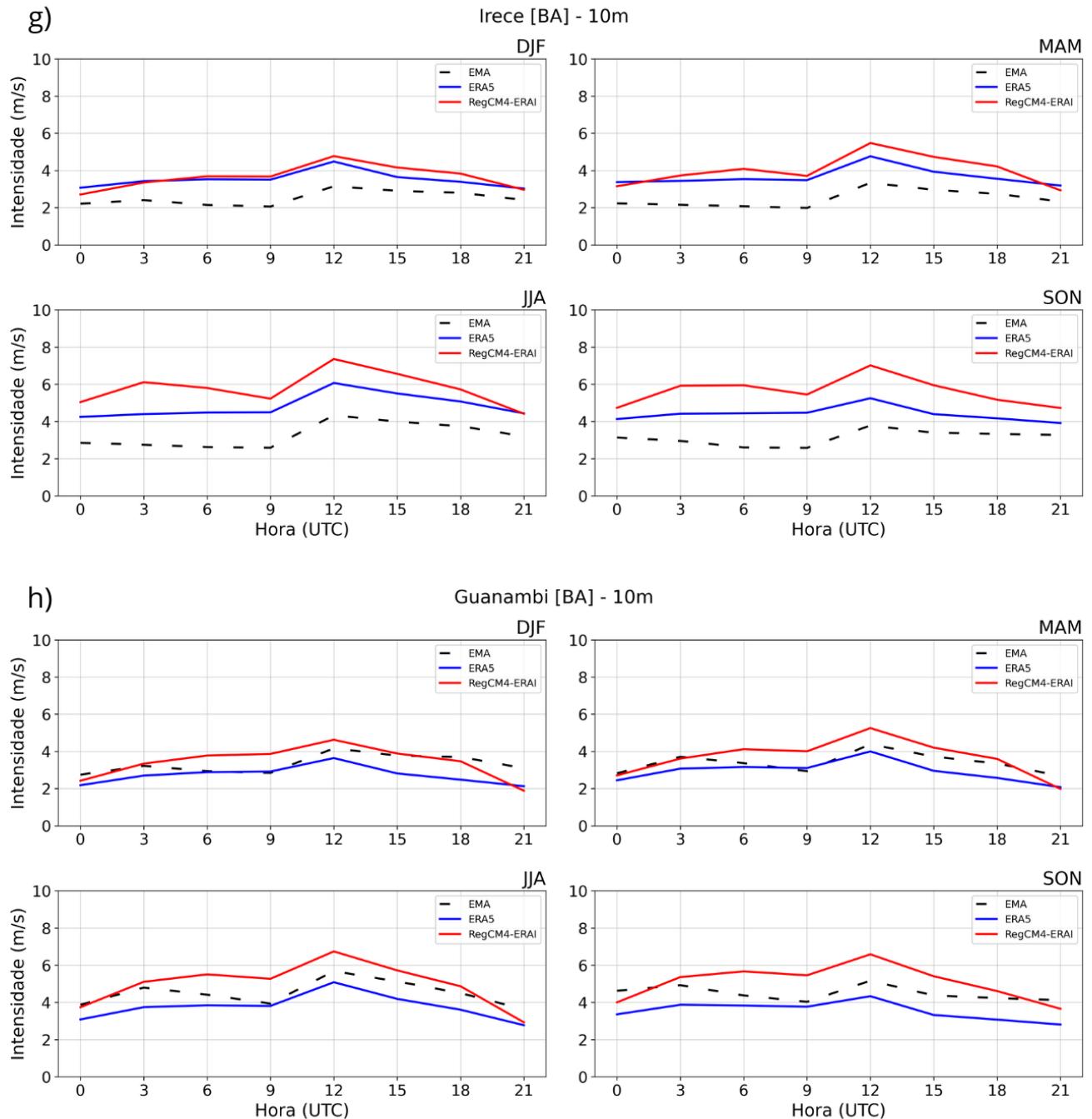
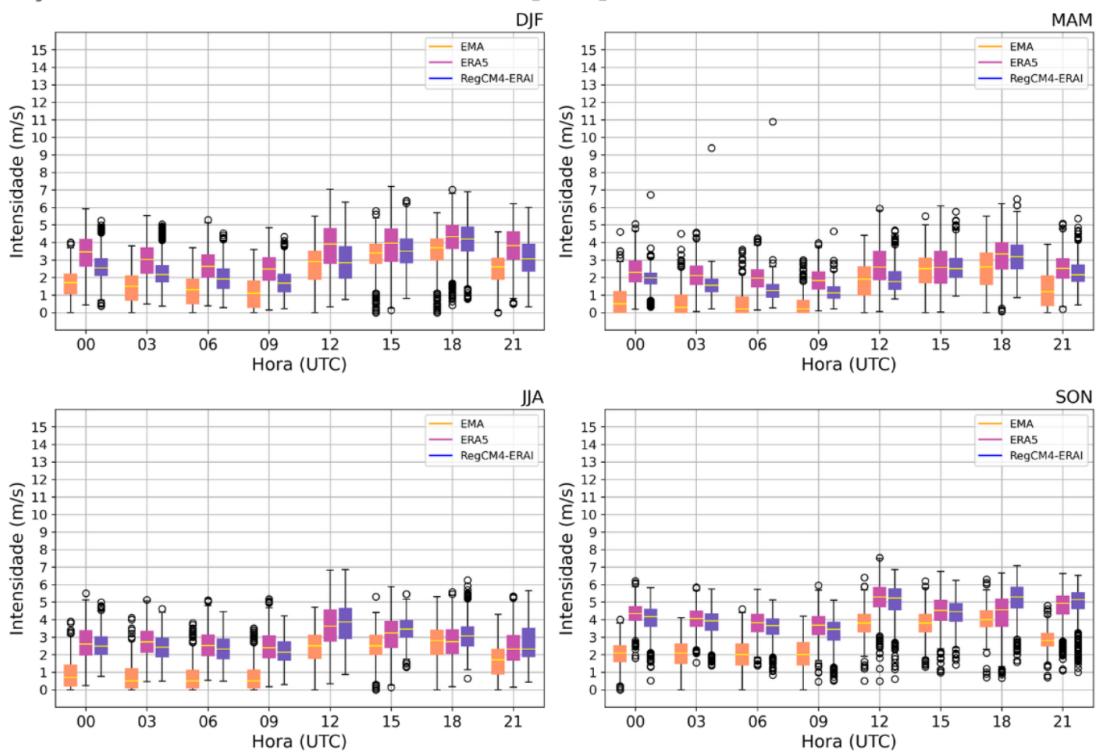
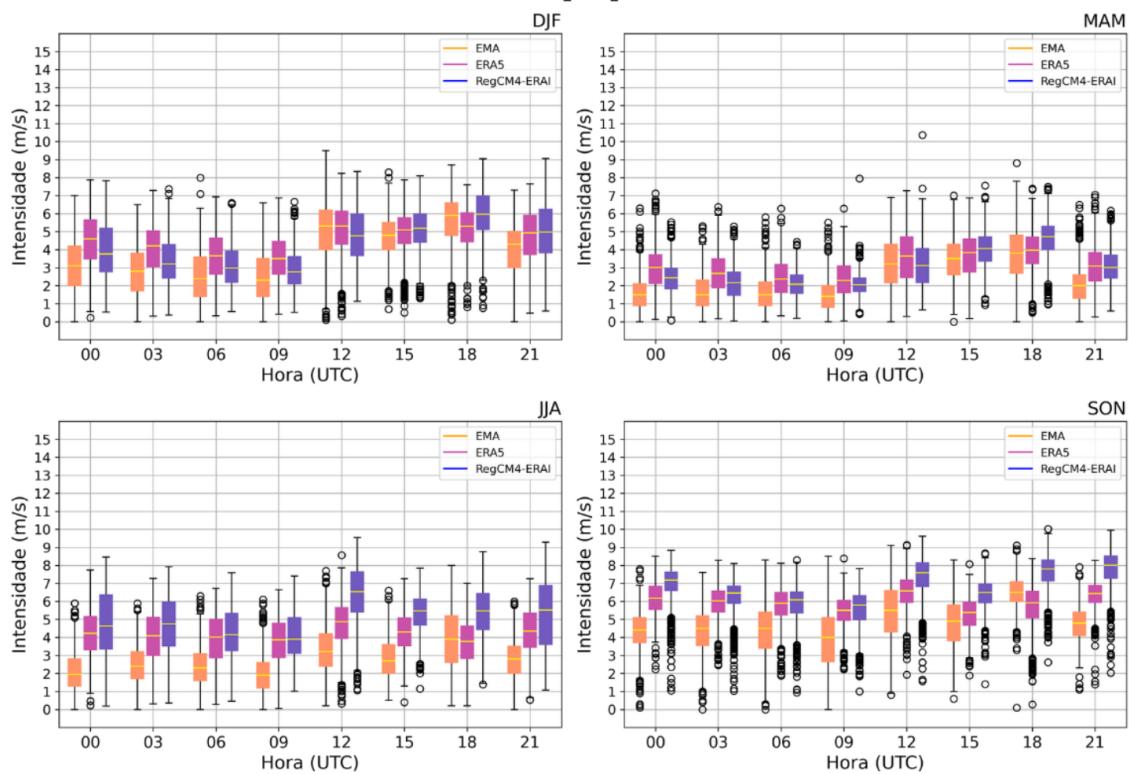
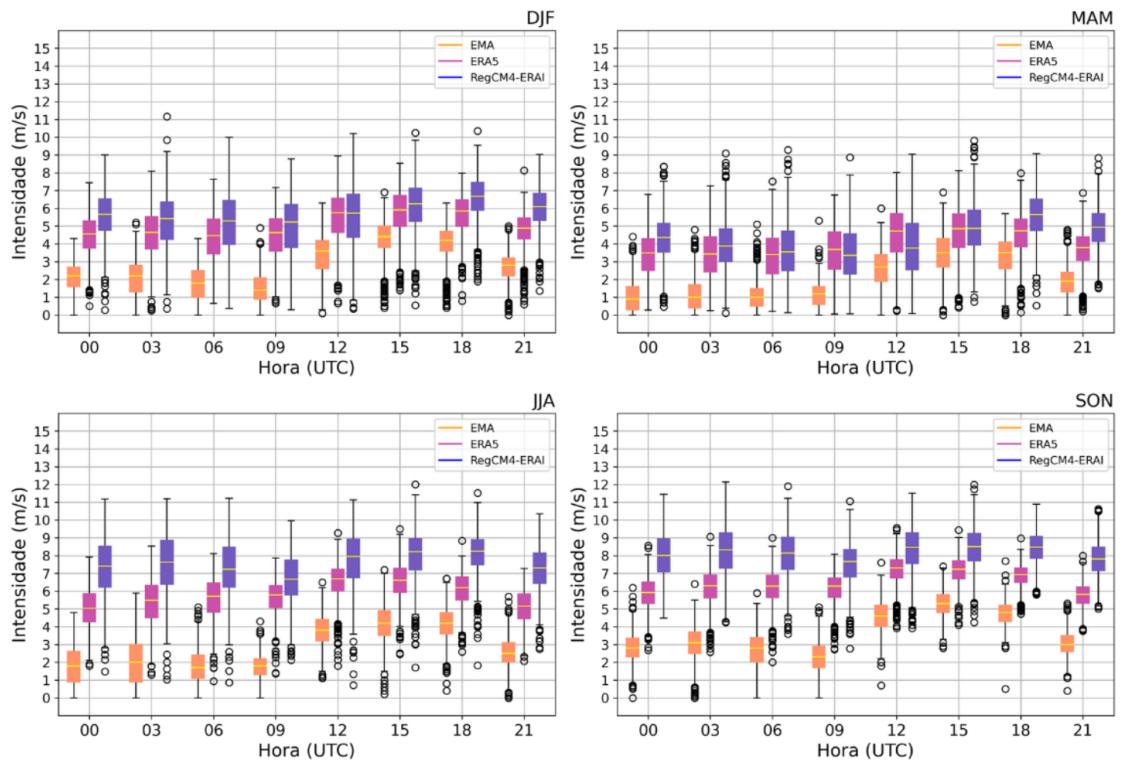


Figura 10 - Médias sazonais a cada 3h para as EMAs (preto tracejado), ERA5 (azul) RegCM4-ERA1 (vermelho) nas localidades de a) São Luís, b) Parnaíba, c) Fortaleza, d) Natal, e) João Pessoa, f) Petrolina, g) Irecê e h) Guanambi.

**a)****São Luís [MA] - 10 m****b)****Parnaíba [PI] - 10 m**

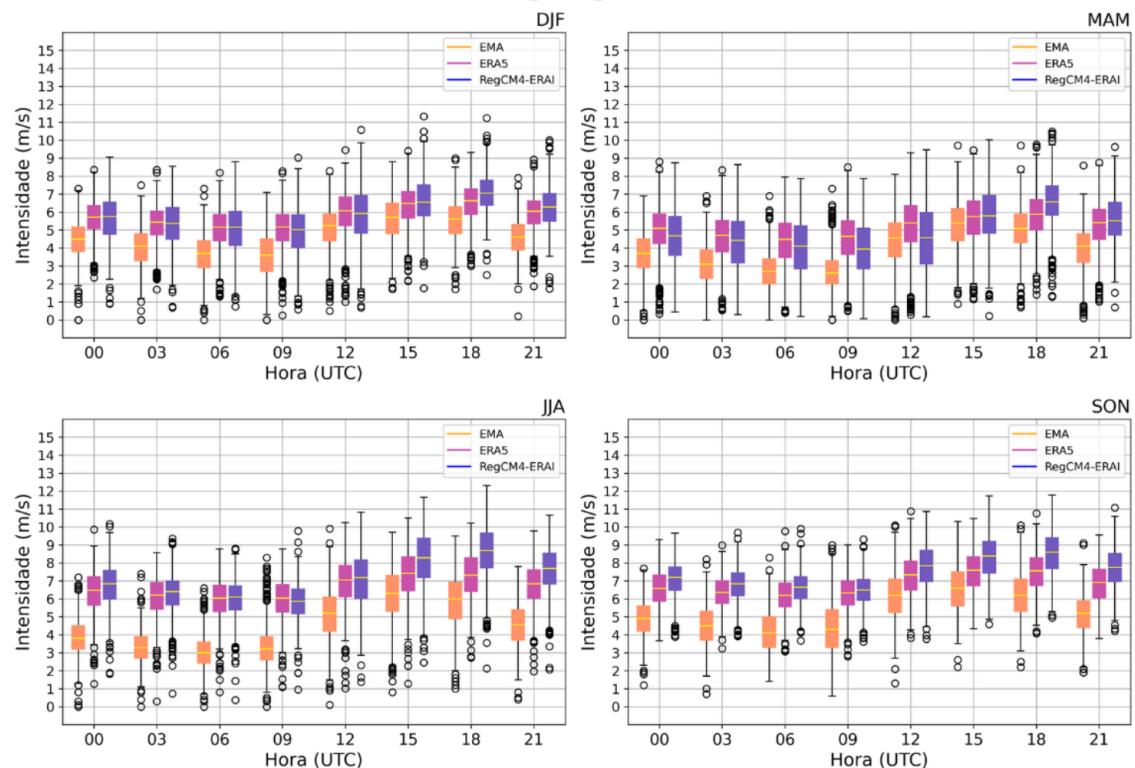
c)

## Fortaleza [CE] - 10 m



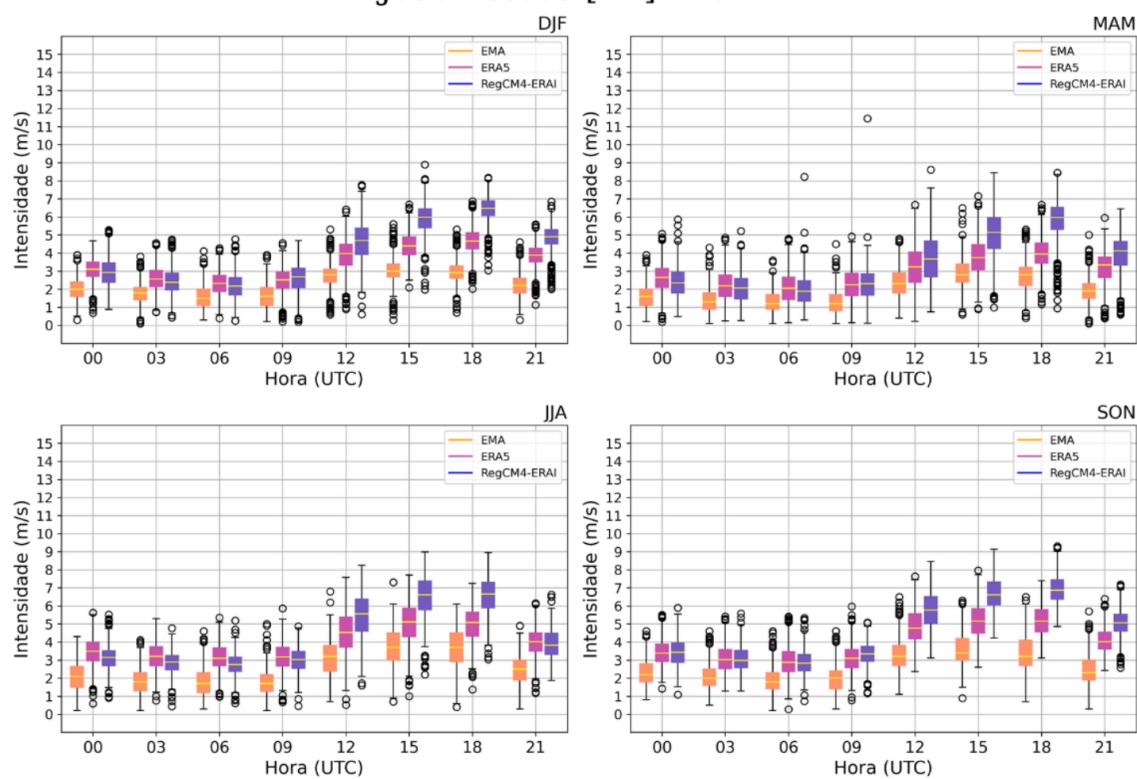
d)

## Natal [RN] - 10 m



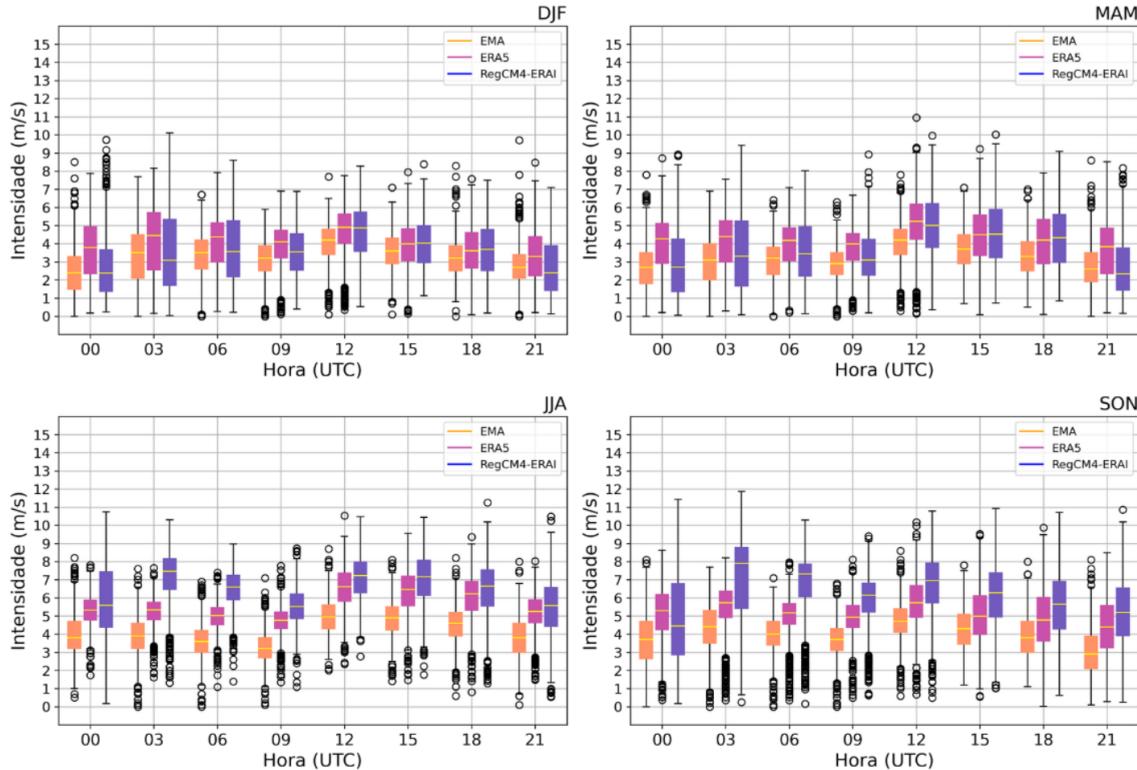
e)

### João Pessoa [PB] - 10 m



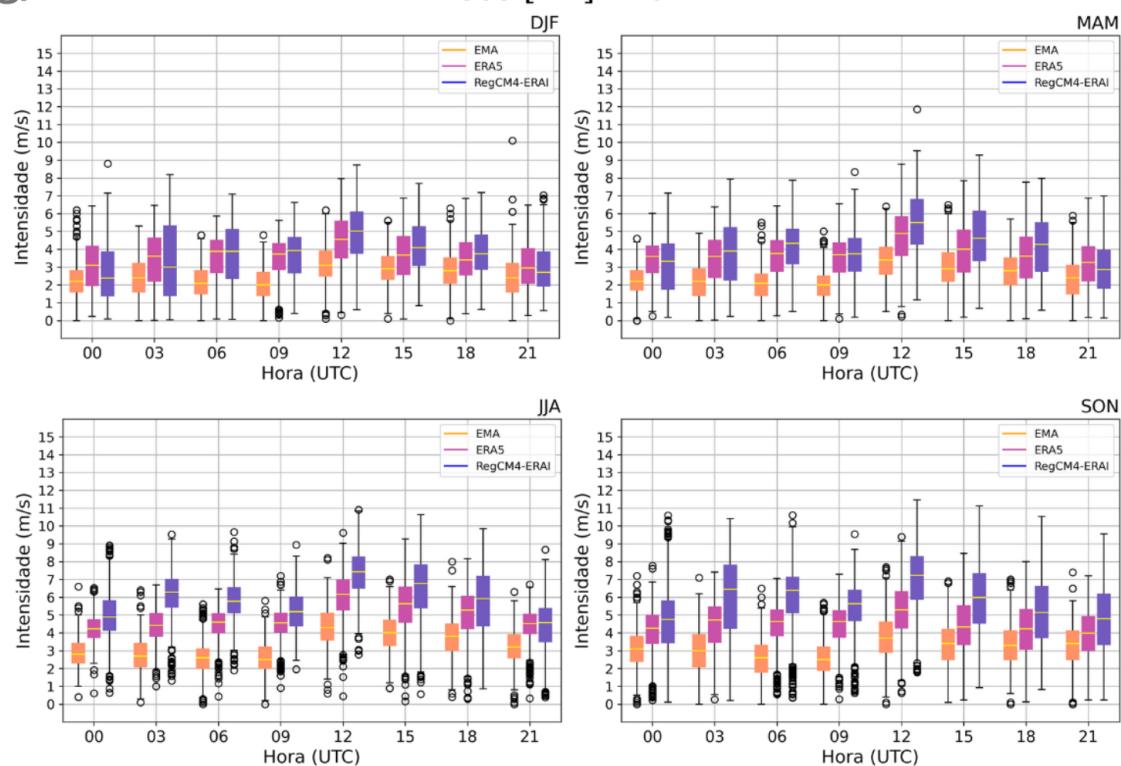
f)

### Petrolina [PE] - 10 m



g)

## Irecê [BA] - 10 m



h)

## Guanambi [BA] - 10 m

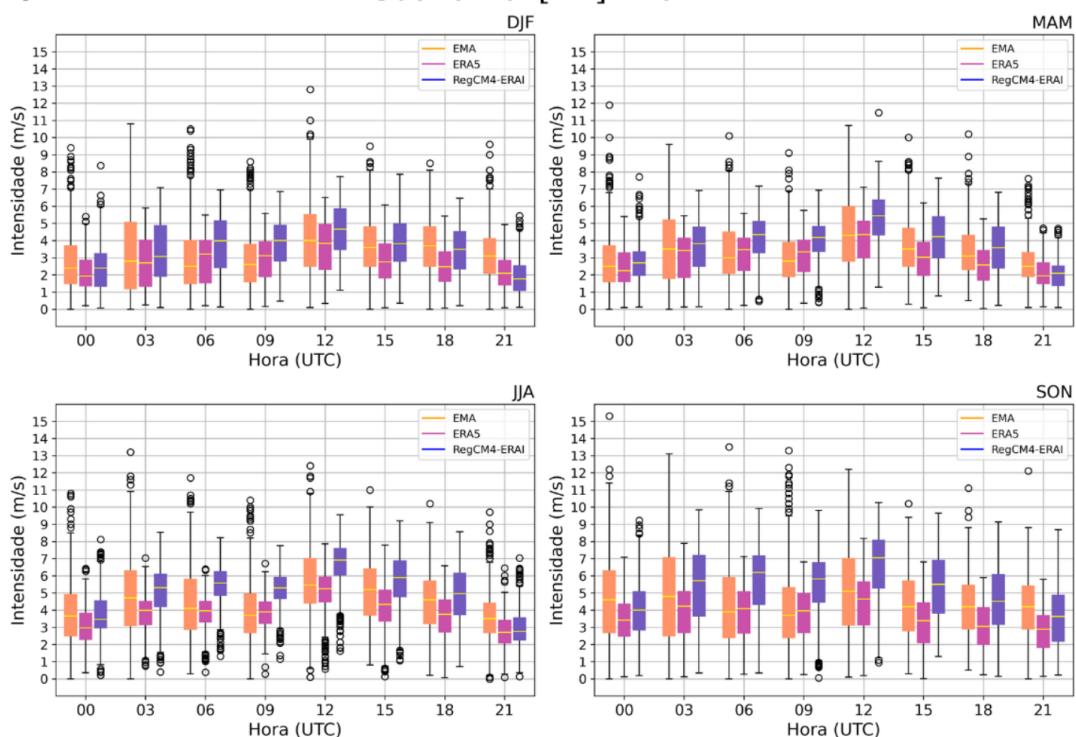


Figura 11 - Boxplots a cada 3h para as EMAs (laranja), ERA5 (roxo) e RegCM4-ERA1 (azul) nas localidades de a) São Luís, b) Parnaíba, c) Fortaleza, d) Natal, e) João Pessoa, f) Petrolina, g) Irecê e h) Guanambi.

## 4.3 RAMPAS DE VENTO

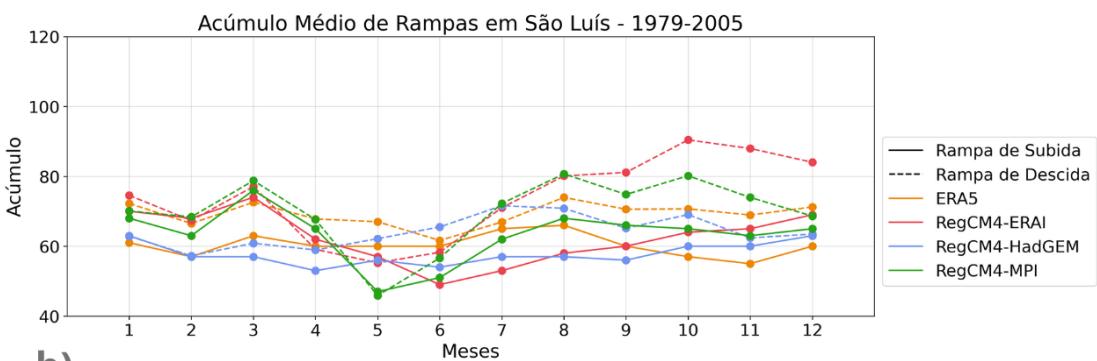
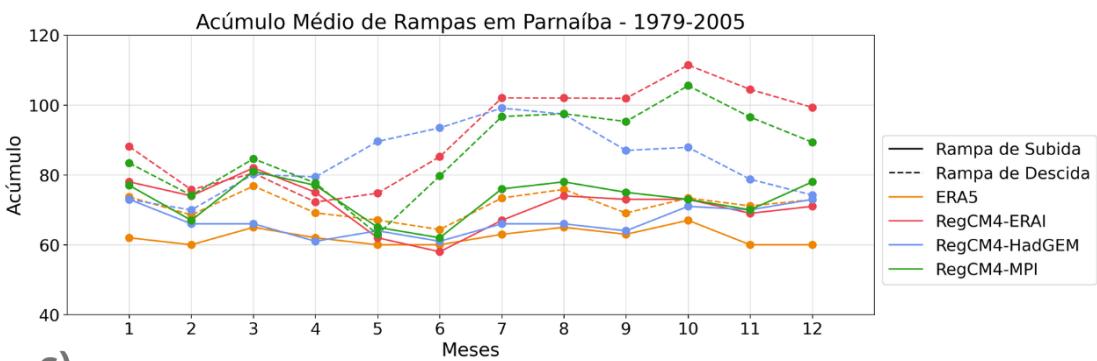
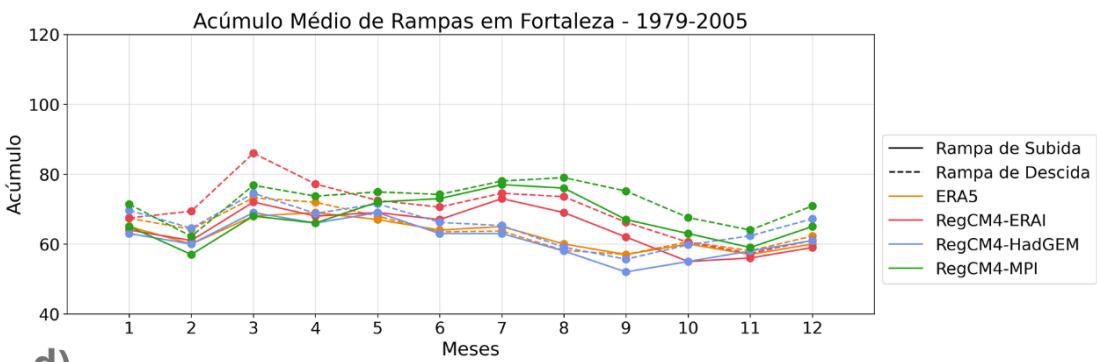
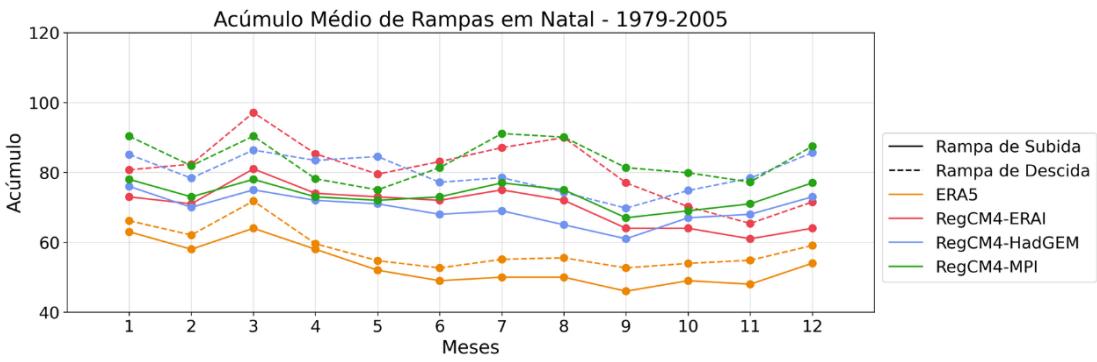
### 4.3.1 Frequência média mensal

Na Figura 12 são apresentadas as frequências médias mensais de rampas de vento a 10 m de subida (linhas contínuas) e descida e (linhas tracejadas) para ERA5 (laranja), RegCM4-ERA1 (rosa), RegCM4-HadGEM (azul) e RegCM4-MPI (verde) nas 8 localidades de estudo. De maneira geral, a ERA5 apresenta menores valores de frequência mensal de rampas de subida e descida quando comparada com os demais dados, variando entre 45-65 rampas por mês na média de 30 anos. Já as simulações com o RegCM4 mostram maior amplitude de variação, principalmente para rampas de descida, que podem apresentar variação de ~ 40 eventos na média de rampas em uma localidade. Há também maior concordância entre a simulações do RegCM4 para rampas de subida do que para rampas de descida.

Com exceção de João Pessoa e Guanambi (Figura 12.e,h), todos os conjuntos de dados apresentam maiores valores mensais para rampas de descida, o que denota que o decréscimo na velocidade do vento é mais frequente e intenso do que a variação positiva para atingir o valor limite estabelecido ( $\pm 0,5$  m/s). Nota-se que há certo padrão entre localidades que compartilham o mesmo subdomínio, demonstrando consistência em padrões regionais, caso de C1 (Figuras 12.a,b), C3 (Figuras 12.d,e) e C4 (Figuras 12.f,g). Este resultado pode ser comparado com as descobertas de Walton *et al.* (2013), os quais conduziram uma análise abrangendo dois parques eólicos localizados a uma distância de 160 km nos Estados Unidos, revelando uma notável coerência espacial em relação aos eventos de rampa.

No que diz respeito ao ciclo anual, a análise da reanálise ERA5 revela que as ocorrências de rampas de subida são geralmente menores durante o período seco (JJA) em todas as localidades, com a exceção notável de Guanambi (Figura 12.h). Neste caso, Guanambi exibe um acúmulo mensal mais elevado de rampas de subida durante o período seco em comparação com o restante do ano. No entanto, é importante observar que essa localidade também apresenta variações mensais relativamente pequenas ao longo do ano. Por outro lado, a incidência de rampas de descida segue um padrão semelhante, mas com médias mensais mais elevadas do que as observadas para as rampas de subida.

No que concerne às simulações, é evidente uma tendência de superestimar a frequência de ocorrência de rampas de subida e descida em escala mensal, com médias mensais significativamente mais elevadas em comparação com os dados da reanálise ERA5. Especificamente, para as localidades abrangidas pelo subdomínio C4 (Figura 12.f,g), as simulações apresentam uma representação deficiente do ciclo anual quando comparadas com os valores da ERA5. Isso se manifesta notavelmente com a ocorrência de máximos nas médias mensais das simulações que coincidem com os mínimos identificados na reanálise ERA5.

**a)****b)****c)****d)**

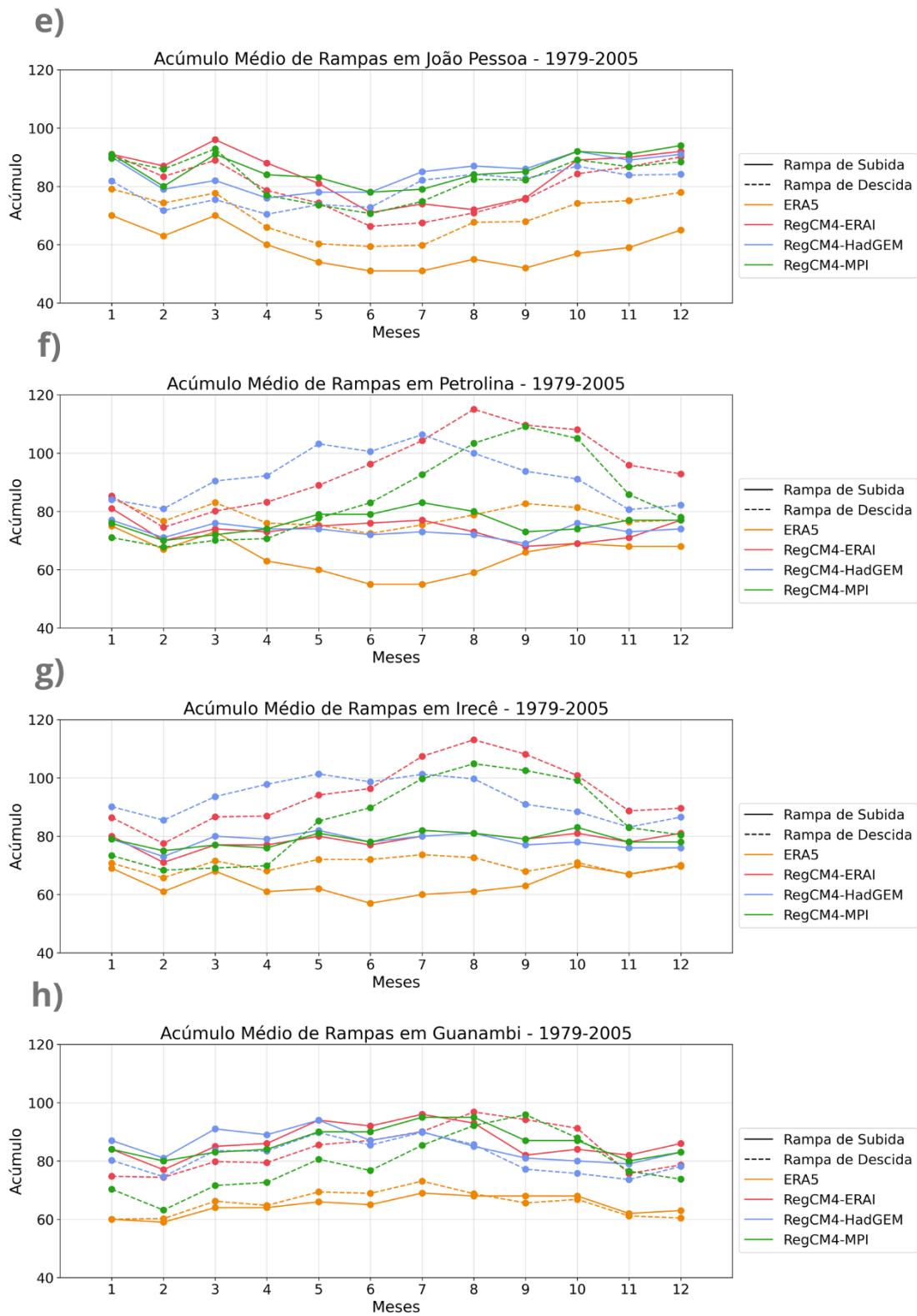


Figura 12 - Frequência média mensal de rampas de subida (linha contínua) e de descida (linha tracejada) para o período de 1979-2005 para a ERA5 (laranja), RegCM4-ERA1 (vermelho), RegCM4-HadGEM (azul) e RegCM4-MPI (verde) nas localidades de a) São Luís, b) Parnaíba, c) Fortaleza, d) Natal, e) João Pessoa, f) Petrolina, g) Irecê e h) Guanambi.

#### 4.3.2 Ciclo diurno das rampas

Nas Figuras 13-20 são apresentadas as frequências relativas (para cada estação do ano) de rampas de subida para as localidades estudadas da ERA5 (laranja), RegCM4-ERA1 (vermelho), RegCM4-HadGEM (azul) e RegCM4-MPI (verde), a cada 3 h no período de 1979-2005.

Ao analisar as variações positivas a cada intervalo de 3 horas, ou seja, as rampas de subida, fica evidente que, de maneira abrangente, os padrões sazonais de contagem relativa apresentam semelhanças entre as localidades pertencentes ao mesmo subdomínio (Figuras 13-20). Essa coerência também se alinha com as observações mensais discutidas no item 4.3.1. Entre esses subdomínios, C1 (São Luís e Parnaíba; Figura 13-14) se destaca tendo variações horárias de alta e baixa taxa relativa de acordo com a estação do ano, onde o verão (DJF) e outono (MAM) apresentam maiores frequências de rampas de subida entre 0900 e 1500 UTC, mas no inverno (JJA) a maior frequência concentra-se apenas em 0900 UTC, e na primavera essas altas frequências ocorrem às 0900 UTC e 1500 UTC. O RegCM4 captura adequadamente esta variabilidade sazonal do horário de ocorrência de rampas de subida, embora superestime a frequência apresentada pela ERA5 às 12 UTC no verão-outono e às 15 UTC na primavera.

Para Fortaleza (C2, Figura 15), Natal e João Pessoa (C3, Figura 16) observa-se que as maiores taxas de rampas têm seu pico em 0900 UTC (ERA5) com redução ao longo do dia até atingir um mínimo em 1800 UTC. Em Fortaleza, na ERA5 as rampas de subida mais frequentes às 09 UTC ocorrem em até 38% no verão e 48% na primavera, decrescendo nos horários seguintes. No inverno e primavera as simulações do RegCM4 capturam esta maior frequência às 0900 UTC, mas no verão e outono deslocam a máxima frequência para 12-15 UTC. Em Natal (Figura 16), o RegCM4 também captura a alta frequência de rampas às 0900 UTC, mas ao longo do ano subestima as a ERA5 na frequência às 0900 UTC e superestima às 1200 e 1500 UTC indicando um ligeiro atraso em desenvolver a circulação geradora da rampa de subida. Para as regiões continentais (subdomínios C4 e C5, Figuras 18 e 20), tanto na ERA5 como no RegCM4 as altas taxas de rampas de subida se concentram em 0900 UTC, porém Guanambi tem taxas menores nesse horário para todas as estações do ano comparado com Petrolina e Irecê. Petrolina e Guanambi ainda apresentam um pico secundário de rampas de

subida noturna às 0000 e 2100 UTC, fator este que também é reproduzido nas simulações do RegCM4.

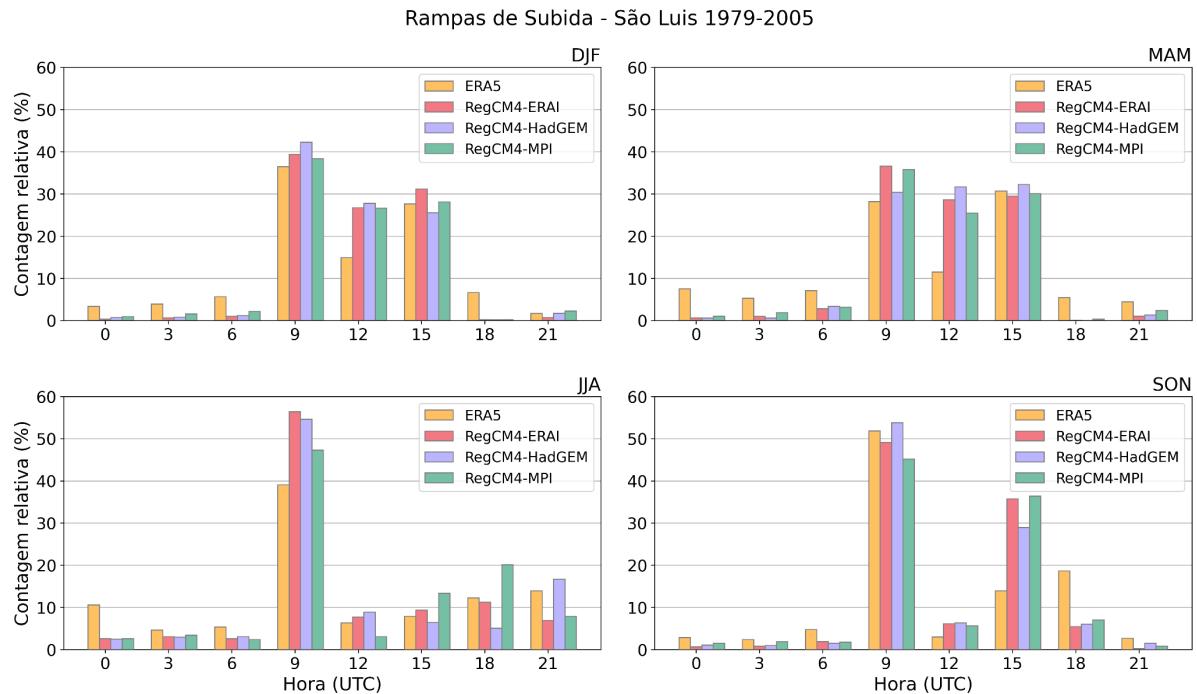


Figura 13 - Frequência relativa de rampas de subida a cada 3h para o período de 1979-2005 para os dados da ERA5 (laranja), RegCM4-ERAI (vermelho), RegCM4-HadGEM (azul) e RegCM4-MPI (verde) para São Luís.

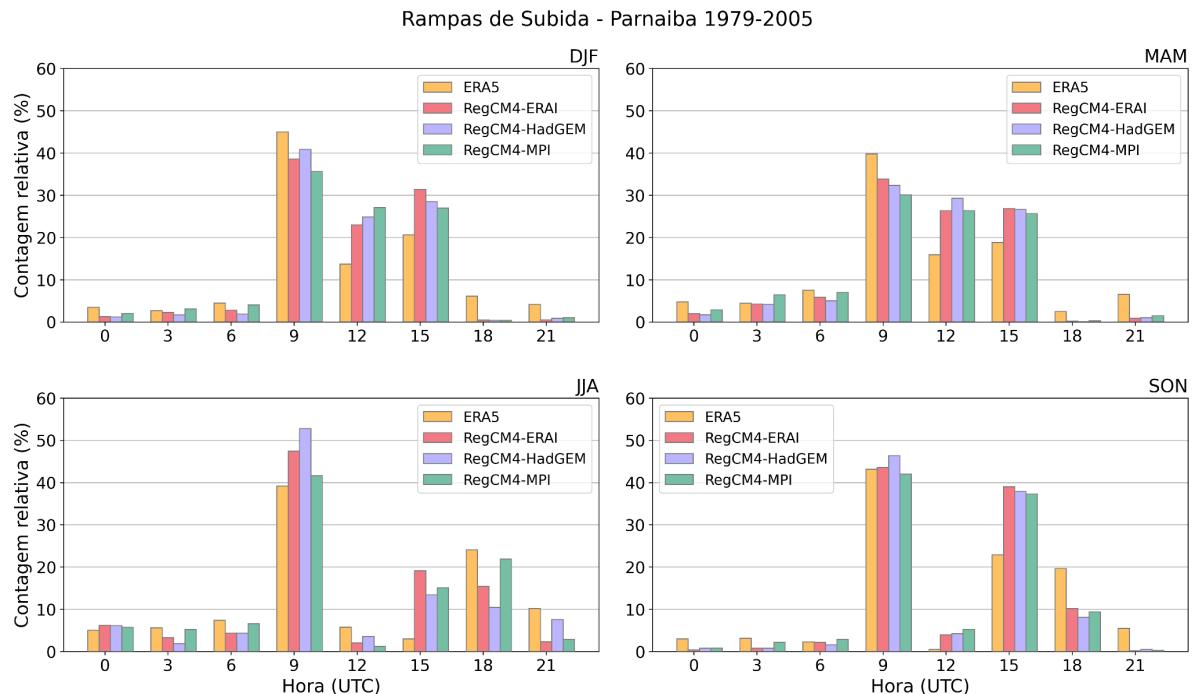


Figura 14 - Semelhante à Figura 13, para Parnaíba.

### Rampas de Subida - Fortaleza 1979-2005

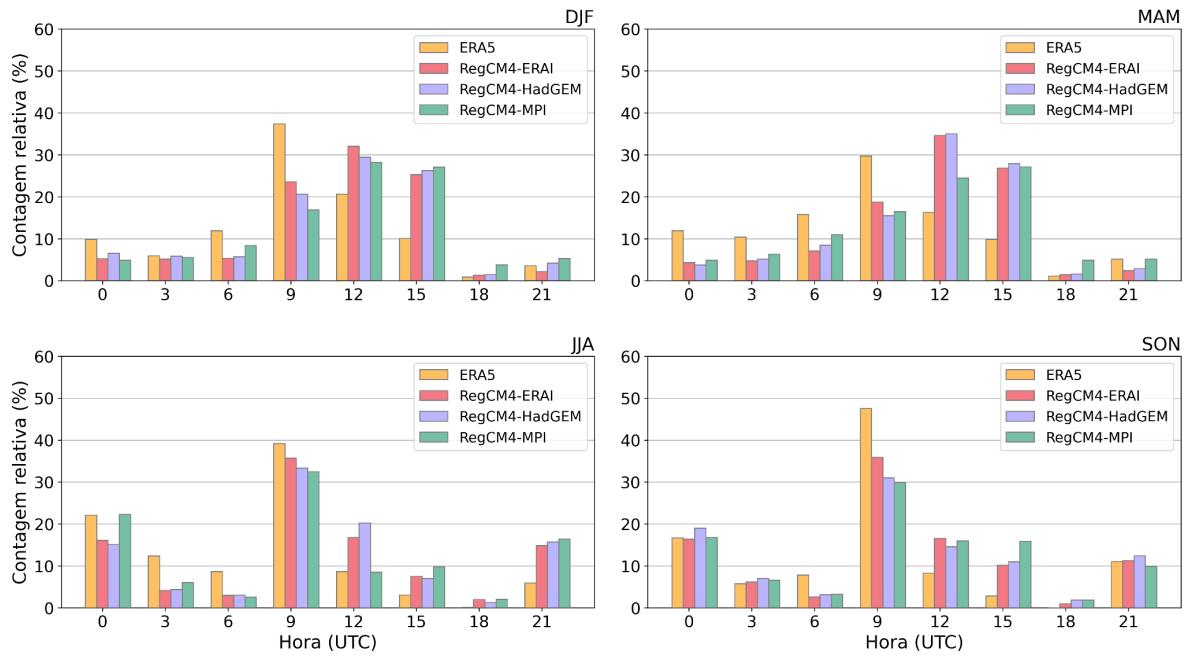


Figura 15 - Semelhante à Figura 13, para Fortaleza.

### Rampas de Subida - Natal 1979-2005

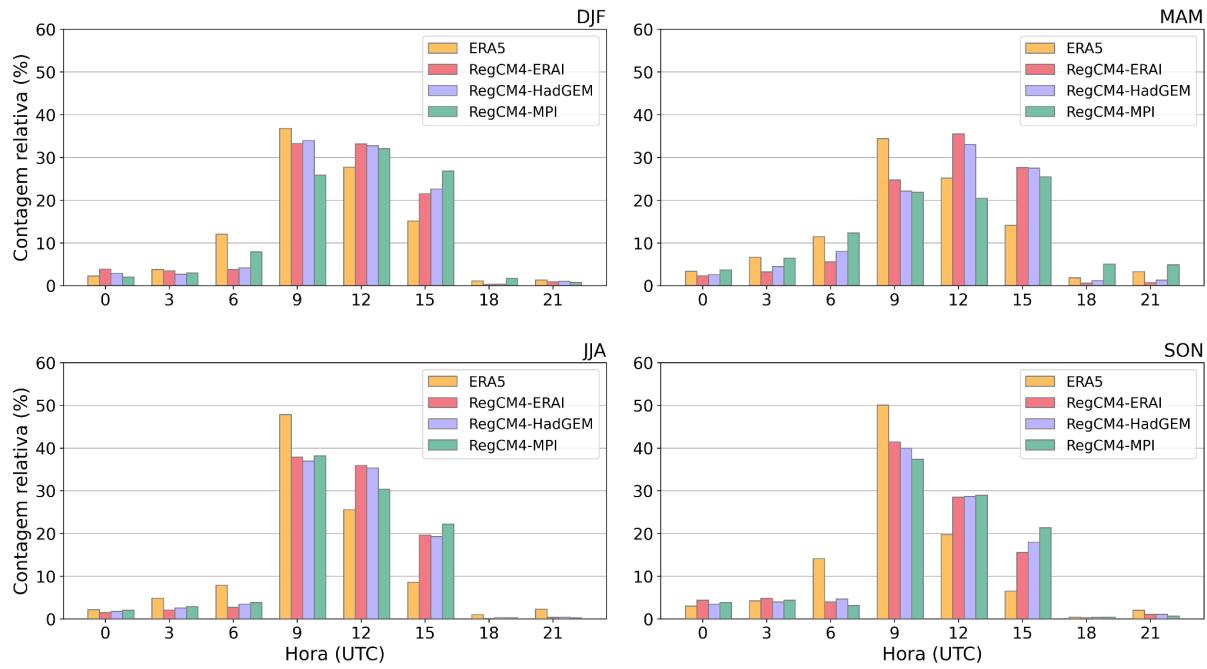


Figura 16 - Semelhante à Figura 13, para Natal.

### Rampas de Subida - João Pessoa 1979-2005

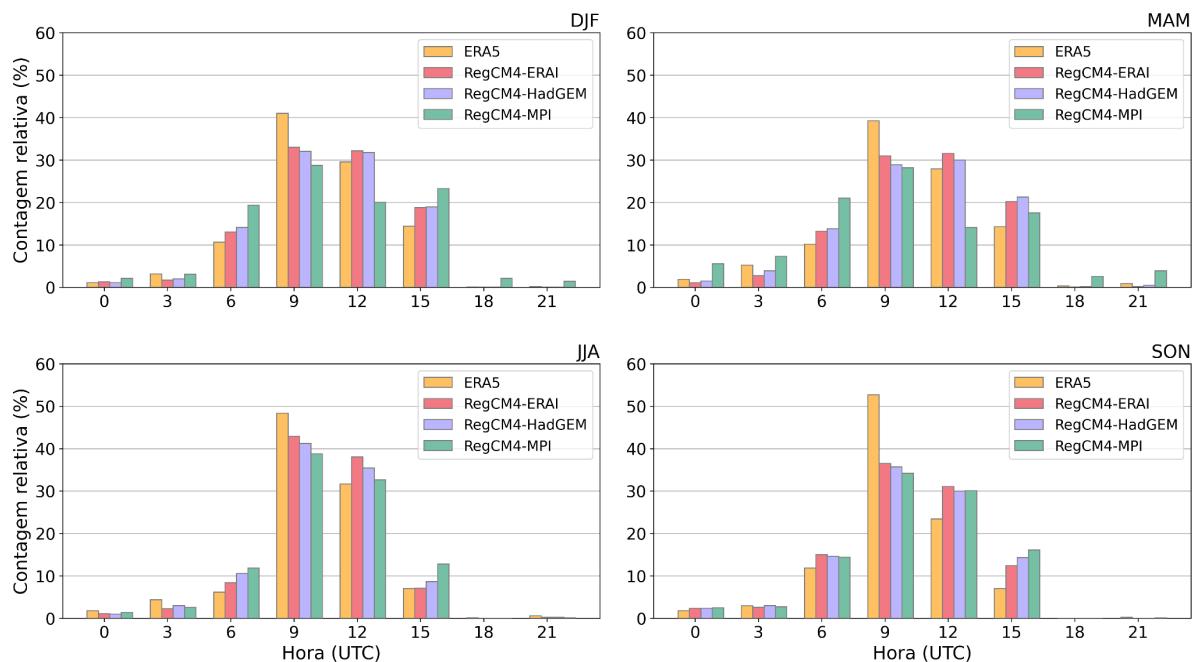


Figura 17 - Semelhante à Figura 13, para João Pessoa.

### Rampas de Subida - Petrolina 1979-2005

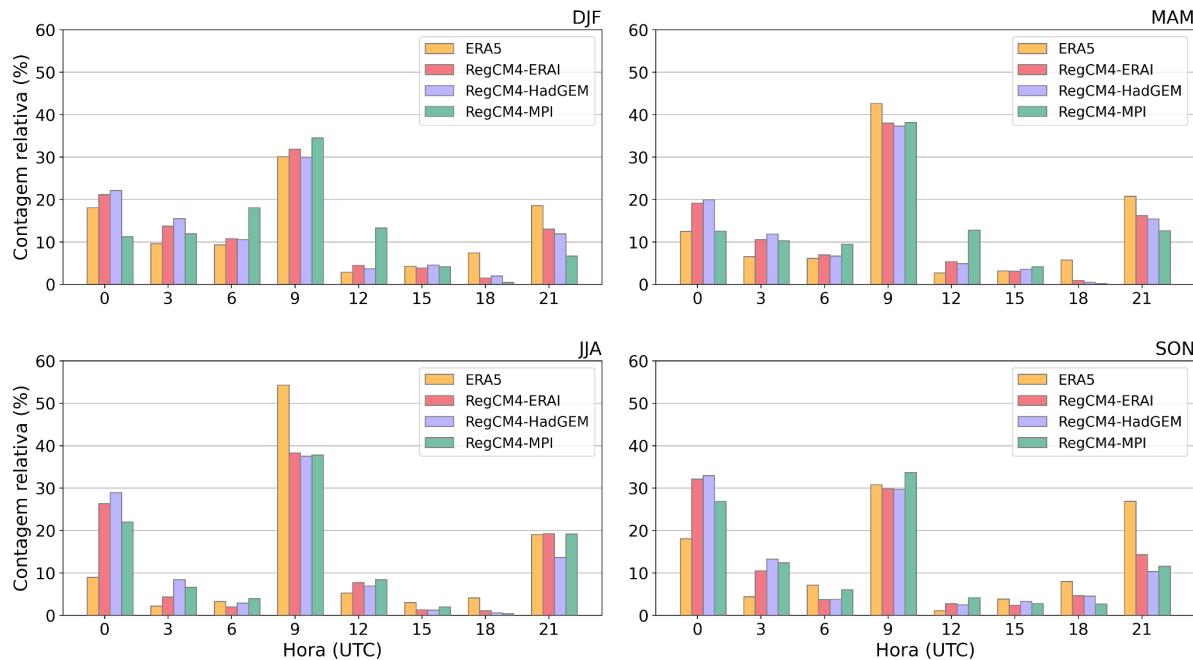


Figura 18 - Semelhante à Figura 13, para Petrolina.

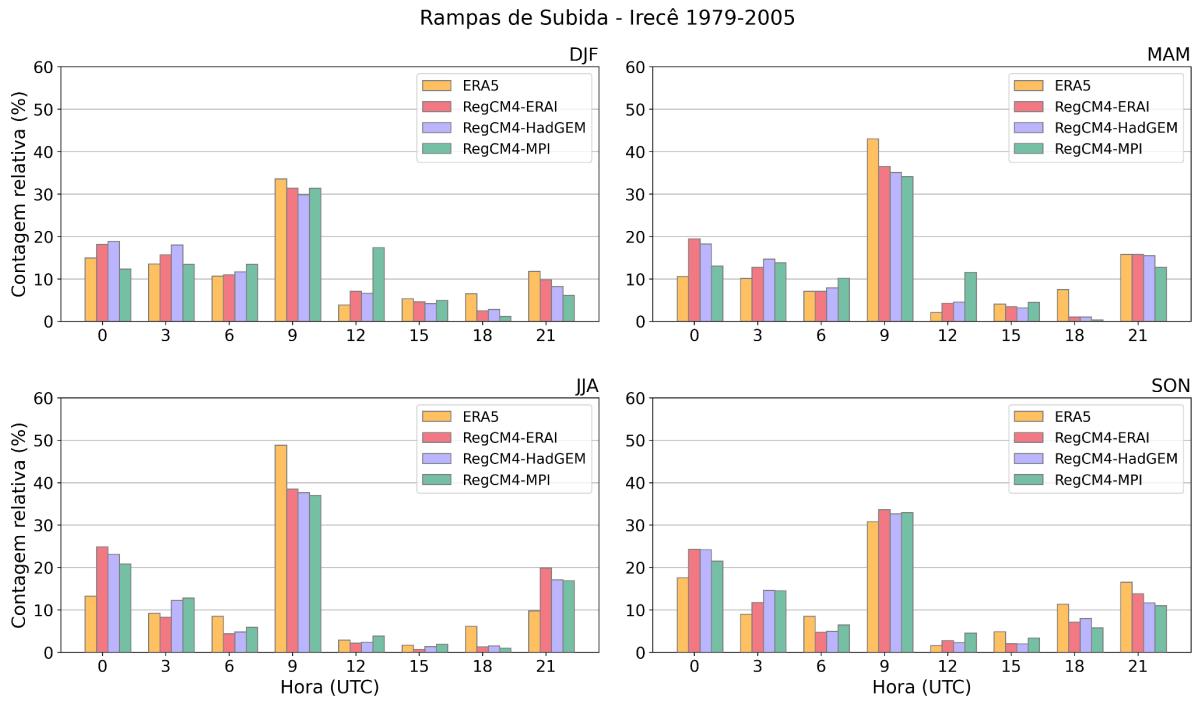


Figura 19 - Semelhante à Figura 13, para Irecê.

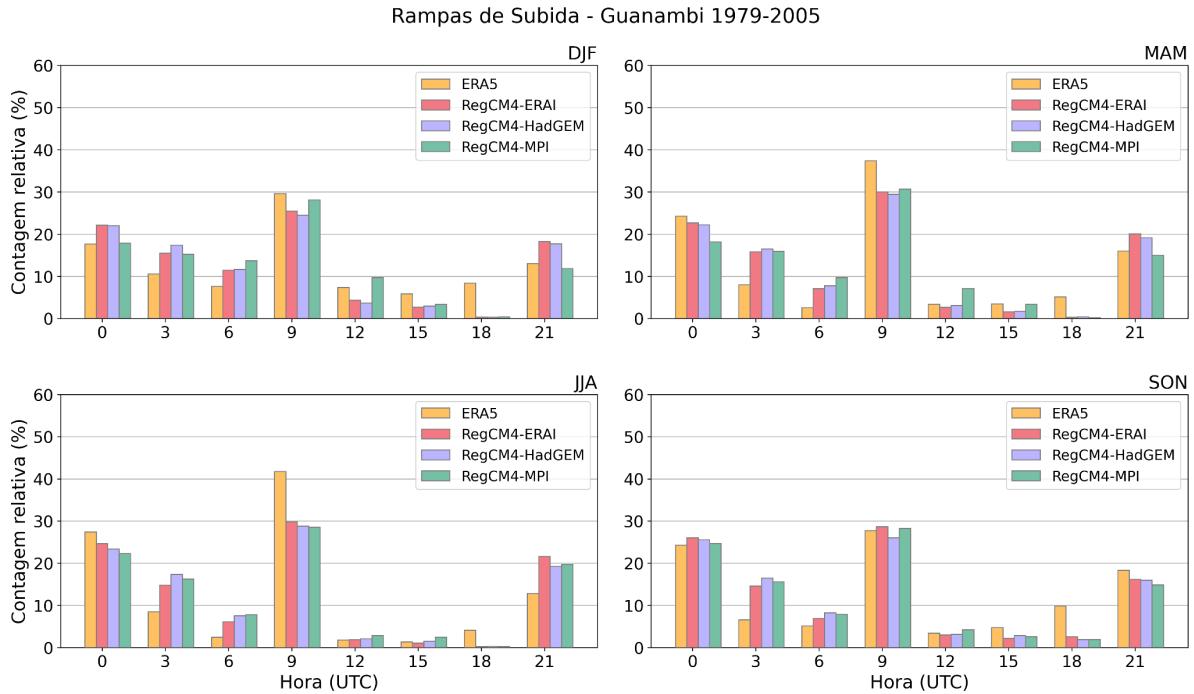


Figura 20 - Semelhante à Figura 13, para Guanambi.

Para as rampas de descida apresentadas nas Figuras 21-28, que são designadas como variações negativas de velocidade do vento num intervalo de 3 h, também nota-se de maneira geral que os padrões de frequência relativa sazonais são similares para as localidades que estão no mesmo subdomínio. Para C1 (São

Luís e Parnaíba, Figuras 21-22) para o verão (DJF) e outono (MAM) entre 0600 e 1500 UTC tem-se a menor frequência diária, enquanto que no inverno (JJA) varia entre 0000 e 0900 UTC. Para a primavera entre 0600-0900 UTC e 1500 UTC a frequência das rampas de descida é mais baixa. A maior taxa de rampas de descida ocorre no outono (MAM) em 1800 UTC.

Para Fortaleza (Figura 23), única localidade em C2, o ciclo diurno das rampas de descida para os diferentes períodos (seco e chuvoso) é similar entre si, apresentando valores mínimos em 0900 UTC e máximos em 1800 UTC. As rampas de descida na ERA5 apresentam maior variabilidade ao longo do dia na contagem relativa do que as do RegCM4, atingindo taxas que chegam a 50% da frequência relativa diária. Nota-se que para Natal e João Pessoa (Figuras 24 e 25), ambos em C3, há valores mínimos entre 0600 e 1500 UTC. Tanto em Natal como em João Pessoa as simulações do RegCM4 reproduzem os padrões de ciclo diurno de frequência de rampas de descida, com pequenas diferenças em intensidade ao longo do dia. Nas regiões de C4 (Petrolina e Irecê, Figuras 26-27) e C5 (Guanambi, Figura 28) os valores mínimos encontram-se em 0900 UTC e entre 2100 e 0600 UTC, apresentando valores mais baixos para C5 quando comparado com a região C4. Para todas as estações do ano em C4 e C5 (Figuras 26-28), as simulações indicam subestimativa de rampas de descida às 0900 UTC e superestimativa às 1800 UTC em relação à ERA5.

É relevante salientar que os períodos de maior incidência de rampas de subida e descida coincidem com os padrões horários da intensidade média dos ventos, ou seja, horários com maior frequência de ocorrência de rampas de subida ocorrem quando a intensidade média dos ventos aumenta (conforme apresentado na Figura 10). Esta observação destaca uma correlação entre as flutuações nas rampas de subida e descida e as variações na intensidade dos ventos ao longo do dia. Esse resultado se assemelha com aqueles encontrados por Barreto (2001), que identificou a intensificação (desintensificação) dos ventos na faixa litorânea do NEB devido à brisa marítima (terrestre) no período diurno (noturno). Tal fenômeno pode ser de grande interesse para o estudo e planejamento de sistemas de geração de energia eólica, fornecendo *insights* valiosos para o aproveitamento eficiente dessa fonte renovável de energia.

### Rampas de Descida - São Luis 1979-2005

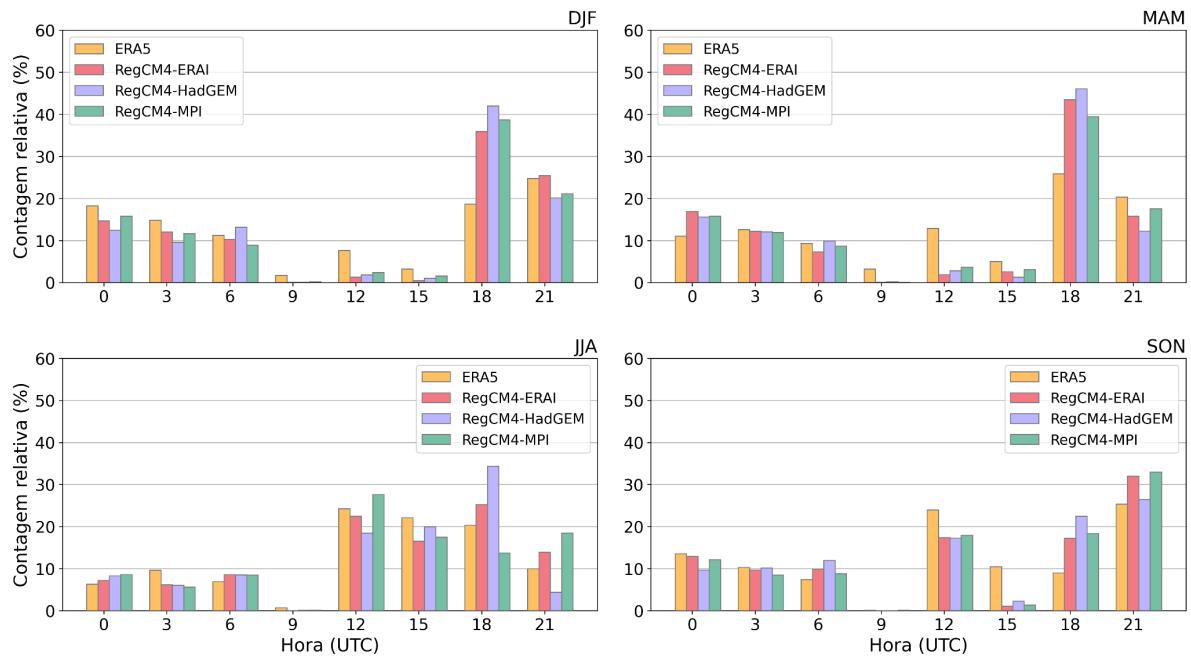


Figura 21 - Frequência relativa de rampas de descida a cada 3h para o período de 1979-2005 para os dados da ERA5 (laranja), RegCM4-ERAI (vermelho), RegCM4-HadGEM (azul) e RegCM4-MPI (verde) para São Luís.

### Rampas de Descida - Parnaíba 1979-2005

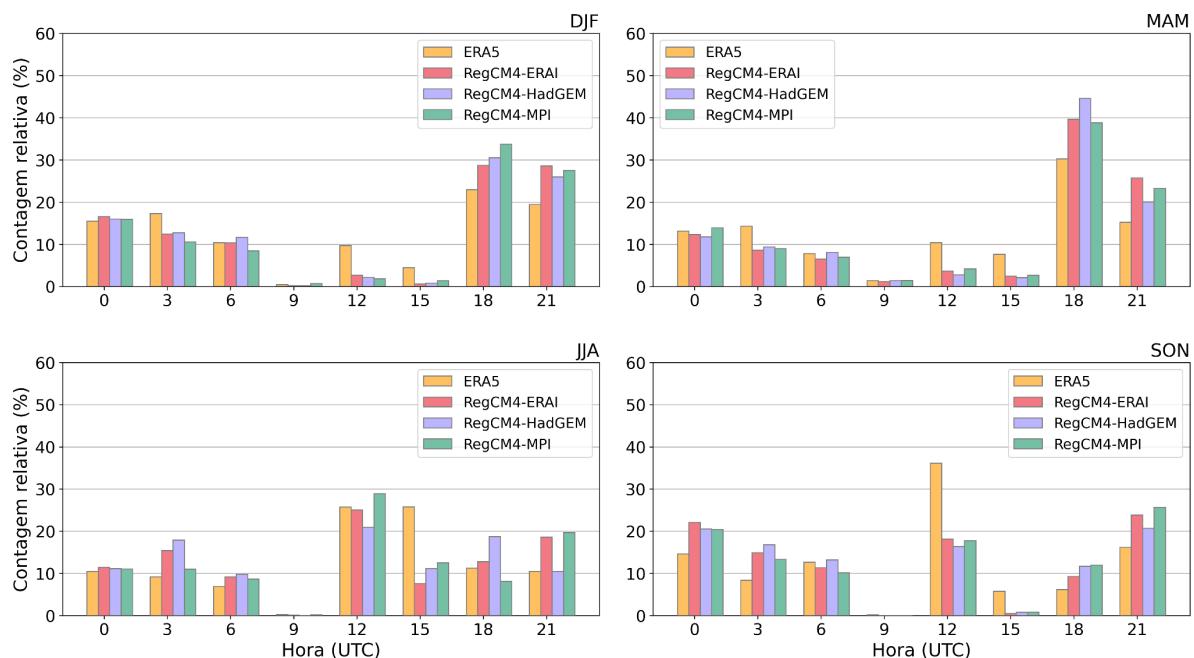


Figura 22 - Semelhante à Figura 21, para Parnaíba.

Rampas de Descida - Fortaleza 1979-2005

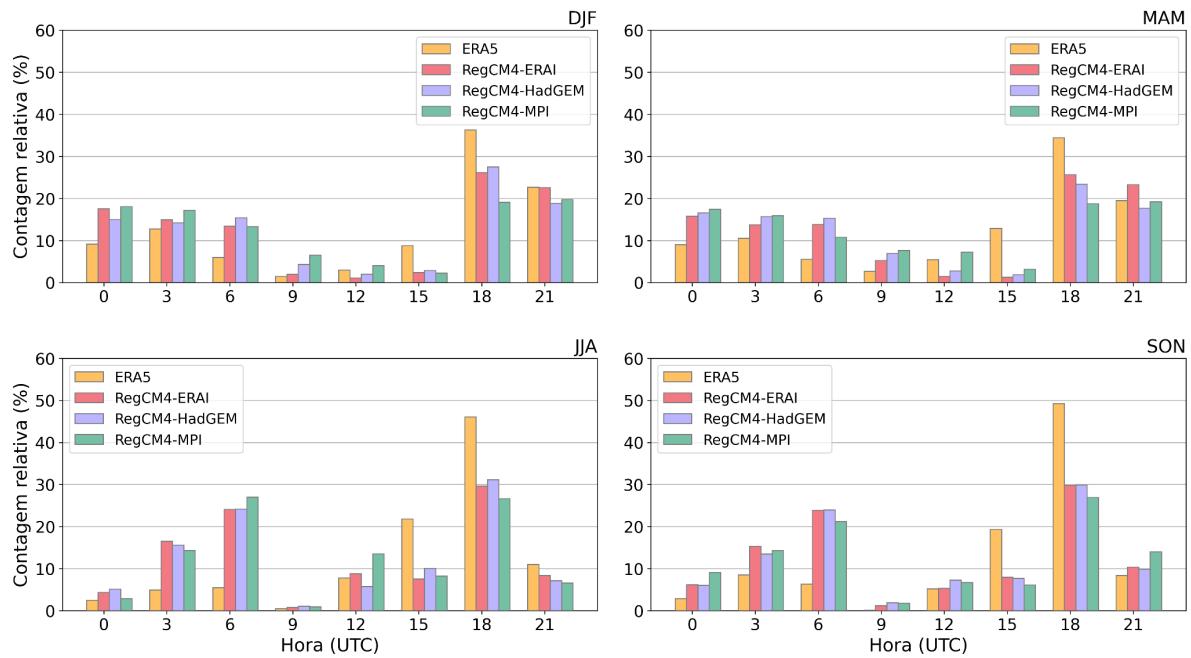


Figura 23 - Semelhante à Figura 21, para Fortaleza.

Rampas de Descida - Natal 1979-2005

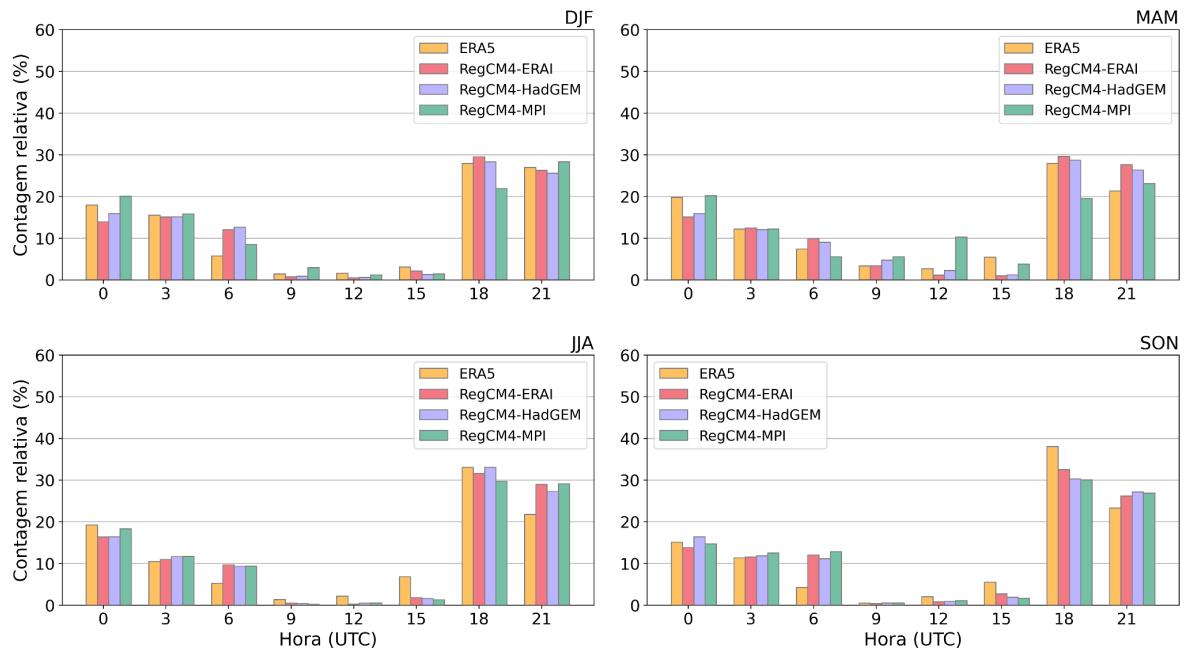


Figura 24 - Semelhante à Figura 21, para Natal.

### Rampas de Descida - João Pessoa 1979-2005

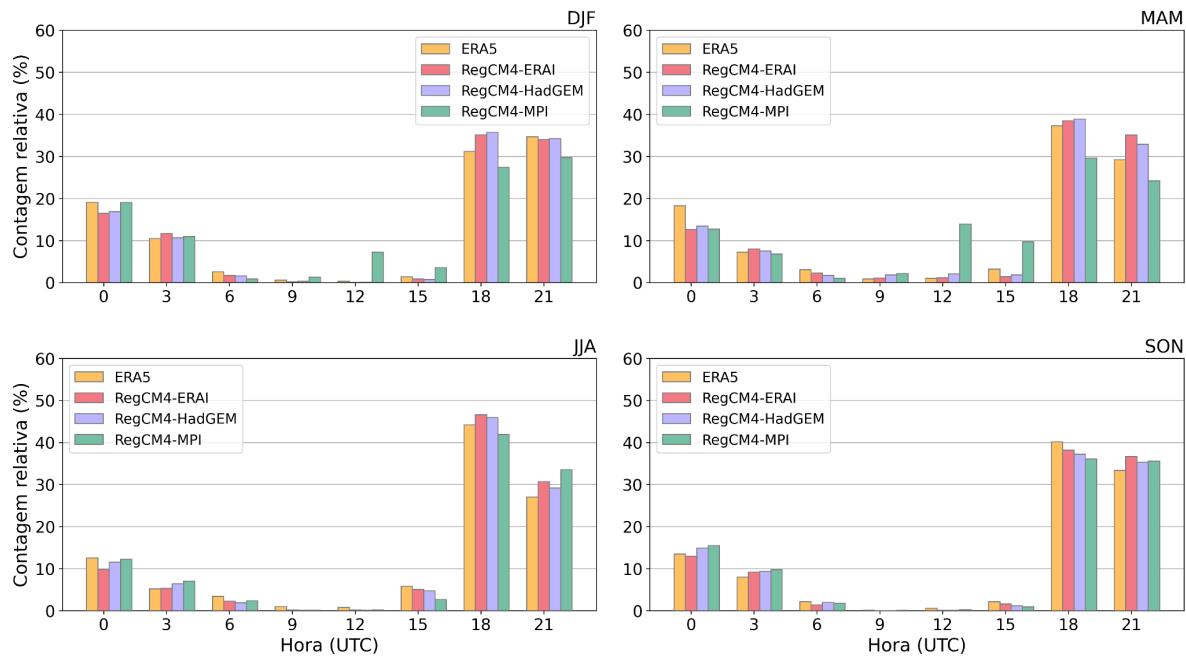


Figura 25 - Semelhante à Figura 21, para João Pessoa.

### Rampas de Descida - Petrolina 1979-2005

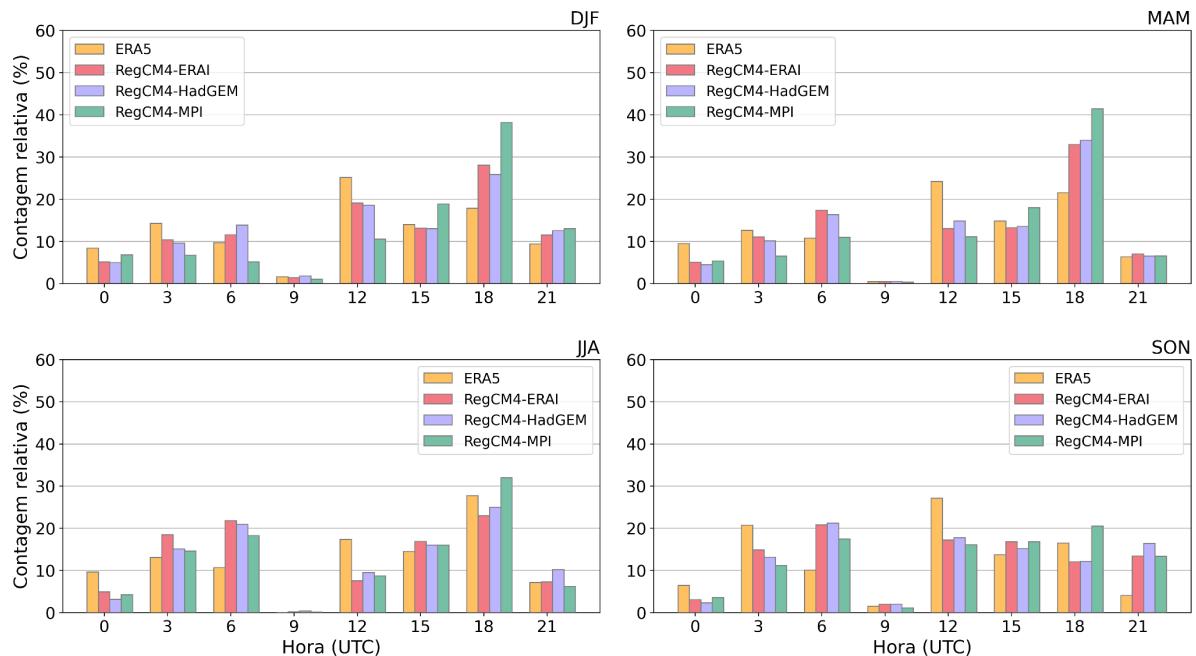


Figura 26 - Semelhante à Figura 21, para Petrolina.

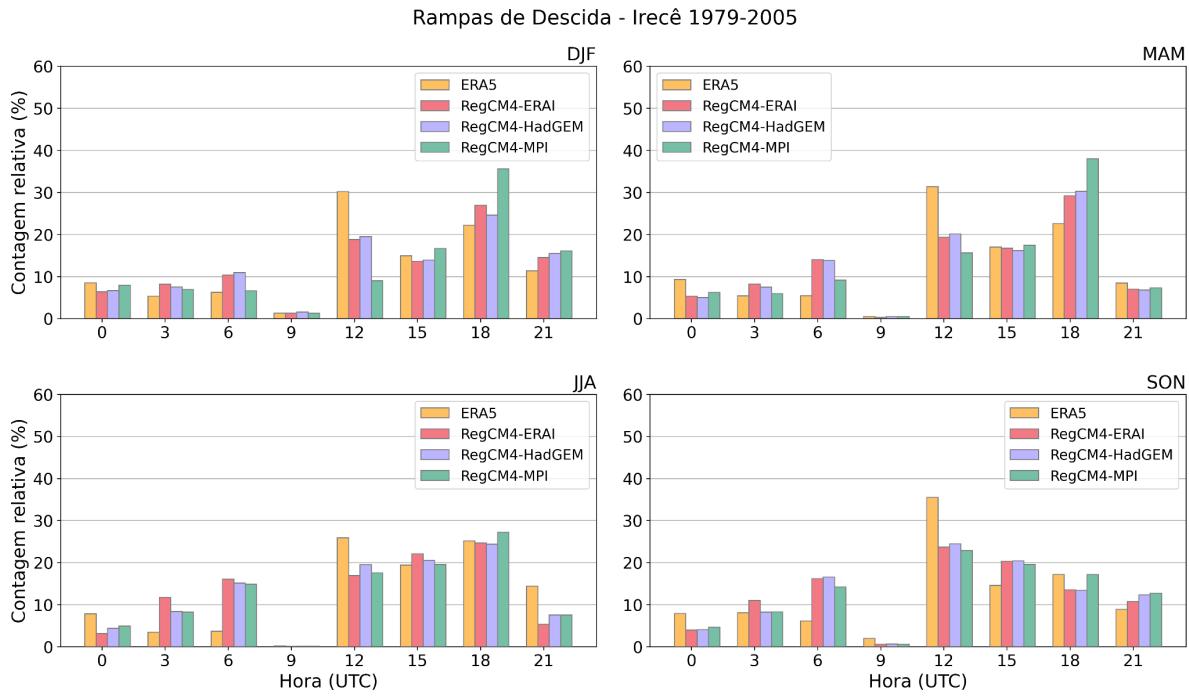


Figura 27 - Semelhante à Figura 21, para Irecê.

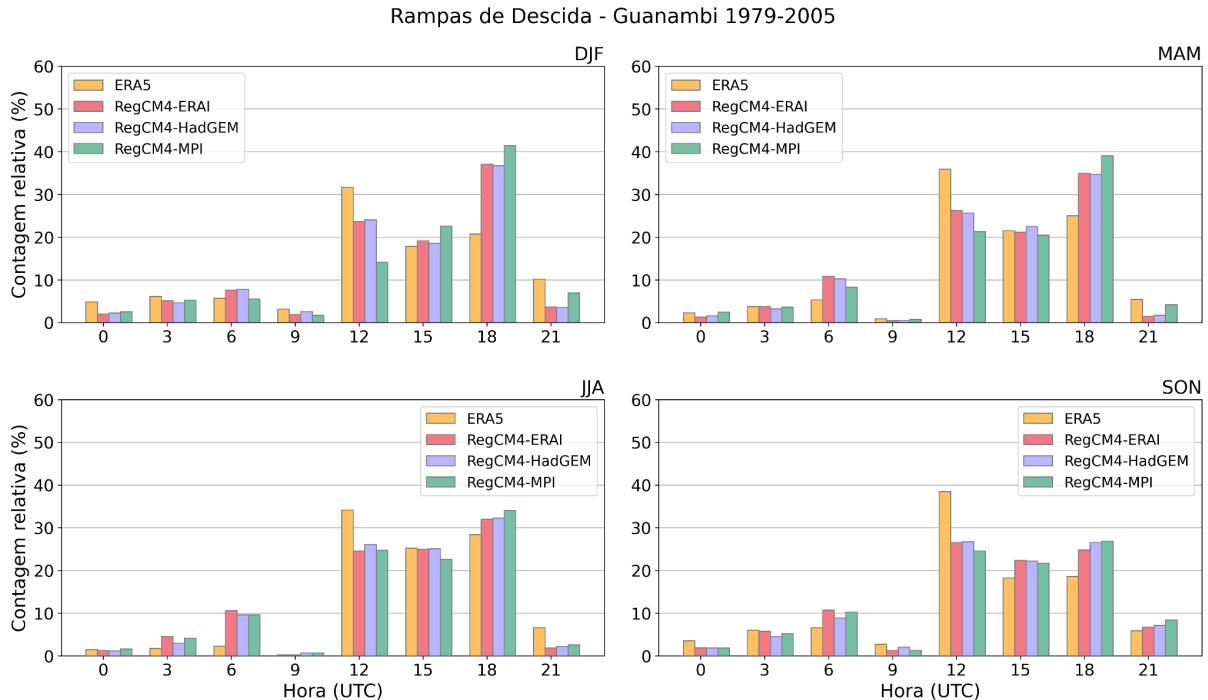


Figura 28 - Semelhante à Figura 21, para Guanambi.

Nas Figuras 29-36 são apresentadas as não-rampas a cada 3 h, ou seja, a variação do vento  $< |0,5|$  m/s, que possuem pouca oscilação no decorrer do dia quando comparadas com rampas de subida ou de descida. Fortaleza é o local que apresenta menor flutuação horária e sazonal para não-rampas, tanto na ERA5 como

nas simulações do RegCM4 (Figura 31). Para C1 (São Luís e Parnaíba, Figuras 29-30) as não-rampas acontecem com maior frequência na madrugada e começo do dia, reduzindo suas frequências às 0900 UTC, momento que há a maior ocorrência de rampas de subida para esses locais (Figuras 21-22), e mantendo valores intermediários na segunda metade do dia. Estas características do ciclo diurno das não rampas são encontradas tanto na ERA5 como no RegCM4.

João Pessoa (Figura 33) apresenta grande variação na frequência relativa diária, com valores significativamente mais elevados de frequência nas primeiras horas do dia, enquanto apresenta episódios praticamente ausentes às 0900 e 1800 UTC, enquanto que Natal (Figura 32), que se encontra na mesma região C3, apresenta certa constância sazonal com taxas de ocorrência de não rampas ligeiramente maiores no inverno (JJA). Regiões C4 e C5 (Figuras 34-36) apresentam características similares, com um ciclo diurno de não-rampas bem definido, onde a menor frequência ocorre às 0900 UTC, aumentando para no máximo 20% nos demais horários do dia. O RegCM4 reproduz o padrão de ciclo diurno de não rampas mostrado para ERA5, tanto na identificação do mínimo como na frequência praticamente homogênea (menor que 20%) no restante do dia.

Segundo Gallego-Castillo *et al.* (2015), rampas de subida estão associadas com brisas marítimas, início de eventos de brisa de montanha, sistemas de baixa pressão e zonas frontais, enquanto que as rampas de descida estão mais associadas com frentes quentes e relaxamento após passagem de frentes frias.

Considerando os aspectos mencionados acima e observando as rampas de subida e descida que estão em subdomínios em áreas próximas à costa (C1, C2 e C3) e regiões continentais (C4 e C5), é notável a associação com as brisas terra-mar e vale-montanha. Áreas próximas ao oceano apresentam rampas de subida durante o dia onde a área terra adjacente ao mar apresenta formação de baixa pressão devido ao aumento de temperatura (aquecimento diurno) gerando um contraste ar-mar de temperatura e iniciando a circulação de brisa, que é observado para os horários a partir de 0900 UTC nesses domínios. Já as áreas continentais apresentam um padrão distinto, onde as rampas de subida se concentram apenas em 0900 UTC e possuem valores intermediários à noite, caracterizados pela influência de brisa montanha-vale. Esse resultado está em concordância com as avaliações feitas no Atlas Eólico da Bahia para áreas como Caetité, próxima a

Guanambi, bem como para as regiões de Xique-Xique e Sento Sé, próximas a Irecê e Petrolina.

Para a região C1 (Figuras 29-30) no verão e outono, podemos associar a influência da posição da ZCIT, que se desloca mais para sul em DJF (CAI *et al.*, 2020; Reboita *et al.*, 2010), e o aumento do gradiente de temperatura ocasionando na intensificação do contraste de temperatura terra-mar e da brisa oceânica, que aumenta a ocorrência de rampas de subida em outros horários (1200 e 1500 UTC).

As frentes frias vindas da região sul do país que chegam à Bahia, principalmente para Guanambi, que se encontra no sul do estado, podem contribuir com o aumento nas rampas de subida no inverno (Figura 20). Há também um aumento em Guanambi na frequência relativa de rampas de descida no inverno que seria referente à passagem das frentes (Figura 28).

Realizando uma avaliação mensal, podemos associar o aumento nas rampas de descida no segundo semestre do ano para as áreas mais tropicais com a posição da ZCIT, a qual se encontra em sua posição mais ao norte em JJA (CAI *et al.*, 2020).

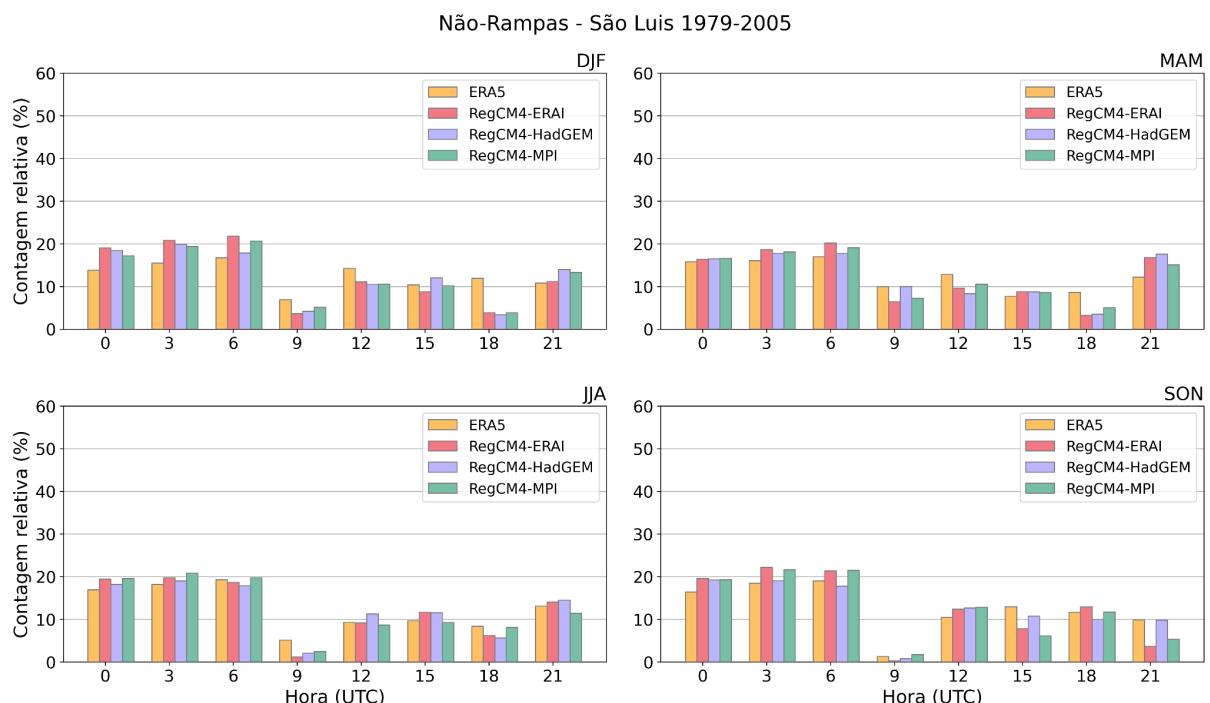


Figura 29 - Frequência relativa de não-rampas a cada 3h para o período de 1979-2005 para os dados da ERA5 (laranja), RegCM4-ERA1 (vermelho), RegCM4-HadGEM (azul) e RegCM4-MPI (verde) para São Luís.

### Não-Rampas - Parnaíba 1979-2005

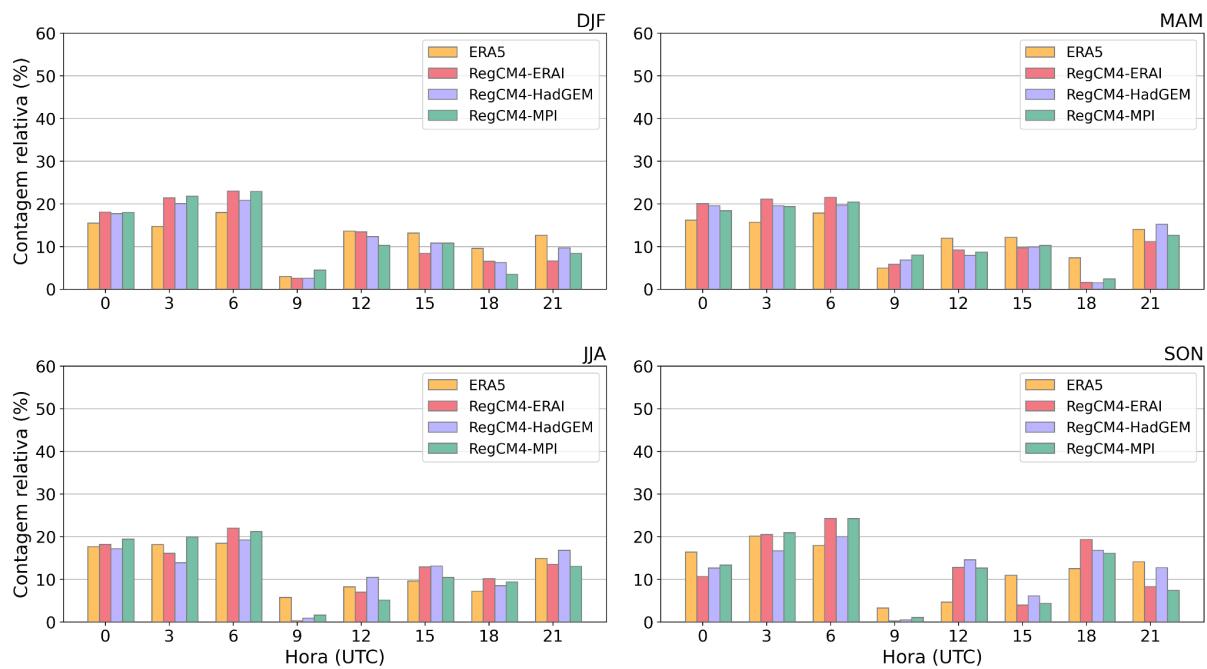


Figura 30 - Semelhante à Figura 29, para Parnaíba.

### Não-Rampas - Fortaleza 1979-2005

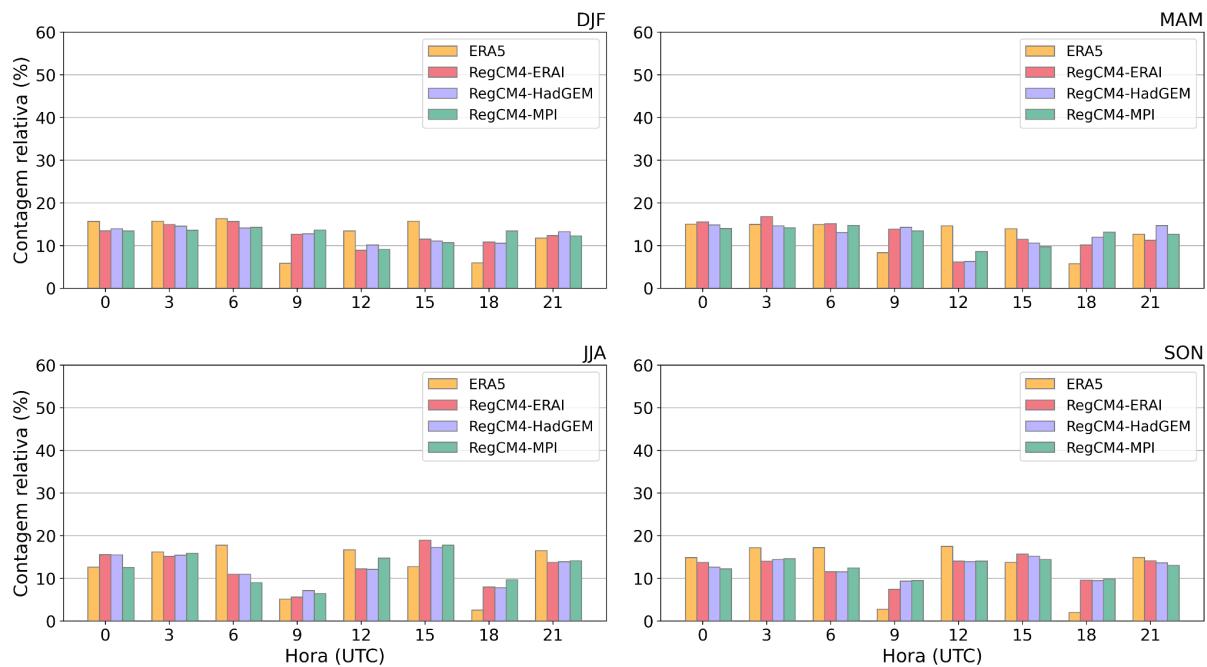


Figura 31 - Semelhante à Figura 29, para Fortaleza.

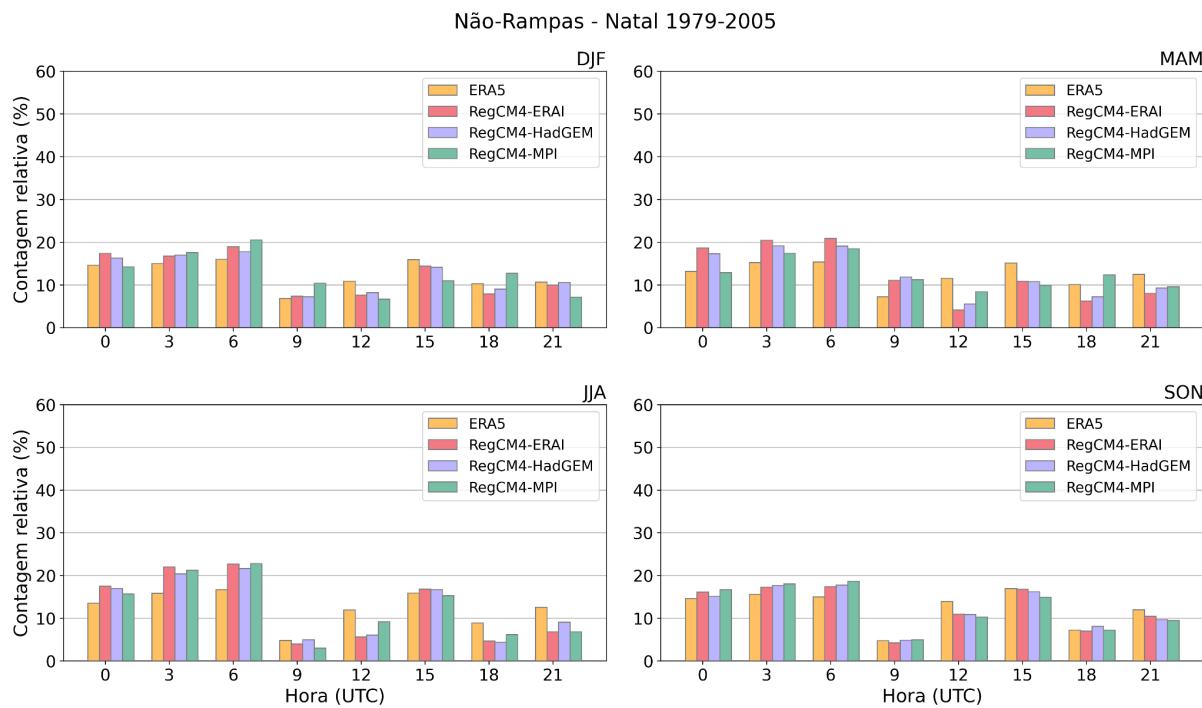


Figura 32 - Semelhante à Figura 29, para Natal.

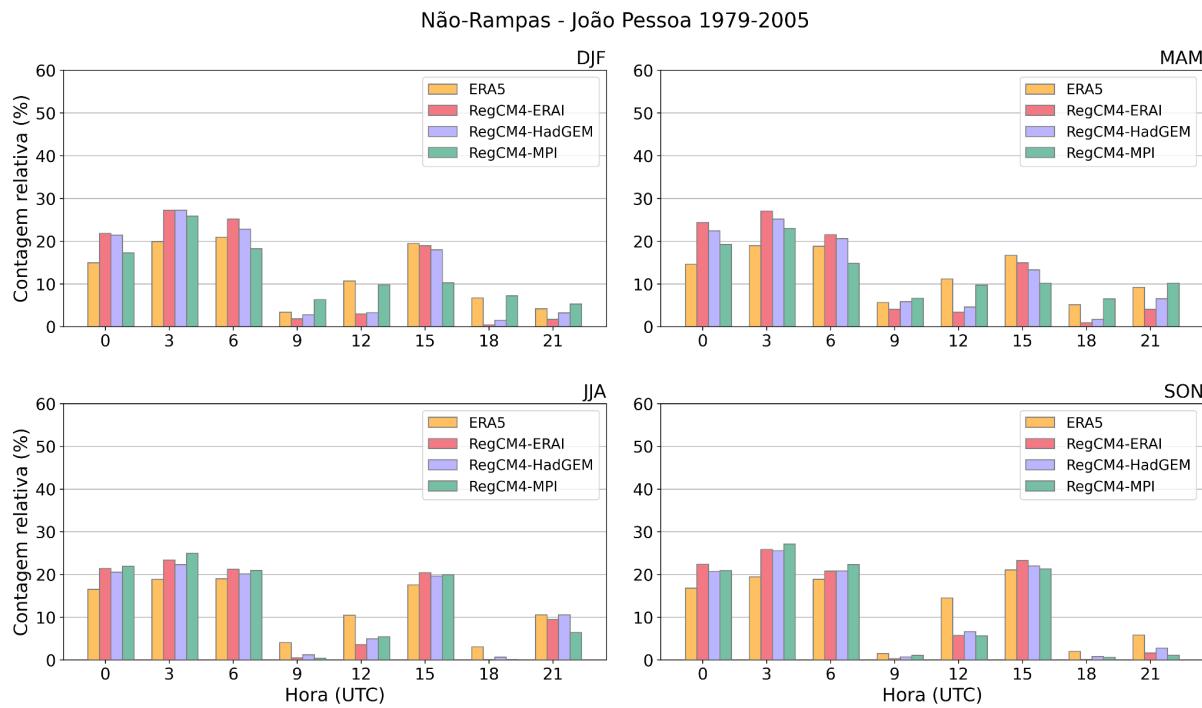


Figura 33 - Semelhante à Figura 29, para João Pessoa.

### Não-Rampas - Petrolina 1979-2005

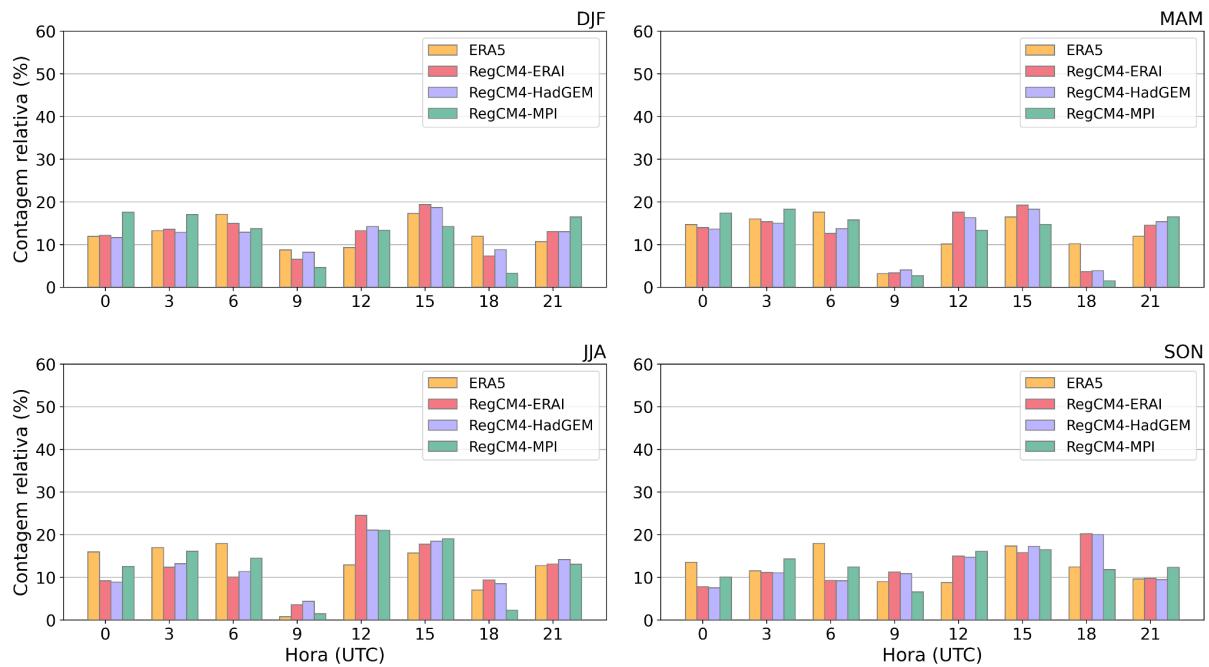


Figura 34 - Semelhante à Figura 29, para Petrolina.

### Não-Rampas - Irecê 1979-2005

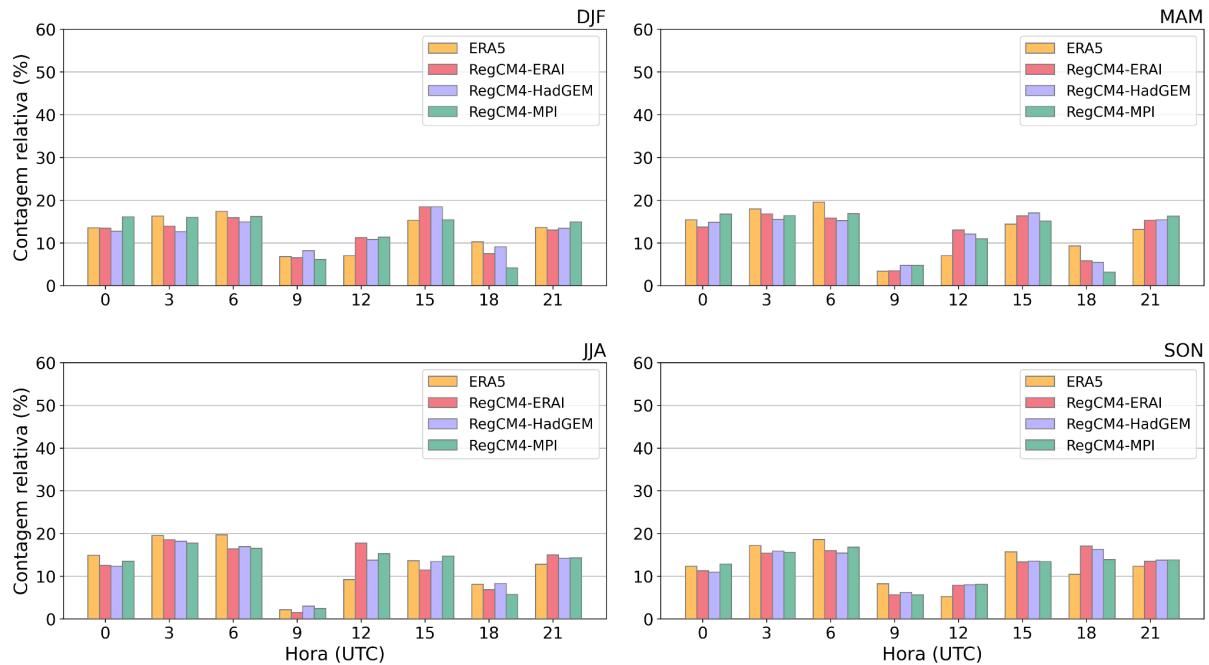


Figura 35 - Semelhante à Figura 29, para Irecê.

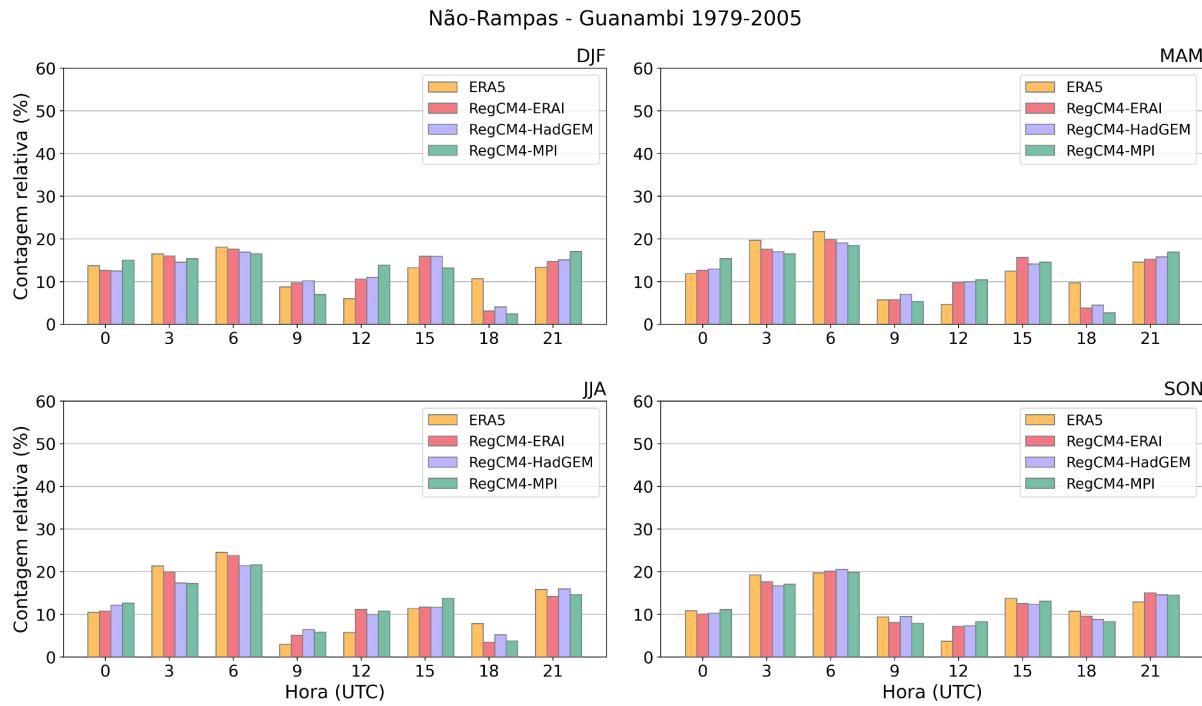


Figura 36 - Semelhante à Figura 29, para Guanambi.

#### 4.3.3 Permanência das rampas

Conforme ilustrado nas Figuras 37 a 44, investigou-se as distribuições de probabilidade intensidade das rampas em função do tempo de permanência (entre 3 e 12 h) para as rampas de subida para todos os conjuntos de dados: ERA5 (azul), RegCM4-ERA1 (laranja), RegCM4-HadGEM (verde) e RegCM4-MPI (vermelho). As análises foram conduzidas tanto para a estação chuvosa (DJF) quanto para a estação seca (JJA). Em alguns casos, observou-se a ausência de dados em 12 h, indicando que certas simulações não apresentaram rampas de subida com esse período de permanência.

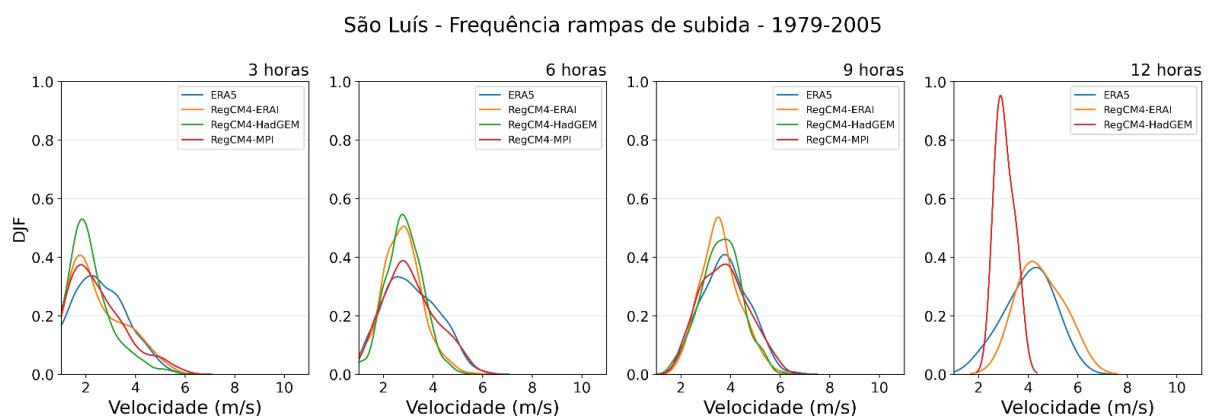
Na distribuição de probabilidade, verifica-se, de modo geral, uma maior concordância entre os conjuntos de dados durante a estação chuvosa (Figuras 37-44). Entretanto, na estação seca, a ERA5 apresenta uma distribuição com mediana menor que a do RegCM4, exceto para a estação de Petrolina.

Além disso, observa-se que as rampas de mesma duração (de 3 a 12 h), mas para as diferentes localidades, são mais frequentes durante a estação seca do que na chuvosa (Figuras 37-44). Já durante a estação chuvosa, a distribuição de probabilidade frequentemente exibe uma cauda alongada para a direita, sugerindo a presença de valores atípicos ou eventos extremos de rampa de subida ocorrendo

com menor frequência. A ausência ou forte discrepância entre as distribuições de probabilidade das ERA5 e simulações do RegCM4 devem-se à: a) as simulações nem sempre apresentam rampas de subida com durações mais longas (9-12 horas); b) ou simulam um número pequeno de rampas de subida, resultando em distribuições muito diferentes.

No que diz respeito às rampas de descida apresentadas nas Figuras 45-52, nota-se uma semelhança no padrão da densidade de probabilidade quando se avalia cada localidade em comparação com as rampas de subida. Contudo, é importante notar que as rampas de descida apresentam intensidade de vento inferiores aos observados nas rampas de subida, ou seja, apresentam uma distribuição com deslocamento para a esquerda. Em geral, não foi identificado um padrão regional considerando uma análise por subdomínios (indicados na Figura 4). A falta de concordância espacial entre as estações do ano para as diferentes localidades indica que a ERA5 e o RegCM4 podem estar capturando aspectos diferentes associados com a topologia da região.

As Figuras 53-60 mostram os períodos sem rampas. Nota-se que os intervalos de não-rampa exibem um padrão semelhante em cada localidade ao comparar os mesmos períodos com a distribuição da intensidade dos ventos nas rampas de subida (Figuras 37-44). No entanto, a distribuição apresenta uma maior amplitude entre os valores, resultando em densidades de probabilidade mais baixas. Não-rampas também apresentam para alguns locais, principalmente subdomínios C4-C5, valores próximos à zero na intensidade dos ventos com alto valor de densidade. Esse aspecto ilustra novamente a influência de características intrinsecamente ligadas ao relevo.



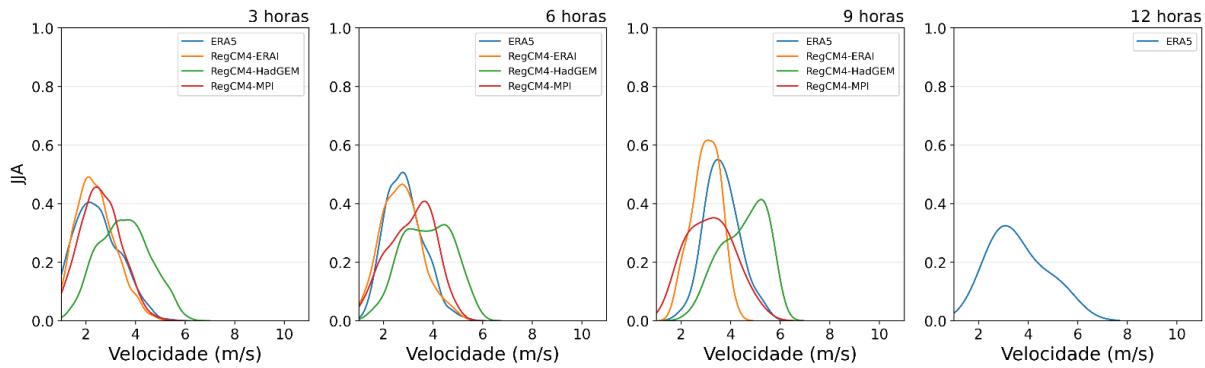


Figura 37 - Função densidade de probabilidade de frequência de intensidade (m/s) de rampas de subida para diferentes tempos de permanência (3, 6, 9, e 12 horas) para São Luís no período de DJF (cima) e JJA (abaixo).

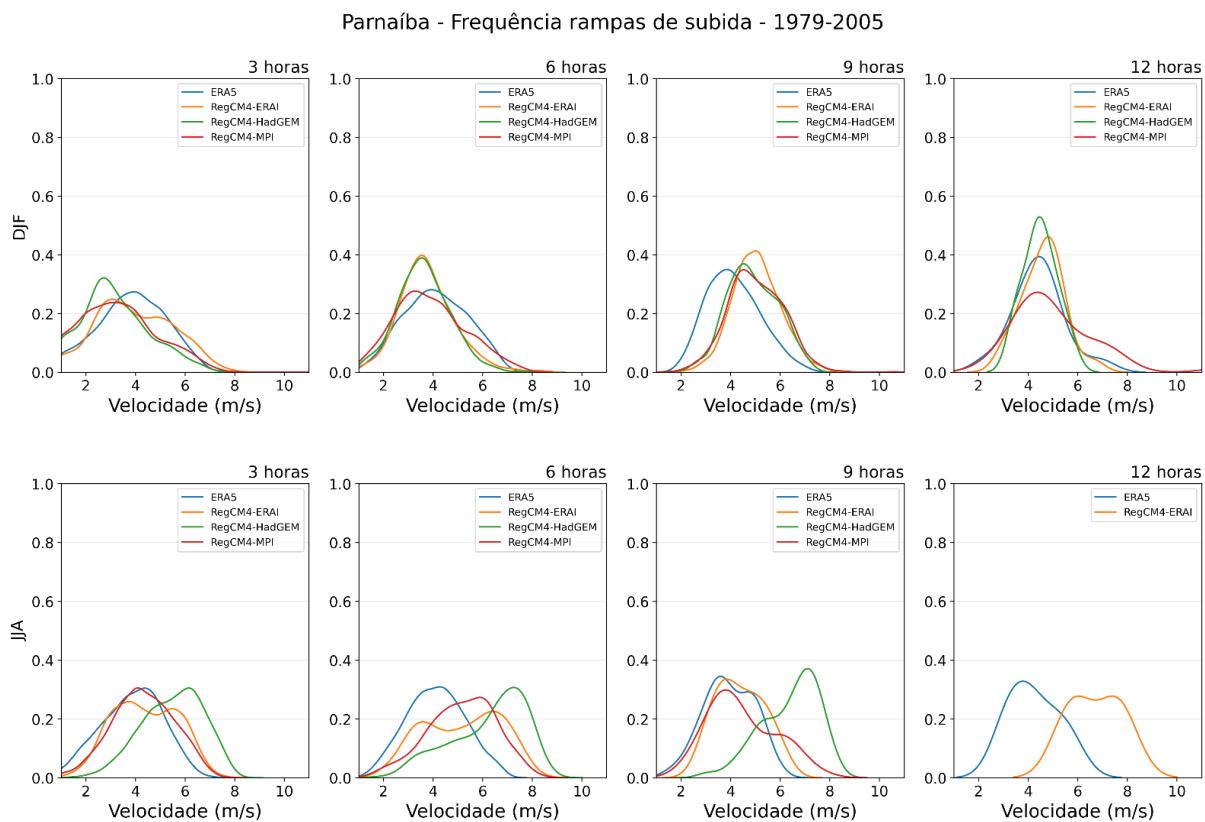


Figura 38 - Semelhante à Figura 37 para Parnaíba.

Fortaleza - Frequência rampas de subida - 1979-2005

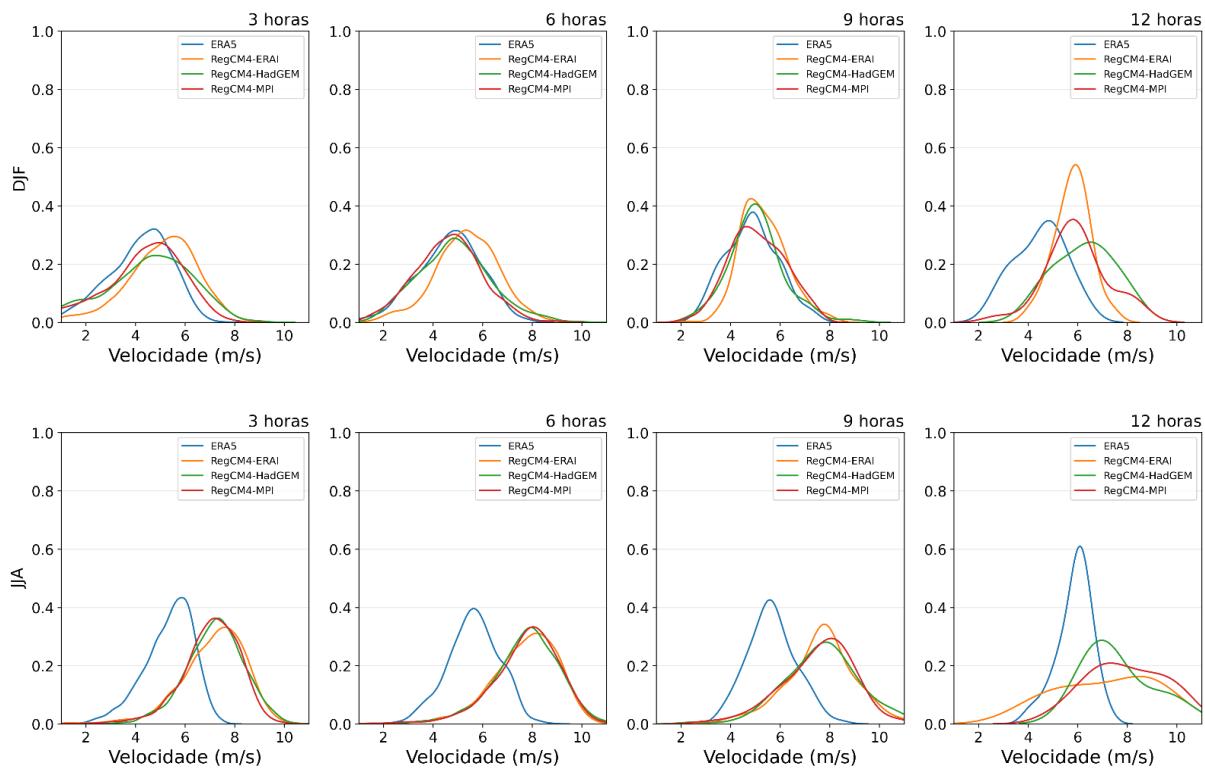


Figura 39 - Semelhante à Figura 37 para Fortaleza.

Natal - Frequência rampas de subida - 1979-2005

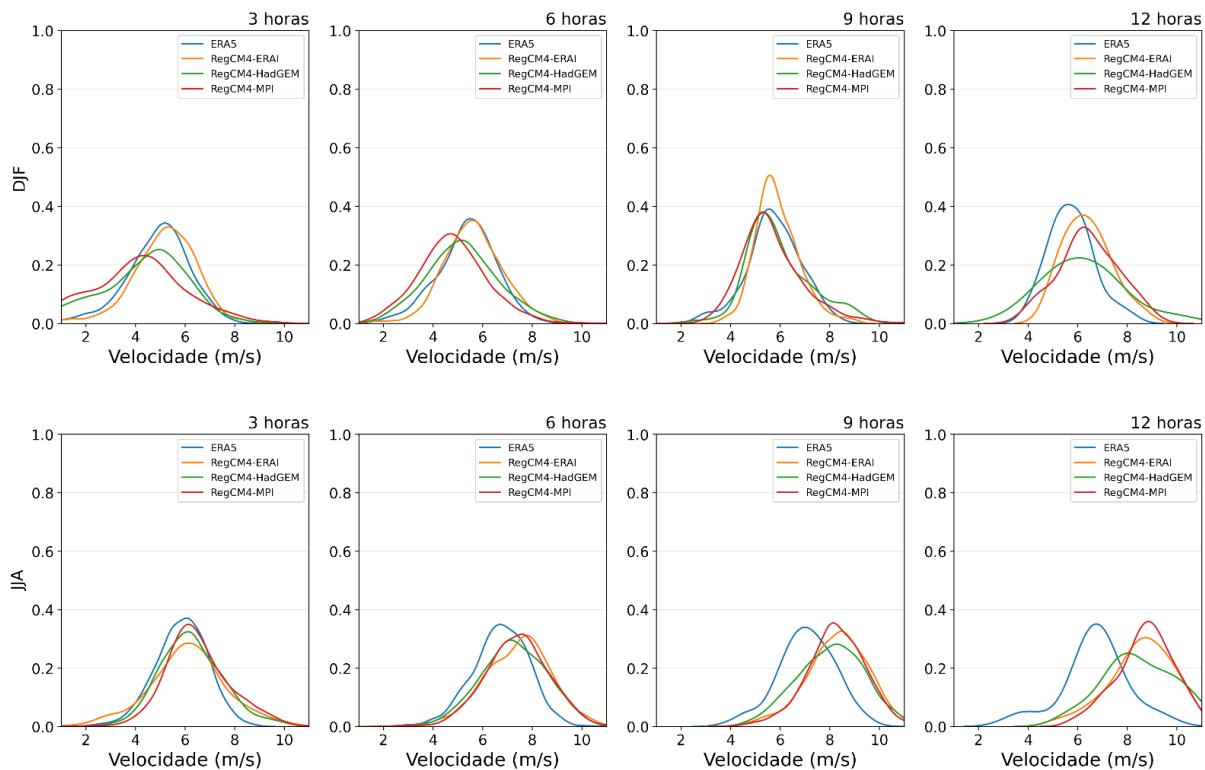


Figura 40 - Semelhante à Figura 37 para Natal.

### João Pessoa - Frequência rampas de subida - 1979-2005

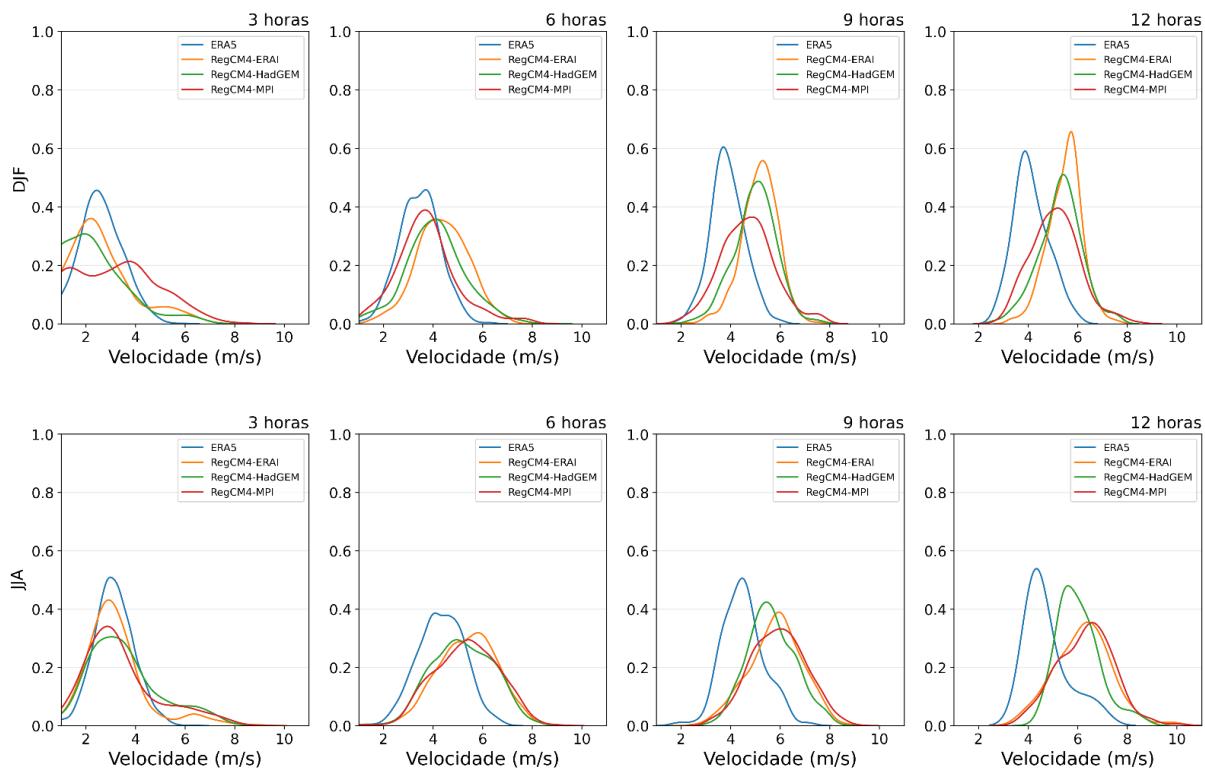


Figura 41 - Semelhante à Figura 37 para João Pessoa.

### Petrolina - Frequência rampas de subida - 1979-2005

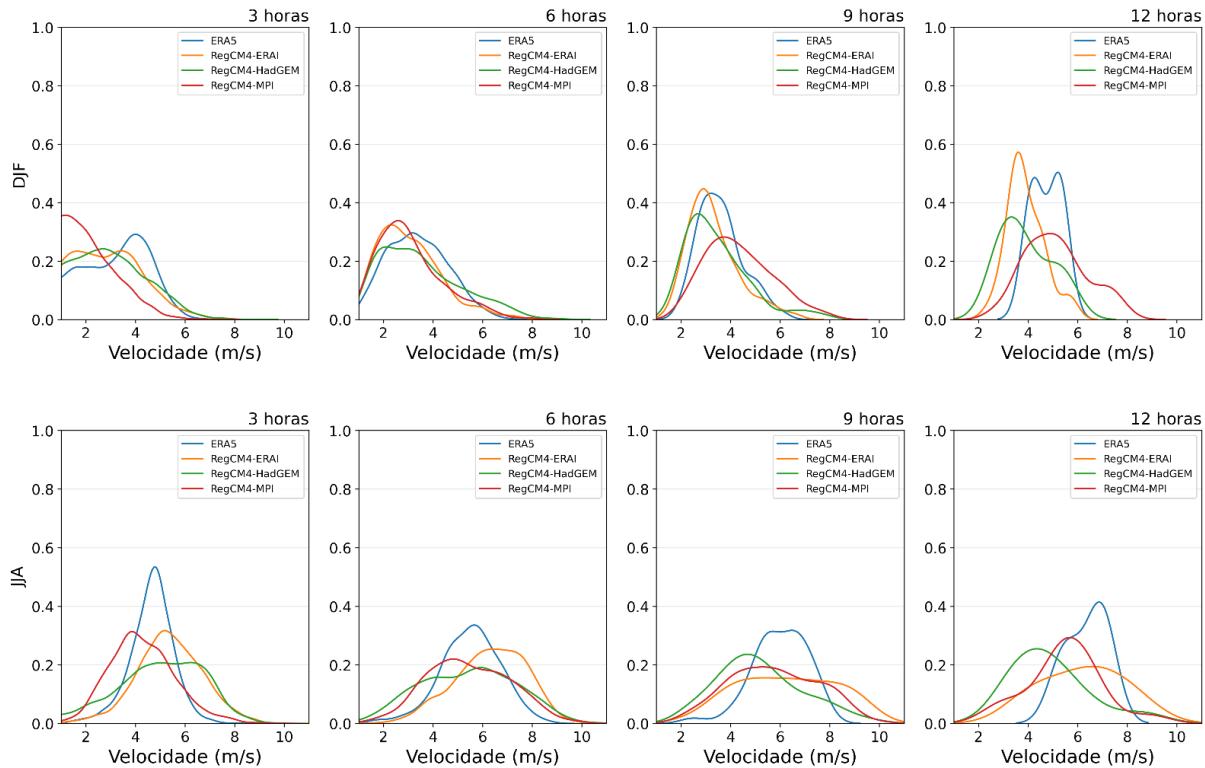


Figura 42 - Semelhante à Figura 37 para Petrolina.

### Irecê - Frequência rampas de subida - 1979-2005

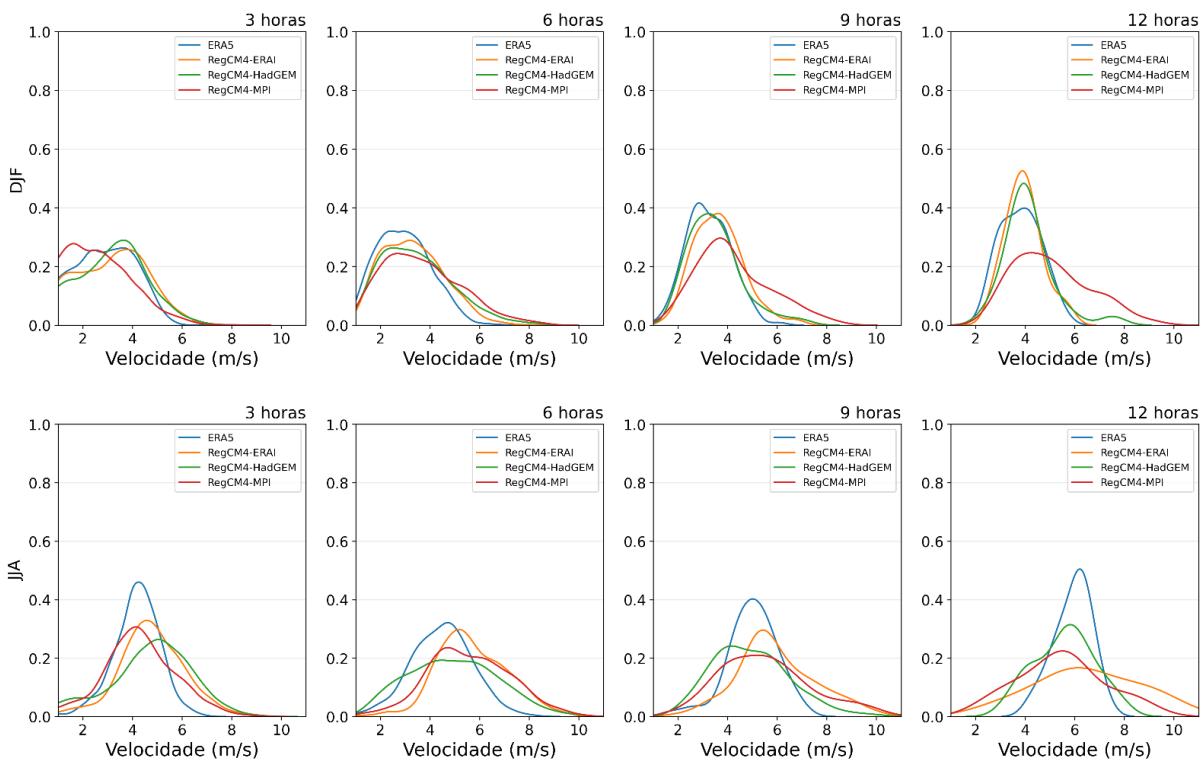


Figura 43 - Semelhante à Figura 37 para Irecê.

### Guanambi - Frequência rampas de subida - 1979-2005

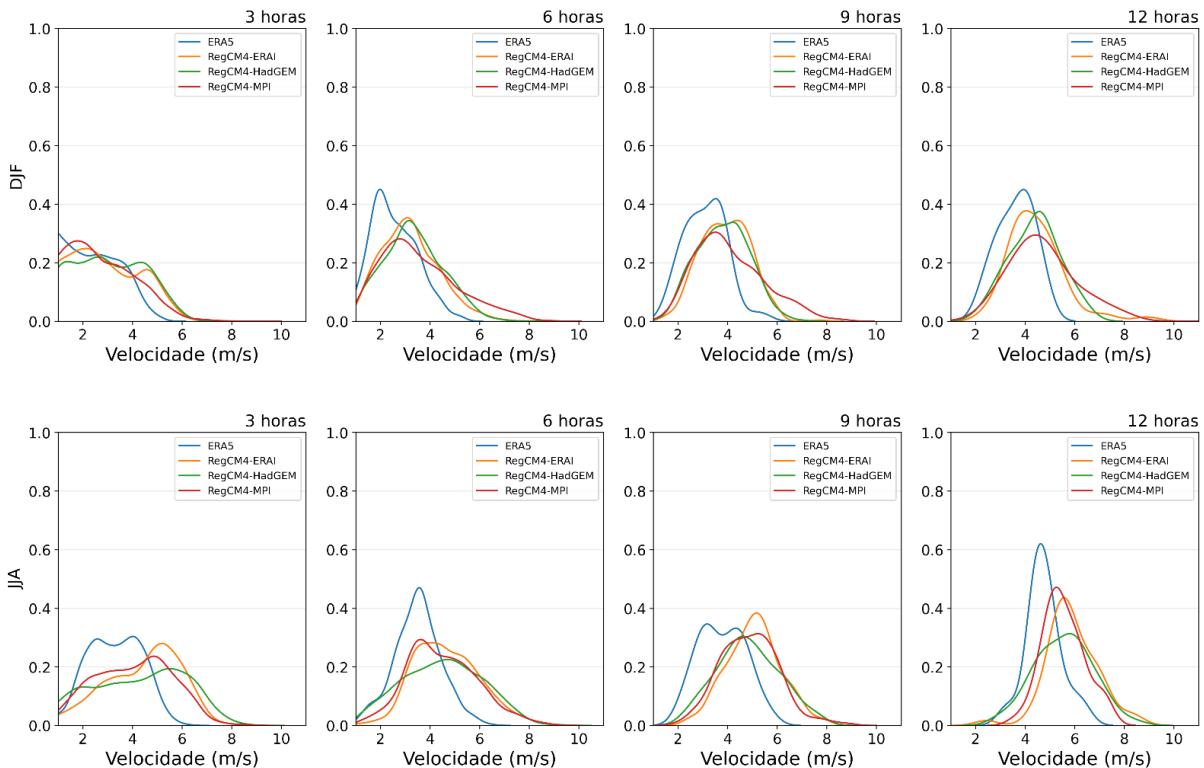


Figura 44 - Semelhante à Figura 37 para Guanambi.

### São Luís - Frequência rampas de descida - 1979-2005

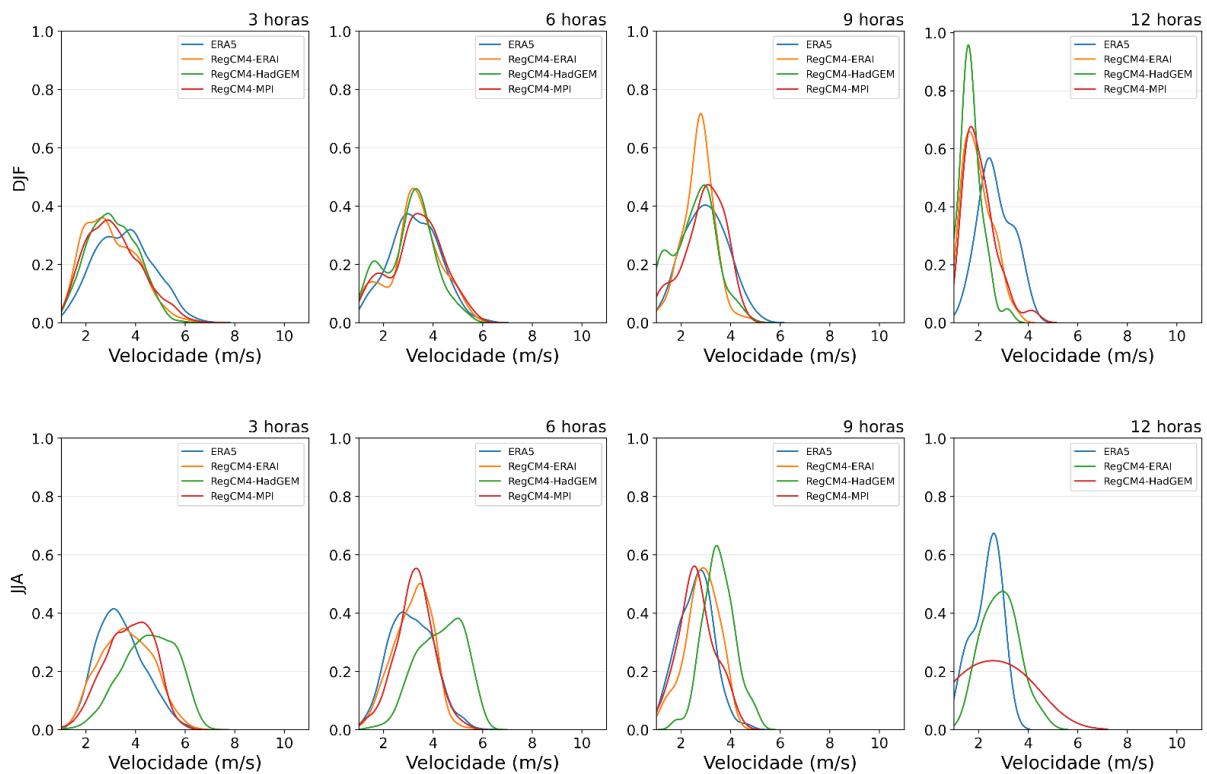


Figura 45 - Função densidade de probabilidade de frequência na permanência de rampas de descida para São Luís no período de DJF (cima) e JJA (abaixo).

### Parnaíba - Frequência rampas de descida - 1979-2005

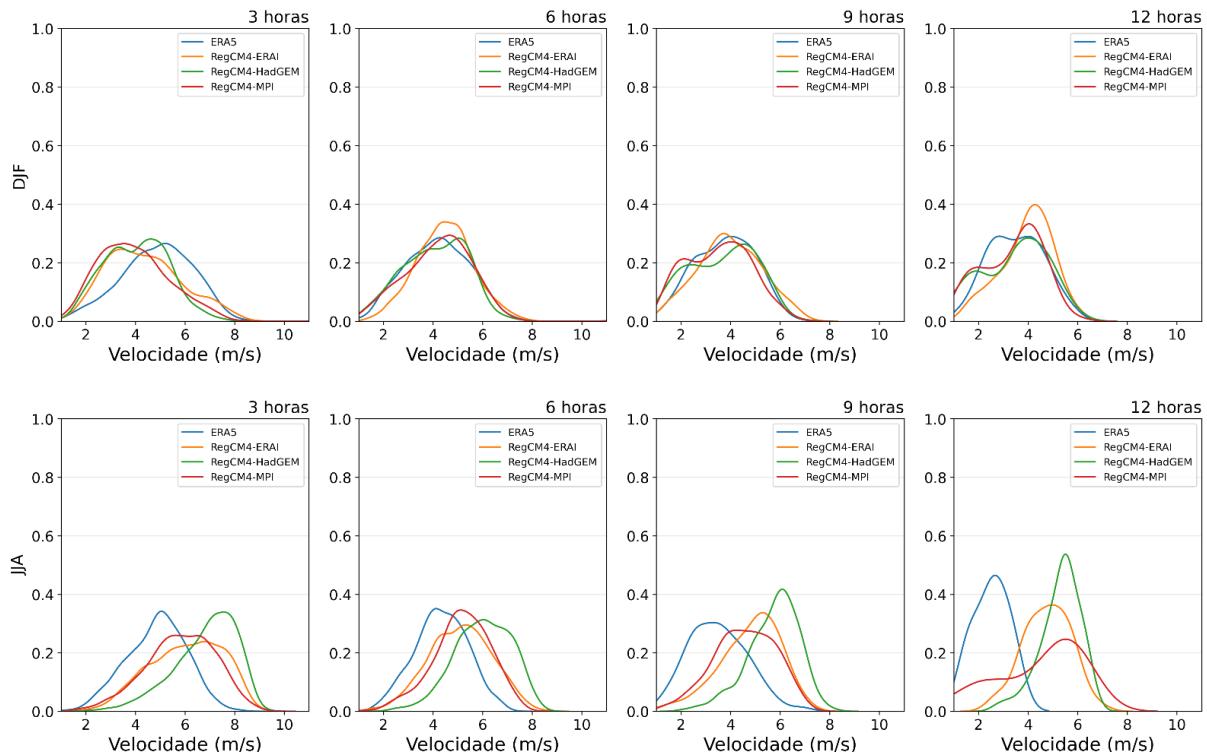


Figura 46 - Semelhante à Figura 45 para Parnaíba.

### Fortaleza - Frequênciamp;as de descida - 1979-2005

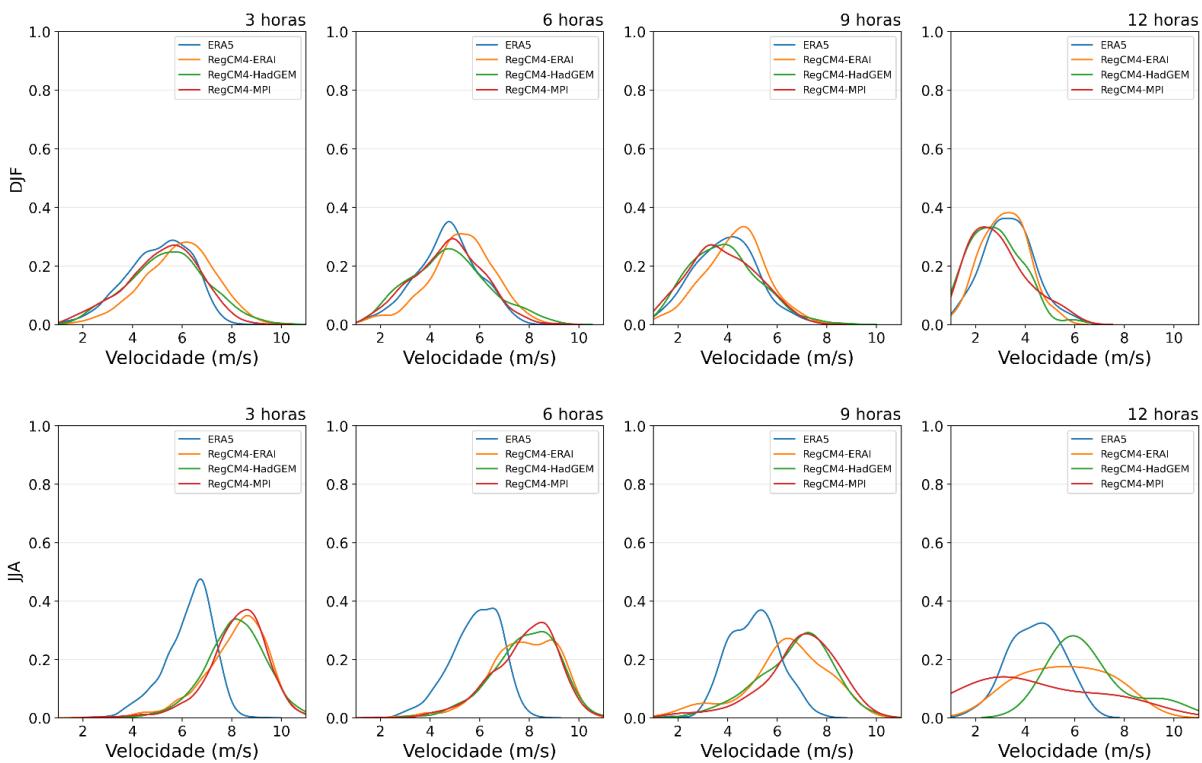


Figura 47 - Semelhante à Figura 45 para Fortaleza.

### Natal - Frequênciamp;as de descida - 1979-2005

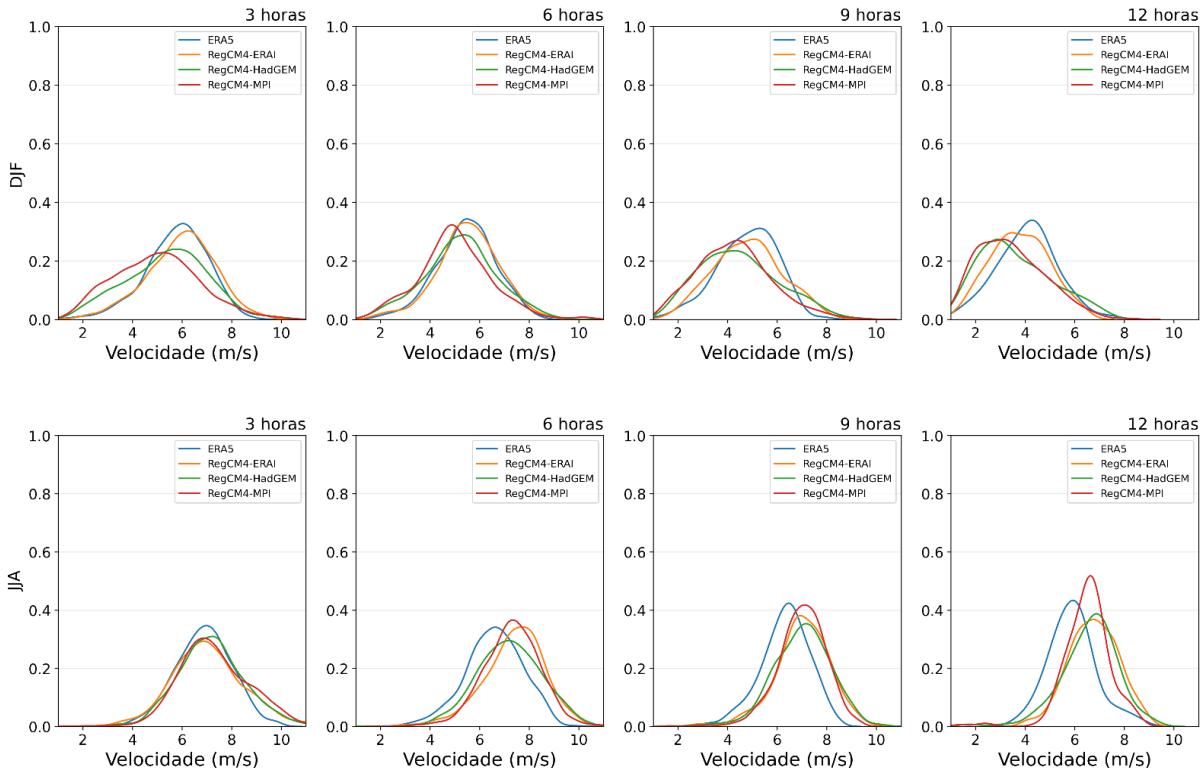


Figura 48 - Semelhante à Figura 45 para Natal.

### João Pessoa - Frequência rampas de descida - 1979-2005

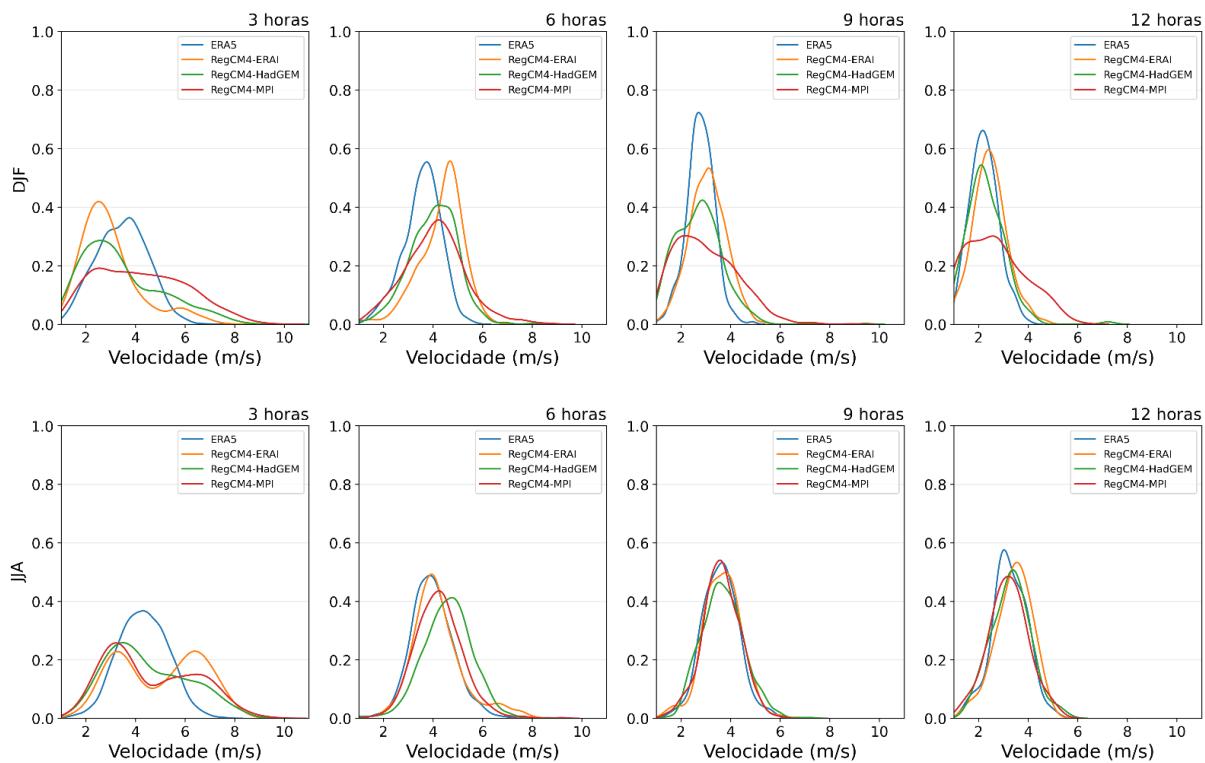


Figura 49 - Semelhante à Figura 45 para João Pessoa.

### Petrolina - Frequência rampas de descida - 1979-2005

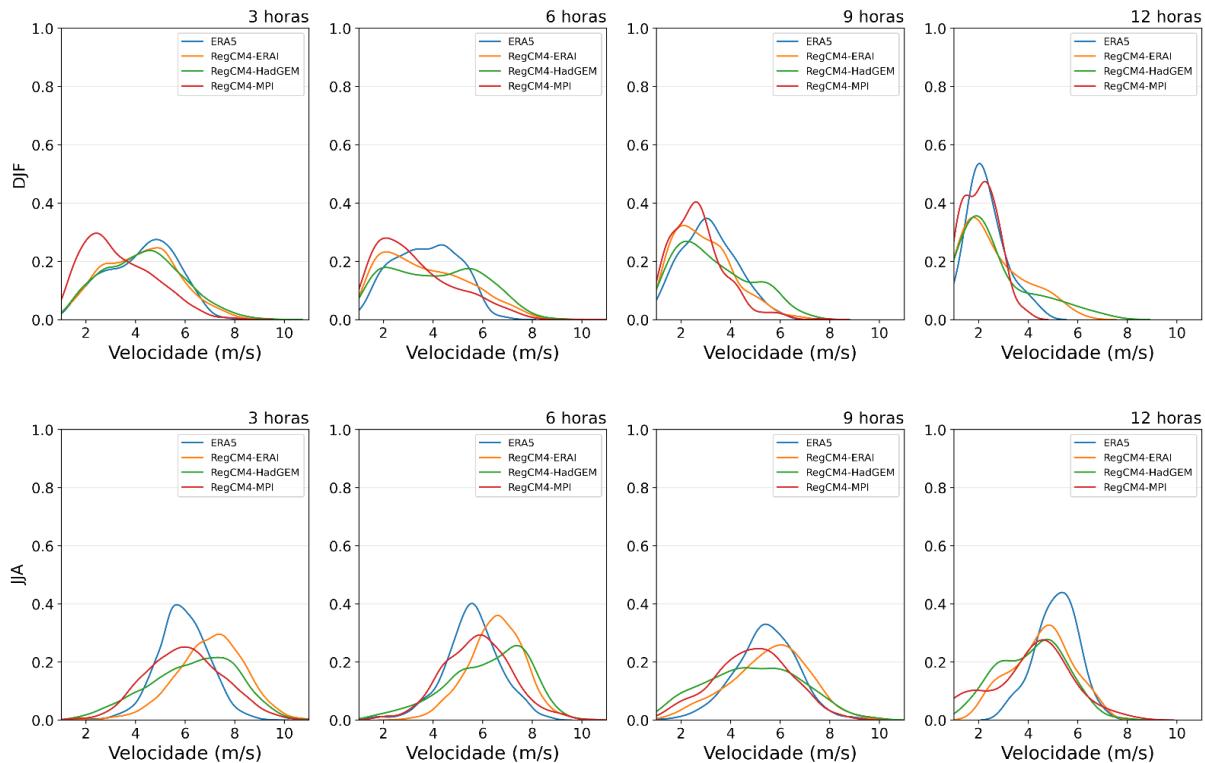


Figura 50 - Semelhante à Figura 45 para Petrolina.

### Irecê - Frequência rampas de descida - 1979-2005

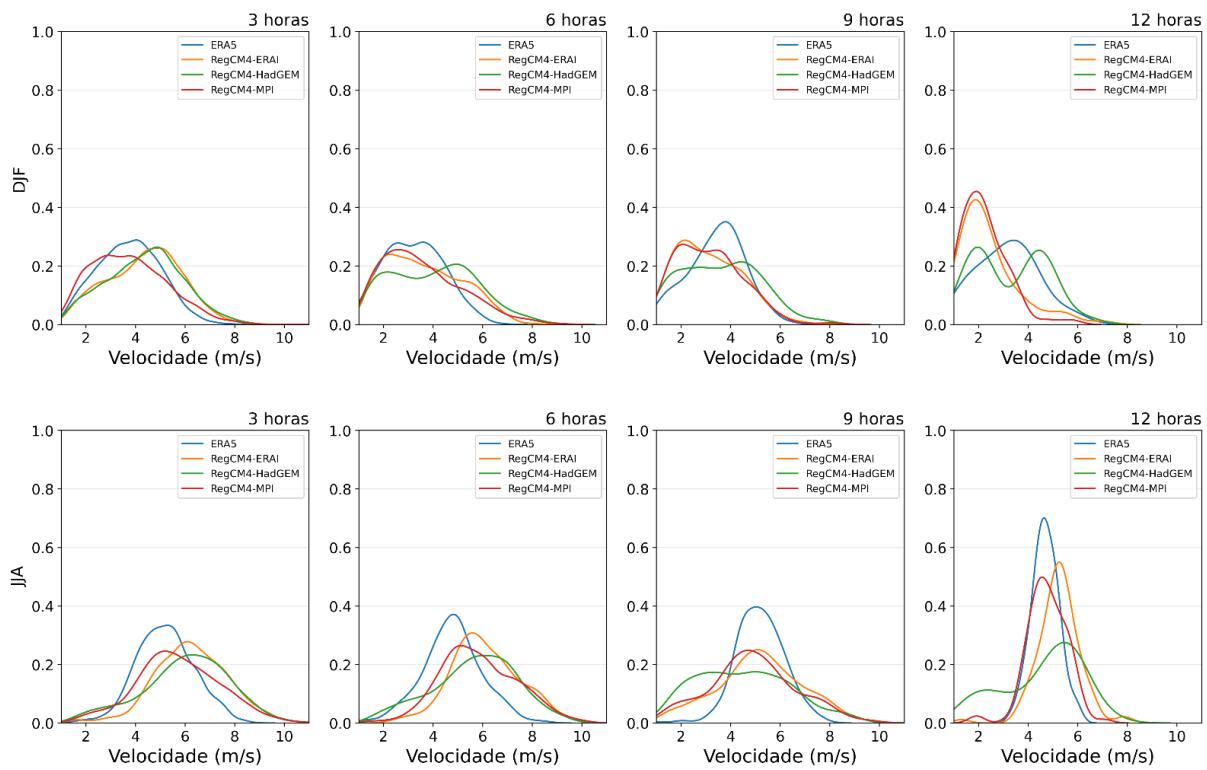


Figura 51 - Semelhante à Figura 45 para Irecê.

### Guanambi - Frequência rampas de descida - 1979-2005

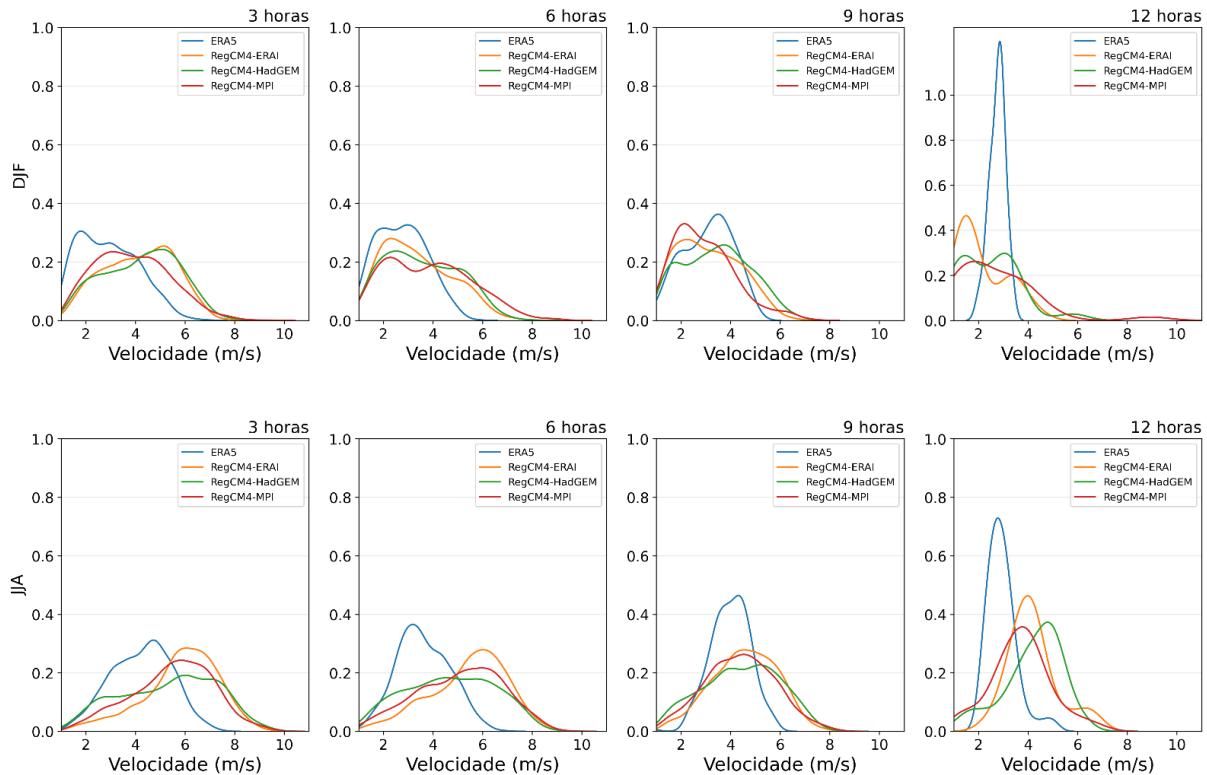


Figura 52 - Semelhante à Figura 45 para Guanambi.

### São Luís - Frequência não-rampas - 1979-2005

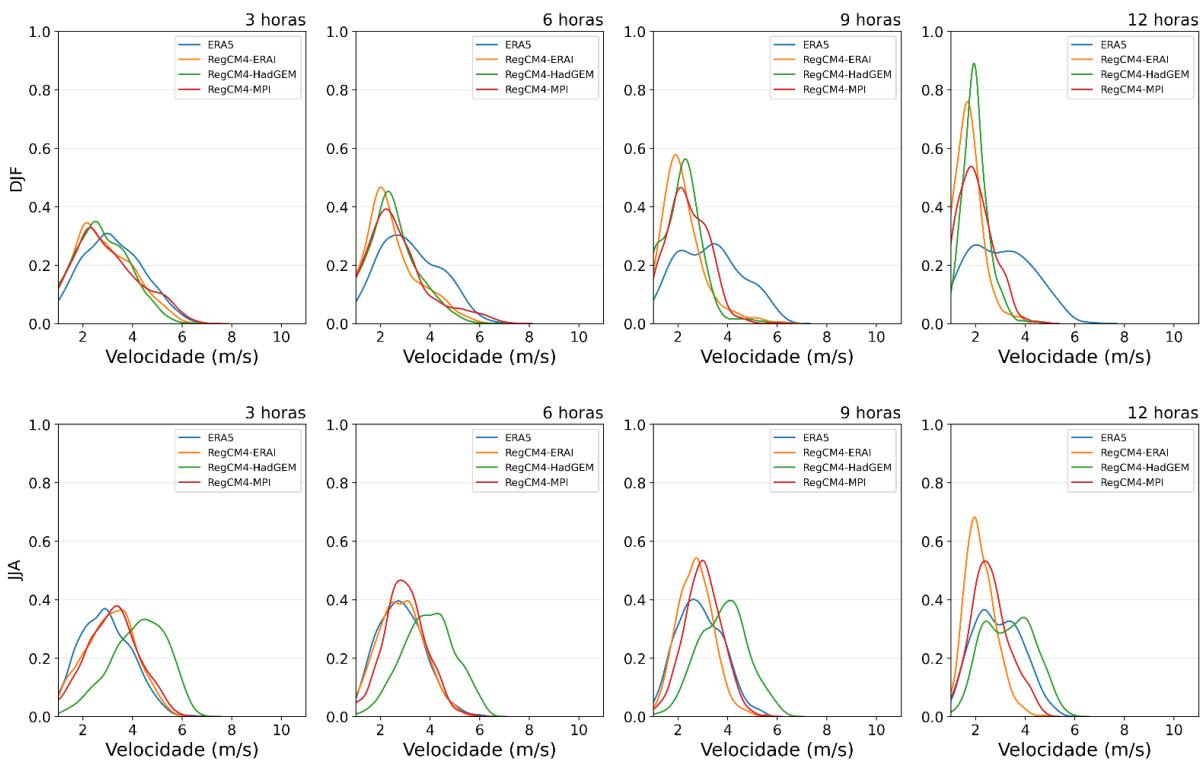


Figura 53 - Função densidade de probabilidade de frequência na permanência de não-rampas para São Luís no período de DJF (cima) e JJA (abaixo).

### Parnaíba - Frequência não-rampas - 1979-2005

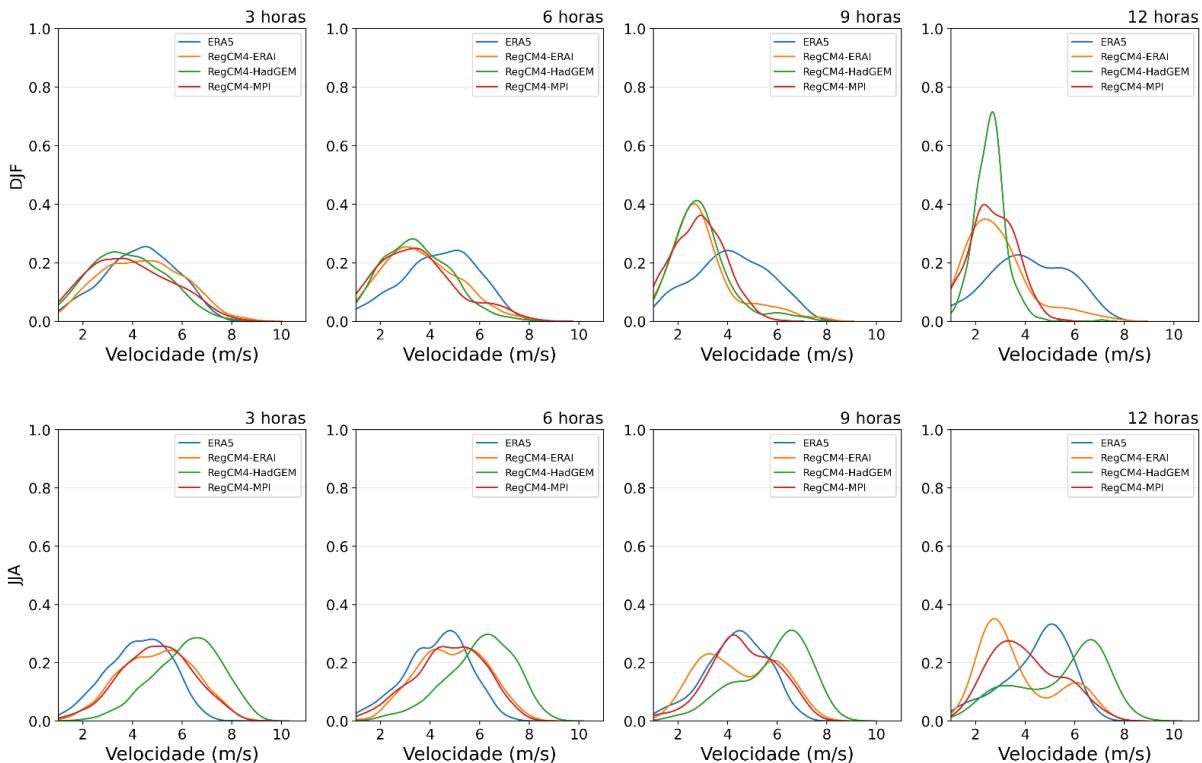


Figura 54 - Semelhante à Figura 53 para Parnaíba.

### Fortaleza - Frequência não-rampas - 1979-2005

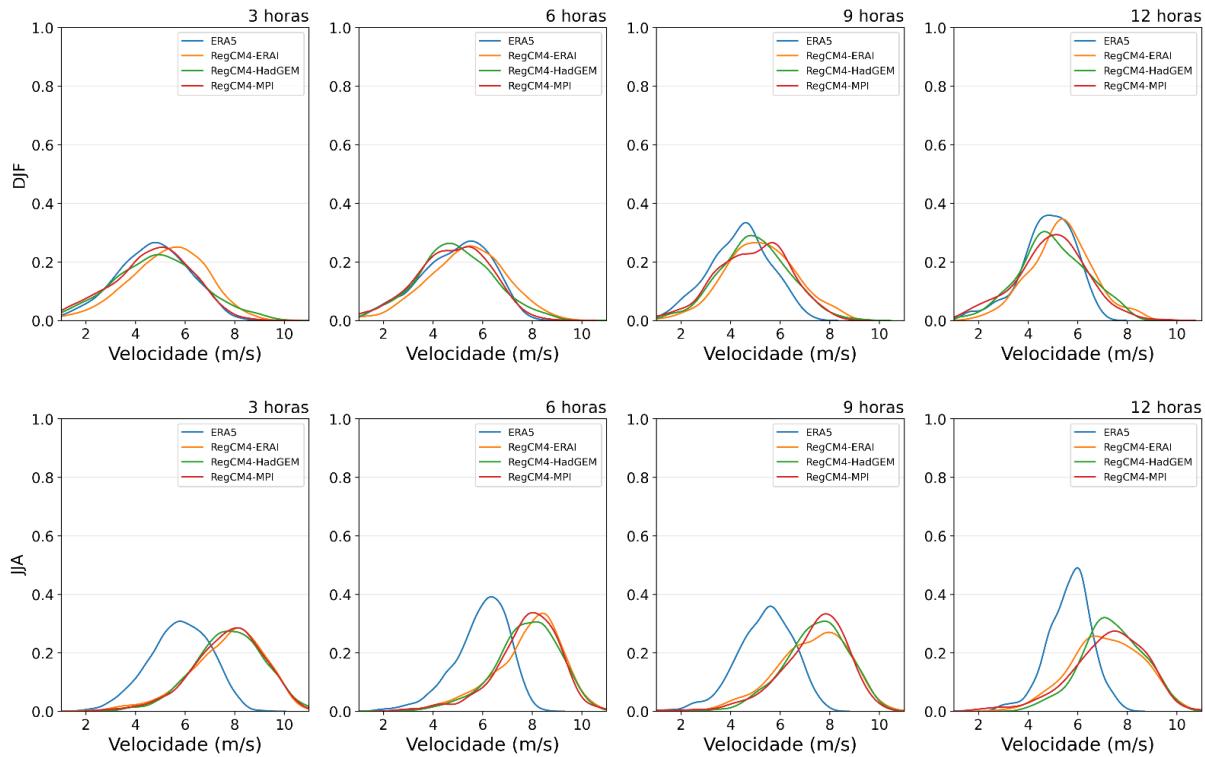


Figura 55 - Semelhante à Figura 53 para Fortaleza.

### Natal - Frequência não-rampas - 1979-2005

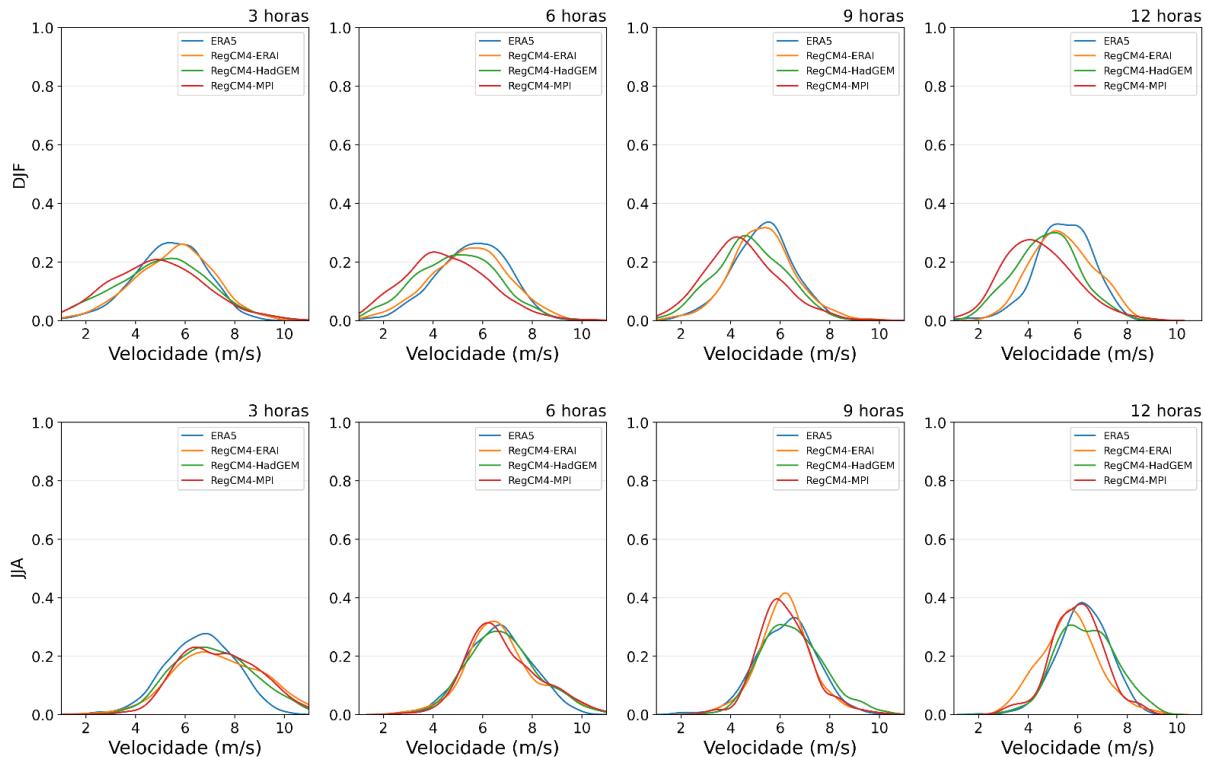


Figura 56 - Semelhante à Figura 53 para Natal.

### João Pessoa - Frequência não-rampas - 1979-2005

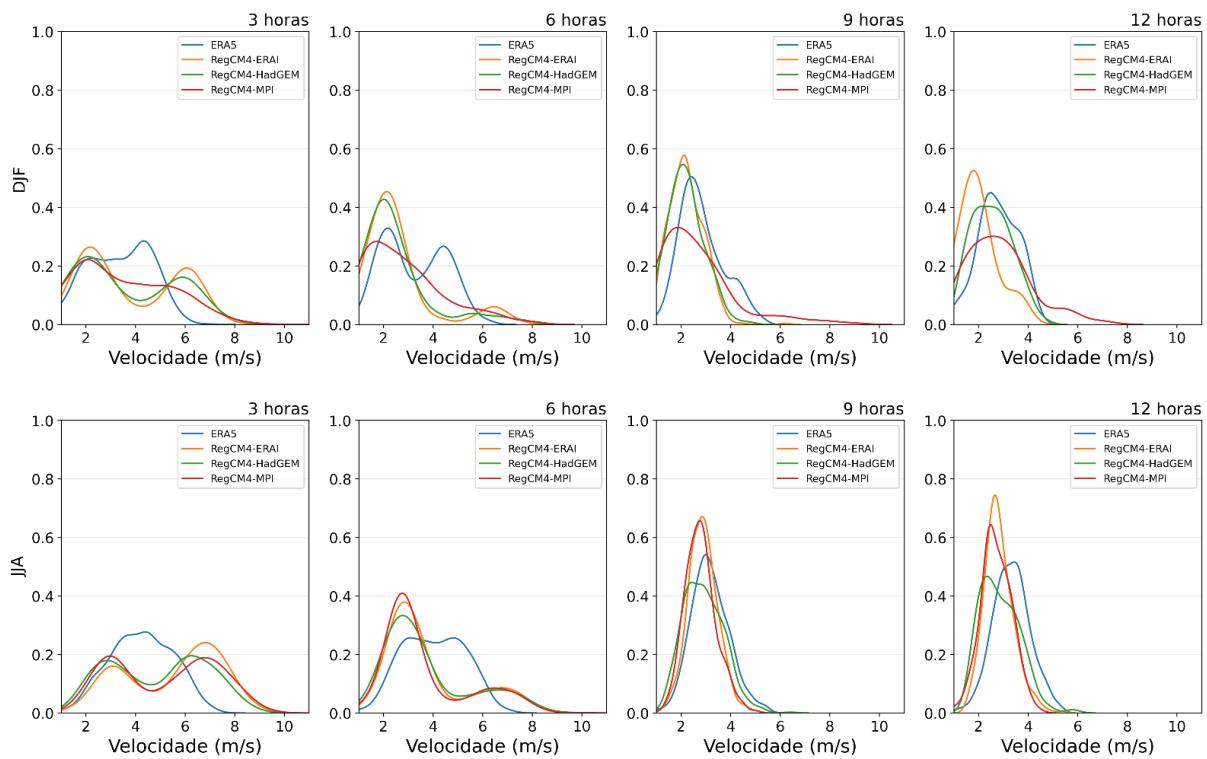


Figura 57 - Semelhante à Figura 53 para João Pessoa.

### Petrolina - Frequência não-rampas - 1979-2005

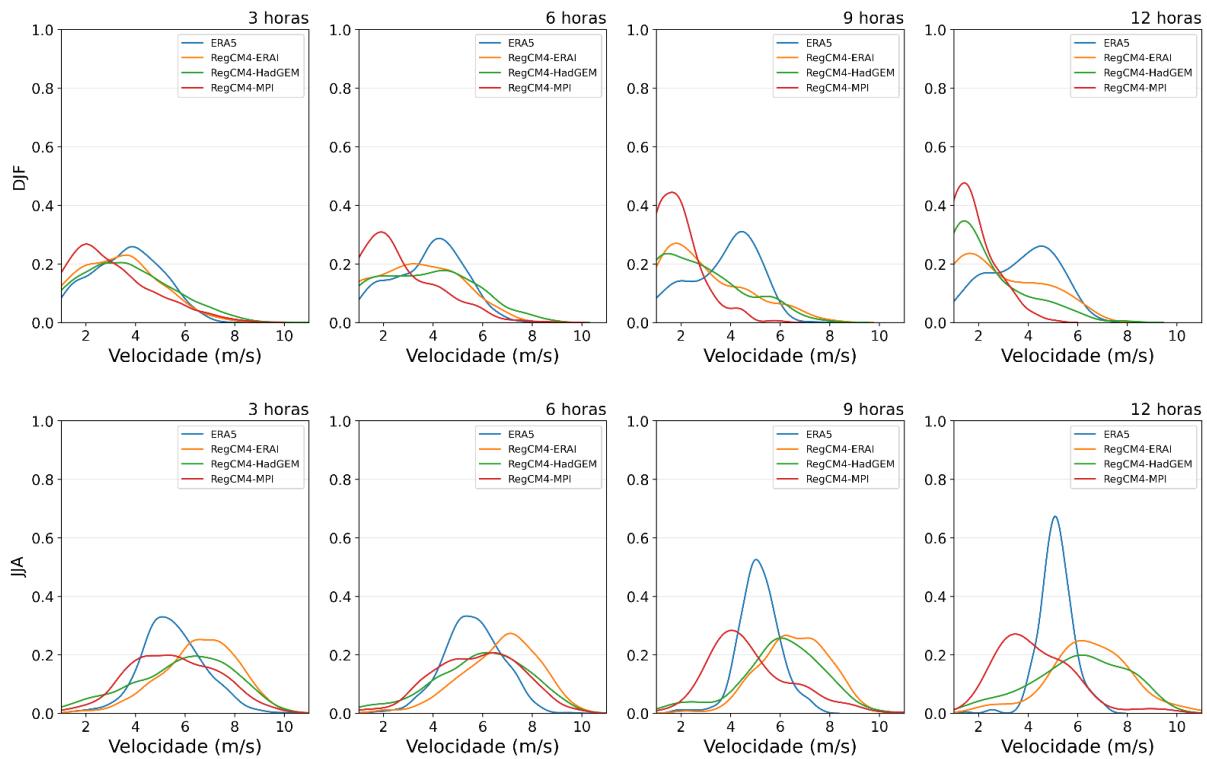


Figura 58 - Semelhante à Figura 53 para Petrolina.

### Irecê - Frequência não-rampas - 1979-2005

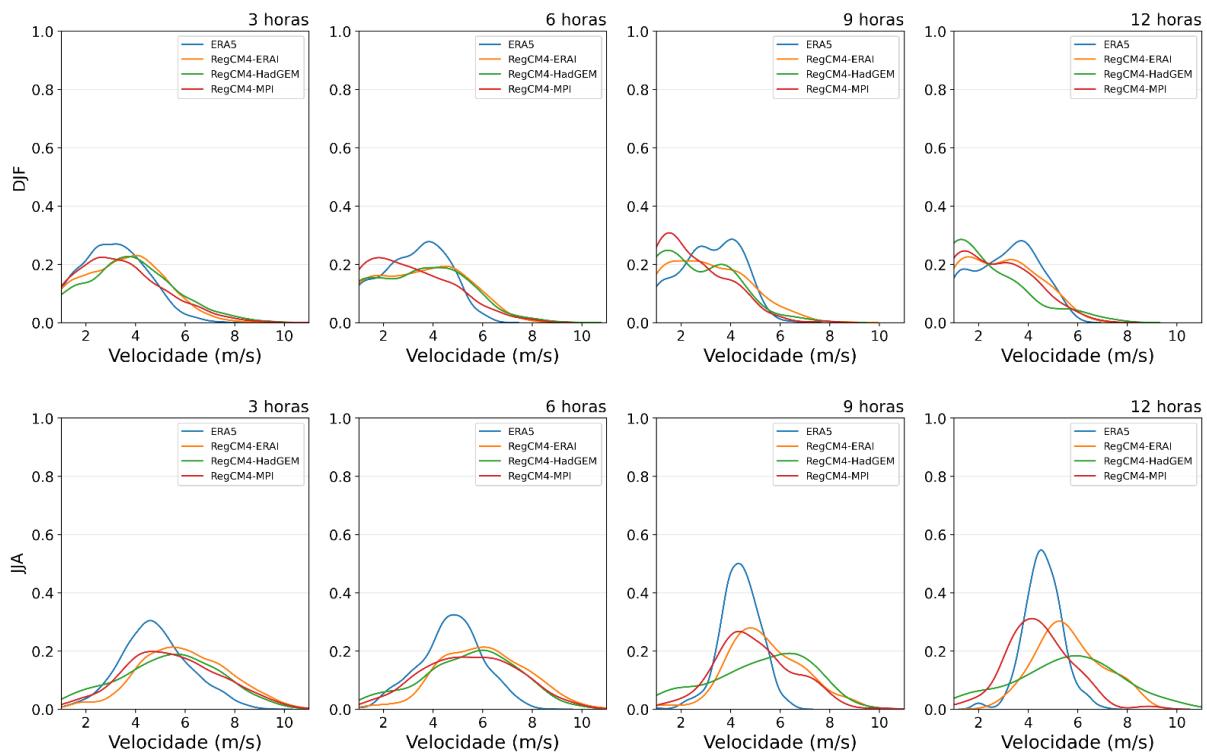


Figura 59 - Semelhante à Figura 53 para Irecê.

### Guanambi - Frequência não-rampas - 1979-2005

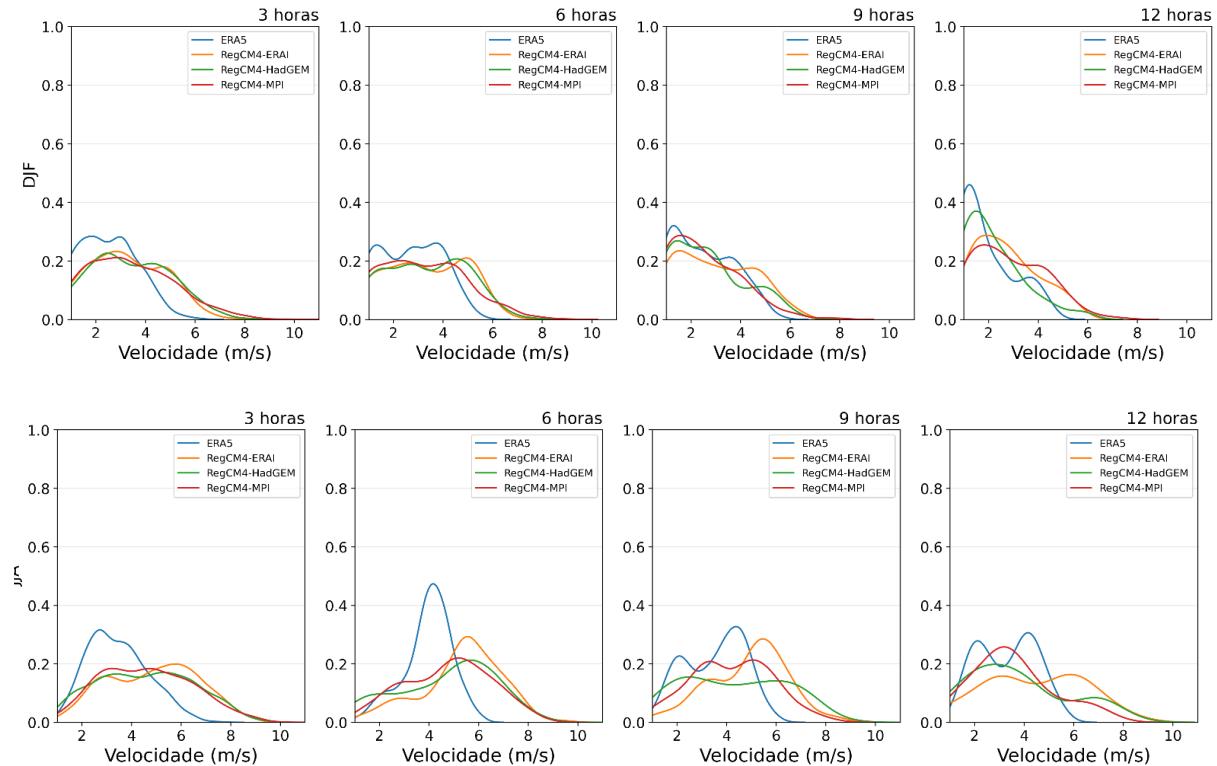


Figura 60 - Semelhante à Figura 53 para Guanambi.

#### 4.4 TENDÊNCIAS FUTURAS

Nas Figuras 61 e 62 são apresentados as tendências dos campos sazonais de extremos (P90%) de vento a 10 m para as simulações RegCM4-HadGEM (esquerda) e RegCM4-MPI (direita) para os períodos de futuro próximo (2040-2059) e futuro distante (2080-2099), respectivamente, em relação ao presente (1995-2014). Para o RegCM4-HadGEM (Figura 61), só há a verificação de tendência positiva (acima de 0,5 m/s) dos ventos *onshore*, ou seja, ventos localizados no continente, para o outono na região que abrange o Rio Grande do Norte. No entanto, para o futuro distante (Figura 62) observa-se tendência negativa da magnitude do vento durante o verão para áreas do Ceará, Piauí, Maranhão e uma pequena porção na parte leste do estado embaixo do Rio Grande do Norte. Para a estação de inverno há uma pequena tendência positiva encontrada na região litorânea entre Rio Grande do Norte e Paraíba. A tendência positiva mais significativa é encontrada na primavera na maior parte da região sul do estado da Bahia, sudoeste do Piauí e regiões sul e central do Maranhão.

Para o RegCM4-MPI, apesar de haver tendência dos ventos no oceano, no futuro próximo (Figura 61) existe tendência positiva para uma pequena porção litorânea no Maranhão para o outono. Já para o final do século (Figura 62), a tendência positiva se intensifica na região entre as latitudes 5°S-15°S para o verão e primavera, enquanto que no inverno e primavera uma tendência positiva é mais evidente na porção em torno da linha do Equador (0°). No continente, o inverno é a estação que não possui tendência considerável, sendo que para o verão e outono a tendência positiva é encontrada na porção norte do NEB e na primavera a tendência positiva aparenta estar mais distribuída sobre toda a região com alguns pontos na Bahia.

Os resultados indicam que, em geral, o RegCM4 forçado por ambos modelos globais apresenta pouca variação na tendência para 2040-2059, ou seja, indicando padrão espacial futuro semelhante em relação à referência. No entanto, as tendências mostram mudanças mais significativas entre as duas simulações para 2080-2099, exceto no que diz respeito ao inverno. Embora as alterações observadas no futuro distante sejam, em grande parte, em torno de apenas +- 0,5 m/s, torna-se relevante considerar seu impacto na produção de energia, já que esta é influenciada pelo valor da intensidade ao cubo. Assim, mesmo pequenas variações podem adquirir relevância prática nesse contexto. Portanto, compreender

e antecipar essas mudanças é de suma importância para o planejamento e tomada de decisões nas áreas afetadas pela geração e utilização de energia eólica.

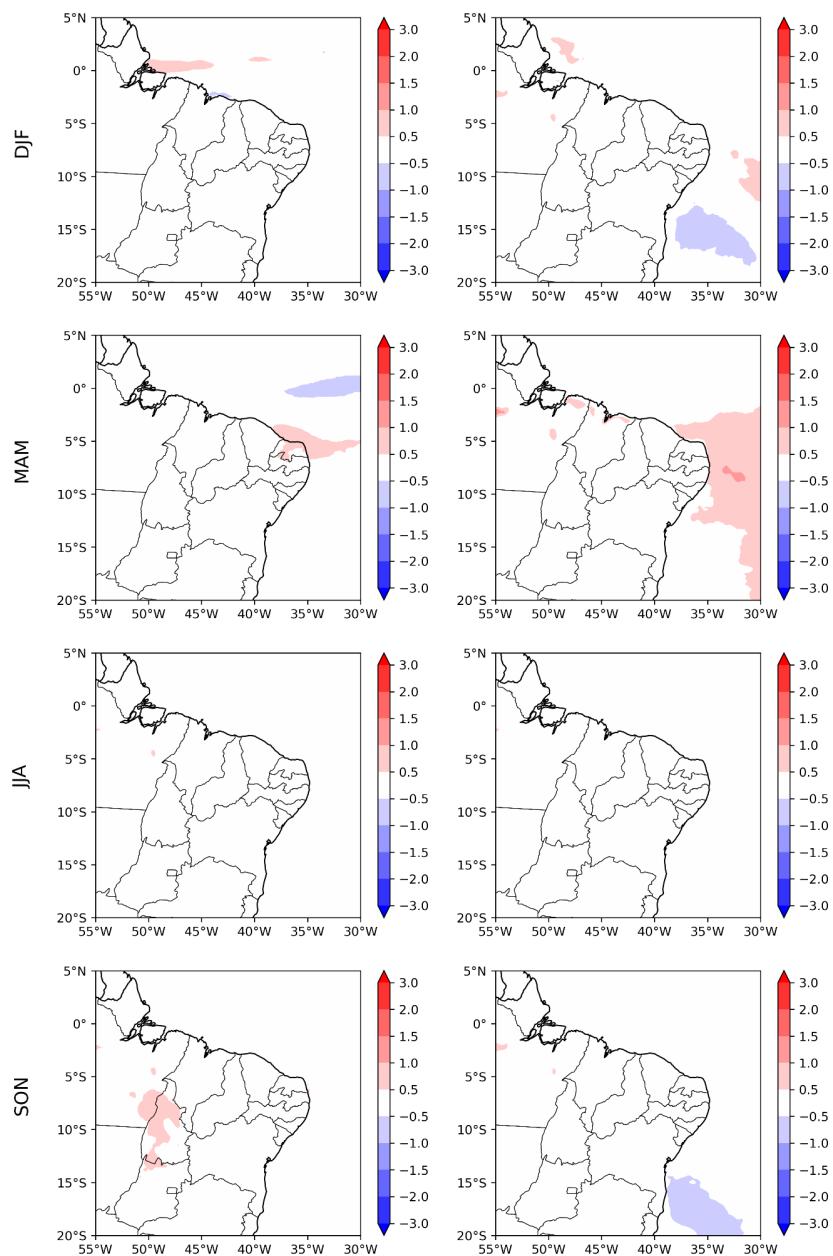


Figura 61 - Tendência sazonal do limiar extremo da magnitude do vento (m/s) a 10 m para RegCM4-HadGEM (esquerda) e RegCM4-MPI (direita) no período 2040-2059 com referência à 1995-2014.

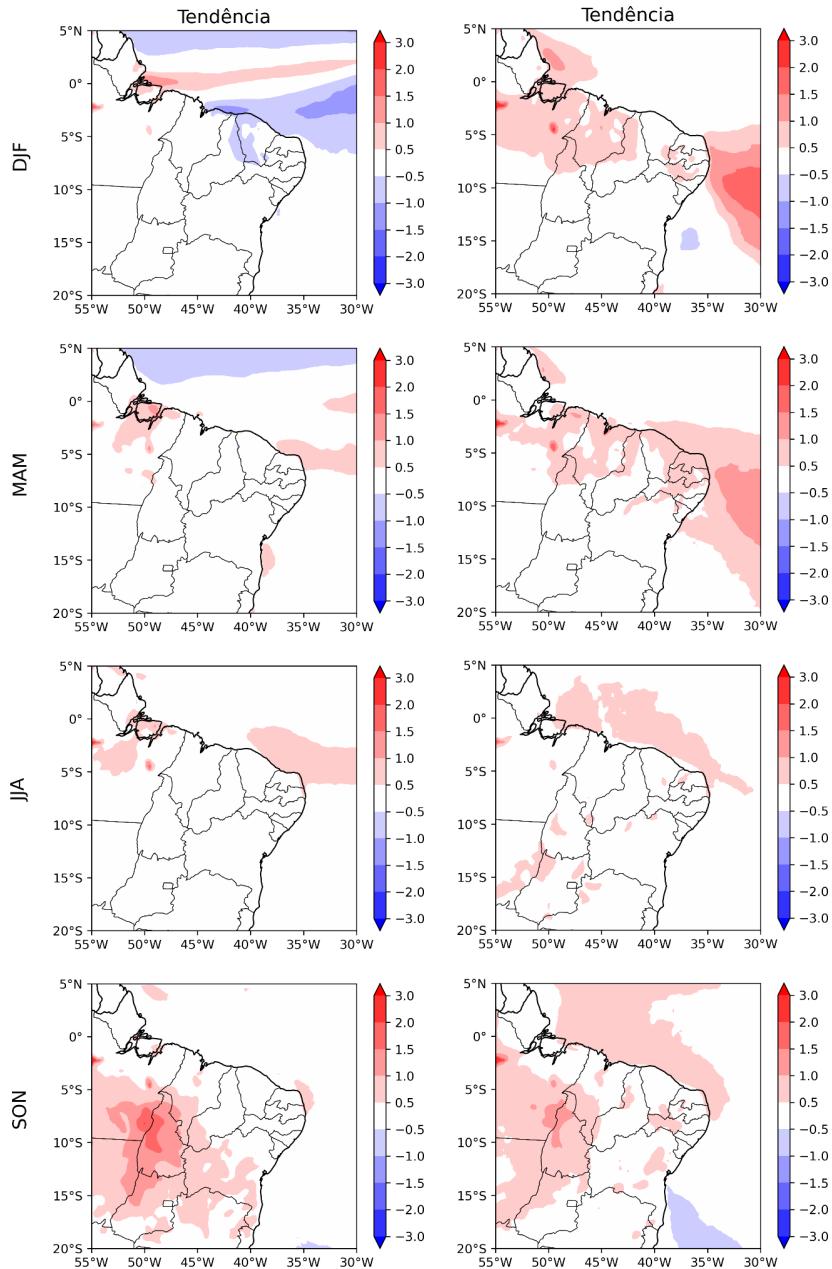


Figura 62 - Tendência sazonal do limiar extremo da magnitude do vento (m/s) a 10 m para RegCM4-HadGEM (esquerda) e RegCM4-MPI (direita) no período 2080-2099 com referência à 1995-2014.

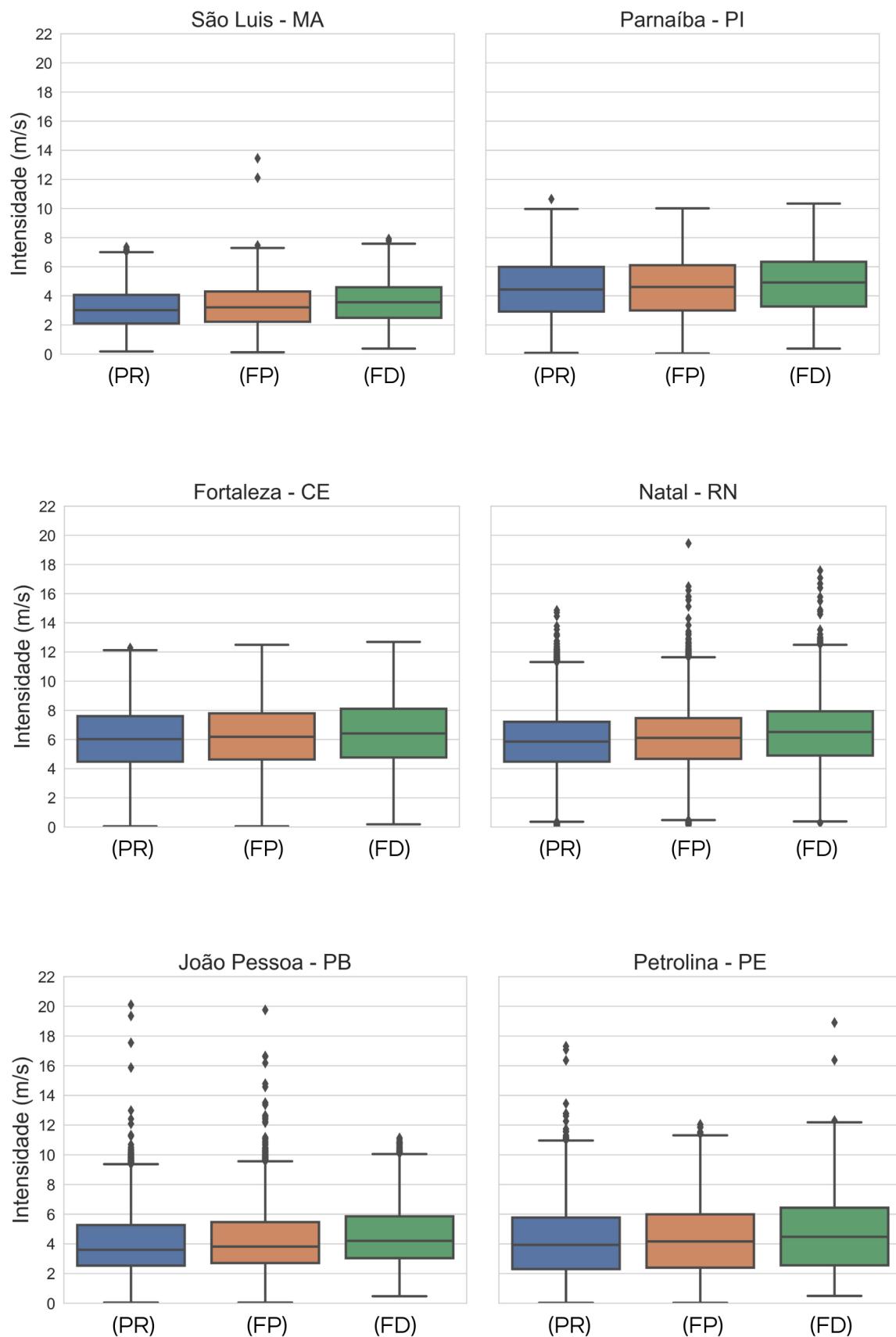
Na Figura 63 são apresentados os boxplots com a série completa da intensidade dos ventos (m/s) a 10 m, com dados a cada 3h, para a simulação RegCM4-MPI para os períodos de referência 1995-2014 (PR), futuro próximo 2040-2059 (FP), e futuro distante 2080-2099 (FD). Optou-se por mostrar exclusivamente uma única simulação do RegCM4 pois, apesar de ter sido forçado por modelos globais diferentes, ambas as simulações apresentaram resultados semelhantes para as projeções dos ventos na região de interesse.

De maneira geral as localidades apresentam um aumento na intensidade dos ventos na mediana, demonstrando uma mudança na distribuição dos dados. É possível também identificar que há uma distribuição de menor frequência para intensidades mais altas, *outliers*, para as localidades pertencentes aos subdomínios C3-C5.

Os resultados encontrados são consistentes com a análise para o percentil de 90%, onde há um aumento na intensidade dos ventos para o NEB. Uma vez que o boxplot abarca dados relativos a um intervalo completo, não é possível avaliar as flutuações que são resultantes das correntes de ar e da topologia das regiões em questão.

A região do NEB apresenta, de acordo com o estudo realizado por Pereira *et al.* (2013), uma tendência de aumento na intensidade dos ventos. O estudo utilizou o modelo Eta-HadCM para analisar diferentes períodos futuros: 2010-2040, 2040-2070 e 2070-2100. Esses períodos foram comparados com uma referência do passado, especificamente o intervalo de 1960-1990. Os resultados de Pereira *et al.* (2012) indicaram que a região NEB pode experimentar um crescimento médio de 15-30% na intensidade dos ventos ao longo desses períodos futuros.

Ramos (2021) também observou um aumento gradual na velocidade do vento a 100 m em um *ensemble* de simulações do RegCM4, que se alinha com os resultados deste estudo. O autor apontou que os subdomínios C2 e C3 exibem uma maior variabilidade, um padrão que se manifesta nos resultados aqui apresentados, especialmente no que diz respeito ao subdomínio C3, que abrange as localidades de Natal e João Pessoa (Figura 63). Tal variabilidade é claramente ilustrada pelos *outliers* identificados.



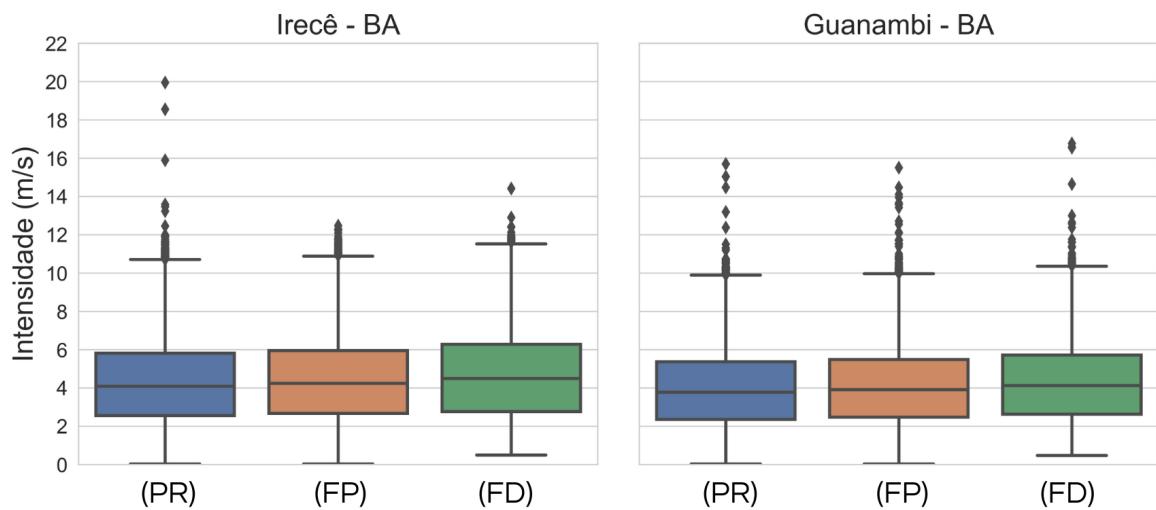


Figura 63 - Boxplot da magnitude do vento (m/s) a 10 m para RegCM4-MPI para o período de referência (PR), futuro próximo (FP) e futuro distante (FD).

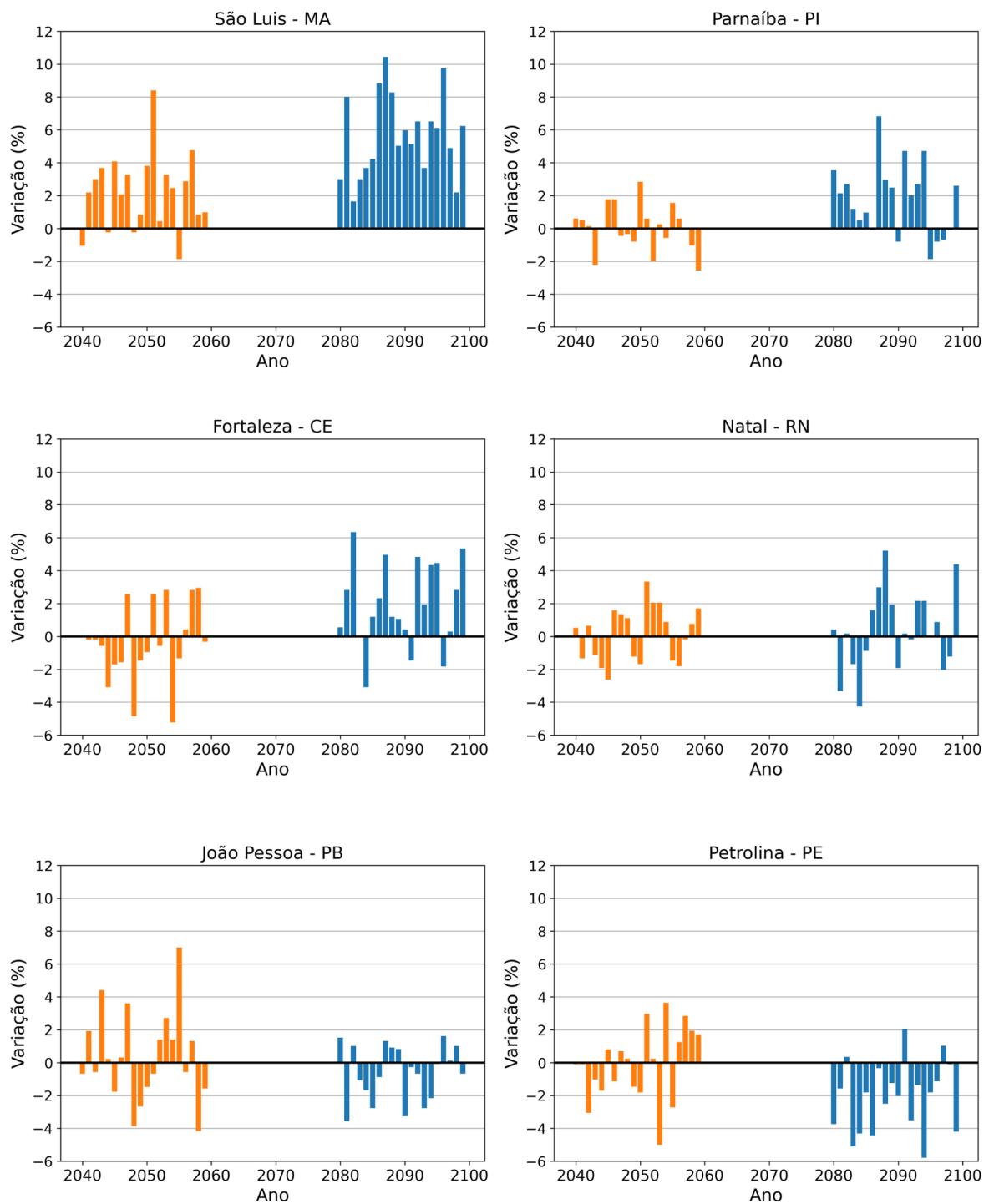
A Figura 64 apresenta a variação percentual (%) das rampas de subida para o período do futuro próximo (FP), em laranja, e futuro distante (FD), em azul, com o período de referência, para cada localidade de estudo para a simulação RegCM4-MPI.

São Luís, no Maranhão, é o local que apresenta maior variação percentual positiva (acima de 10%) no aumento das rampas para o FD, consistente com o aumento da intensidade dos ventos identificados no padrão espacial da tendência , principalmente para DJF e MAM (Figura 62).

Com exceção de João Pessoa, localidades que estão próximas ao litoral apresentam variação positiva das rampas de subida para o FD, enquanto áreas mais continentais (C4 e C5) apresentam redução percentual nas rampas de subida para o mesmo período (Figura 63).

Para o FP, todas as regiões apresentam um aspecto cíclico de mudança. Isso pode estar relacionado à maior influência da variabilidade natural em modelos para os primeiros anos de simulação, como demonstrado por Hawkins e Sutton (2010).

O presente resultado ilustra o impacto potencial do aumento da intensidade dos ventos sobre as rampas de subida, o que por consequência afetará a gestão na produção de energia eólica. Estes resultados são inéditos; até o período final de elaboração desta dissertação, não foi possível identificar estudos que se dediquem à análise de variações nas rampas em cenários futuros do clima para o Brasil.



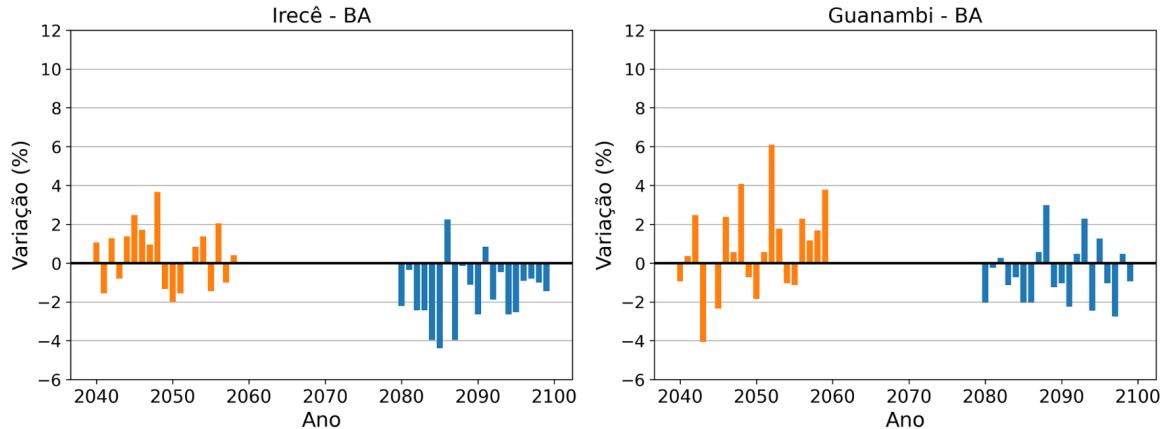


Figura 64 - Tendência futura percentual (%) em rampas de subida para o FP (laranja) e FD (azul).

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar as flutuações de alta frequência da velocidade do vento próximo à superfície nos cenários climáticos atual e futuro ao longo do Nordeste do Brasil (NEB) através de dados de estações meteorológicas, reanálise (ERA5) e simulações com o modelo regional RegCM4. As simulações climáticas do RegCM4 foram forçadas pela ERA-Interim (RegCM4-ERA1) e pelos modelos globais HadGEM2 (RegCM4-HadGEM) e MPI (RegCM4-MPI), conforme descrito em Crespo et al. (2022). Além disso, buscou-se examinar as características das variações abruptas de vento, através do cálculo das rampas de vento, e avaliar tendências nos períodos futuros de médio e longo prazos no cenário RCP8.5, de mais alta emissão de gases do efeito estufa.

Inicialmente, conduziu-se uma avaliação espacial dos ventos a 100 m de altura na região do NEB com a reanálise ERA5 e a simulação do RegCM4 forçado pela reanálise ERA-Interim (RegCM4-ERA1) para o período de 1979 a 2014. Para essa avaliação segmentou-se a região em 5 subdomínios (C1, C2, C3, C4 e C5) e uma análise exploratória foi realizada. Os resultados mostraram que o subdomínio C2 (ao norte e próximo da costa) possui as maiores médias, medianas e extremos de 90 e 95% da magnitude do vento entre todas as regiões avaliadas, enquanto o subdomínio C5 (ao sul e no interior da Bahia) possui os valores mais baixos para essas mesmas métricas.

Ainda para esses domínios, foi realizada uma análise da intensidade média mensal dos ventos (m/s); notou-se que todas as regiões apresentaram uma sazonalidade com maiores intensidades de vento entre agosto e outubro, e menores

entre março e maio, que correspondem às estações seca e chuvosa, respectivamente.

Com o intuito de avaliar a capacidade da reanálise ERA5 em representar adequadamente os padrões de vento na região do NEB, foram selecionadas 8 estações meteorológicas automáticas (EMAs) em locais dentro dos 5 subdomínios do NEB. Essa avaliação concentrou-se nos ventos a 10 metros de altura (único disponível nas EMAS) durante o período de 2003 a 2015, considerando apenas os dados que coincidiam entre as EMAs, ERA5 e RegCM4-ERA1.

Para conduzir essa análise, primeiramente realizou-se uma abordagem exploratória, examinando métricas como média, mediana, quartis, valores máximos e mínimos. Além disso, uma avaliação da correlação entre os conjuntos de dados foi representada por meio de um diagrama de Taylor. Essa avaliação abrangeu todo o período 2003-2015 e, em linhas gerais, obteve-se que a reanálise tende a apresentar valores superiores de média e mediana de velocidade do vento em relação às EMAs em várias localidades, com exceção de Guanambi, situada no subdomínio C5 (interior da Bahia). A reanálise também apresentou uma correlação que varia de moderada a alta, com coeficientes de correlação acima de 0,6 em relação às EMAs. Por outro lado, o RegCM4-ERA1 exibiu valores de média e mediana que superestimam os dados da reanálise, e também resultam em uma correlação substancialmente inferior com os dados das EMAs, não sendo superior a 0,7.

Além disso, procedeu-se à análise da intensidade dos ventos a cada 3 horas (ciclo diurno) ao longo das diferentes estações do ano entre 2003-2015, comparando os três conjuntos de dados. Em linhas gerais, tanto a reanálise ERA5 quanto o RegCM4-ERA1 apresentaram uma tendência de superestimar as velocidades do vento em relação aos dados observacionais em todas as localidades e estações do ano. No entanto, um comportamento distinto foi observado em Guanambi para a ERA5, onde a reanálise subestimou consistentemente a intensidade dos ventos em todos os horários. Uma análise de distribuição utilizando *boxplots* também foi realizada, mostrando que Guanambi exibe uma maior dispersão nos dados das EMAs, particularmente durante a primavera, em comparação com outras estações e localidades nos subdomínios. A incapacidade da ERA5 em reproduzir adequadamente os dados de Guanambi pode estar

relacionada à topografia única da região, uma vez que se encontra na Serra do Espinhaço, na Bahia.

Visando entender a variabilidade do vento em alta frequência temporal, explorou-se o comportamento das rampas de vento (aumento ou diminuição abruptas de velocidades) nas várias localidades dos subdomínios. Essa análise abrangeu a investigação das rampas de vento com base na frequência média mensal, bem como a avaliação das rampas horárias sazonalmente. Além disso, foram identificadas as persistências na intensidade dos ventos durante a ocorrência das rampas.

Esse estudo foi conduzido utilizando dados da reanálise ERA5, bem como dos modelos RegCM4-ERA1, RegCM4-HadGEM e RegCM4-MPI, no período de 1979 a 2005. Os resultados mostraram que rampas de vento apresentam consistência no comportamento para localidades próximas ou no mesmo subdomínio, além de ser notável a influência de brisas terra-oceano, para as regiões litorâneas, e brisas vale-montanha, para regiões continentais para o horário preferencial de estabelecimento ou término das rampas. A frequência de rampas horárias, em geral, é mais elevada nas simulações em comparação com a reanálise, contudo, essas simulações ainda mantêm uma consistência com o padrão diário observado nas rampas.

Por fim, uma investigação de tendências futuras foi realizada espacialmente e de forma sazonal com os modelos RegCM4-HadGEM e RegCM4-MPI para o período futuro próximo (FP), abrangendo 2040-2059 e futuro distante (FD), para 2080-2099, em relação ao período de referência (PR) de 1995-2014. Os modelos não mostraram aumento significativo de velocidade dos ventos *onshore* para o FP, porém mostraram tendências predominantemente positivas mais notáveis para o FD principalmente para o Norte e Nordeste do Brasil no período de dezembro a maio, e região sul da Bahia para setembro-novembro.

Após, uma análise foi realizada apenas para o modelo RegCM4-MPI no FP e FD. Ambos os períodos futuros mostraram aumento consistente na mediana das intensidades de velocidade do vento, indicando mudança na distribuição dos dados. *Outliers* foram identificados principalmente nas regiões C3-C5 (que consistem nas localidades de Natal, João Pessoa, Petrolina, Irecê e Guanambi). Em complemento, para o mesmo período de análise e mesma simulação, uma avaliação das rampas de subida foram efetuadas. A localidade de São Luís, no Maranhão, apresenta

aumento significativo nas rampas para FD, correspondendo ao aumento das intensidades de vento identificado espacialmente. Áreas costeiras exibem aumento nas rampas de vento para FD, enquanto áreas continentais mostram redução. Para FP, há um padrão cíclico, provavelmente relacionado à variabilidade natural sobreposta ao cenário de aquecimento.

É relevante notar a importância desse estudo quanto à escassez de estudos de validação para dados de vento no NEB. Além disso, as pesquisas sobre rampas de vento geralmente se concentram em estudos de casos específicos, e avaliações como as apresentadas neste trabalho ainda não haviam sido realizadas para esta região. Os resultados deste estudo são verdadeiramente inovadores; até o período final de elaboração desta dissertação, não foi possível identificar estudos que se dediquem à análise das variações nas rampas de vento em cenários climáticos futuros para o Brasil.

## 6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Visando uma complementação dos resultados alcançados nesse trabalho, propõem-se os seguintes trabalhos futuros:

1. Investigação das tendências na intensidade dos ventos para o NEB nos cenários de média e alta emissão utilizando modelos do CMIP6;
2. Avaliação das rampas de vento em estudos de casos para regiões continentais e litorâneas do NEB, visto que o Brasil carece desse tipo de estudo;
3. Avaliação do impacto das rampas de vento no potencial eólico brasileiro e gerenciamento de parques eólicos.

Esses trabalhos podem ampliar nossa compreensão das dinâmicas dos ventos no NEB, oferecendo *insights* essenciais para o avanço do setor de energia renovável.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABEEÓLICA. **Boletim Anual de Geração Eólica.** Associação Brasileira de Energia Eólica, 2020. Disponível em: <https://bityli.com/JCEeP>. Acesso em: 18 set. 2023.
- ABEEÓLICA. **Infovento 32.** Associação Brasileira de Energia Eólica, 2023. Disponível em: <https://bityli.com/UBluZ>. Acesso em: 18 set. 2023.
- AMARANTE, O. A.; BROWER, M.; ZACK, J. Atlas do potencial eólico brasileiro. In: *Atlas do potencial eólico brasileiro*. Eólica, C. S. E & Solutions, Ministério de Minas e Energia Eletrobrás, 2001.
- ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA)**, 2023. Disponível em: <https://bit.ly/2IGf4Q0>. Acesso em: 18 set. 2023.
- BARRETO, A. B. **Estudo do ciclo diário do vento à superfície no Nordeste do Brasil.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.
- BRITO, L. S. **Análise do Vento sobre o Nordeste do Brasil na reanálise centenária ERA-20C: Variabilidade Interanual e Extremos.** 2018. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- CAI, W. et al. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Review Earth Environment**, v. 1, p. 215-231, 2020.
- CAMARGO-SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS. et al. *Atlas eólico: Bahia*. Brasil: Camargo Schubert, 2013. 96 p.
- CARDOSO, A. A. **Ciclones subtropicais e ventos em superfície no sudoeste do Oceano Atlântico Sul: climatologia e extremos.** Dissertação (Mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- CAVALCANTI, I. F. A. et al. **Tempo e Clima no Brasil.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

COLLINS, W. G. et al. Evaluation of the HadGEM2 Model. **Hadley Centre technical note 74**, p. 47, 2008.

CRESPO, N. M.; DA SILVA, N. P.; PALMEIRA, R. M. J.; ... DA ROCHA, R. P. Western South Atlantic Climate Experiment (WeSACEx): extreme winds and waves over the Southeastern Brazilian sedimentary basins. **Climate Dynamics**, 2022.

CUSTÓDIO, M. S.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T.; VIDALE, P. L.; DEMORY, M.E. Impact of increased horizontal resolution in coupled and atmosphere-only models of the HadGEM1 family upon the climate patterns of South America. **Climate Dynamics**, v. 48, p. 3341–3364, 2017.

D'AMICO, G.; PETRONI, F.; VERGINE, S. Ramp Rate Limitation of Wind Power: An Overview. **Energies**, 2022.

DA SILVA, B. B.; ALVES, J. J. A.; CAVALCANTI, E. P. Caracterização do potencial eólico da direção predominante do vento no estado da Bahia. **Proceedings of the XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu, Brazil**. p. 11-16, 2002.

DA ROCHA R. P.; GONÇALVES, F. L. T.; SEGALIN, B. Fog events and local atmospheric features simulated by regional climate model for the metropolitan area of São Paulo, Brazil. **Atmospheric Research**, v. 151, p. 176-188, 2015.

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**, v. 125, p. 95-109, 2014.

DEE, D. P., et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Q.J.R. Meteorol. Soc.**, v. 137: p. 553–597, 2011.

DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P. J. **Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as coupled to the NCAR Community Model**. NCAR Tech. Note NCAR/TN-3871STR, 1993.

DOS SANTOS, A. T. S.; E SILVA, C. M. S.; Seasonality, Interannual Variability, and Linear Tendency of Wind Speeds in Northeast Brazil from 1986 to 2011. **The Scientific World Journal**, v. 2013, 10 p., Out. 2013.

FARIAS, Michelle. Alagoas decreta situação de emergência em 29 cidades por causa da chuva. **G1**, 8 jul. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2023/07/08/decreto-emergencia-chuva-municipios-alagoas.ghtml>. Acesso em: 18 set. 2023.

FERNANDES, I. G.; PIMENTA, F. M.; SAAVEDRA, O. R.; SILVA, A. R. Offshore Validation of ERA5 Reanalysis with Hub Height Wind Observations of Brazil, 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), pp. 1-5, Lima, Peru, 2021.

GALLEGOS-CASTILLO, C.; CUERVA-TEJERO, A.; LOPEZ-GARCIA, O. A review on the recent history of wind power ramp forecasting. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1148-1157, 2015.

GIORGETTA, M. A. et al. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. **J. Adv. Model. Earth Syst.**, v. 5, p. 572–597, 2013.

GIORGIO, F. et al. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. **Climate Research**, v. 52, p. 7-29, 2012.

GIORGIO, F.; JONES, C.; ASRAR, G. **Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework**. WMO Bull 58: 175–183, 2009.

GIORGIO, F.; MEARNS, L. O. Introduction to special section: Regional Climate Modeling Revisited. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 104, p. 6335–6352, 1999.

GREENE, S.; MORRISSEY, M.; JOHNSON, S. E. Wind climatology, climate change, and wind energy. **Geo Compass**, v. 4, p. 1592–1605, 2010.

GRUBER, K.; REGNER, P.; WEHRLE, S.; ZEYRINGER, M.; SCHMIDT, J. Towards global validation of wind power simulations: A multi-country assessment of wind power simulation from MERRA-2 and ERA-5 reanalyses bias-corrected with the global wind atlas. **Energy**, v. 238, 2022.

GUTOWSKI, W. et al. WCRP Coordinated Regional Downscaling EXperiment (CORDEX): a diagnostic MIP for CMIP6. **Geosci. Model Dev.**, v. 9, p. 4087–4095, 2016.

GWEC. Global Wind Report 2023, 2023. Disponível em: <https://gwec.net/globalwindreport2023/>. Acesso em: 18 set. 2023.

HASTENRATH, S. Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. **Journal of Climate**, v. 3, p. 893-904, 1990.

HAWKINS, E.; SUTTON, R. The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. **Climate dynamics**, v. 37, p. 407-418, 2011.

HERSBACH H., DEE D. **ERA5 reanalysis is in production.** ECMWF Newsletter 147:7, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de Dados Meteorológicos. Brasília - DF, 2022. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 18 set. 2023.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

KOUSKY, V. E. Diurnal Rainfall Variation in Northeast Brazil. **Mon. Wea. Rev.**, v. 108, p. 488–498, 1980.

LIMA, G. C. el at. Ciclo diurno e dinâmica dos ventos em baixos níveis sobre o estado do Ceará. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 29, p. 440/20-463, 2021.

LLOPART M.; COPPOLA E.; GIORGI, F.; DA ROCHA, R. P.; CUADRA S. Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basin. **Climatic Change**, v. 66, p. 111–125, 2014.

MARTIN G. M. et al. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model Climate configurations, **Geosci. Model Dev. Discuss.**, v. 4, p. 765–841, 2011.

OLESON, K. W. et al. **Technical description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM)**. NCAR Technical Note NCAR/TN-503+STR. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 420 pp, 2013.

OLIVEIRA, J. L.; COSTA, E A. A.. Estudo de variabilidade do vento em escala sazonal sobre o nordeste brasileiro utilizando o RAMS: os casos de 1973-1974 e 1982-1983. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n.1, p. 53-66, Mar. 2011.

PAL, J. S. et al. Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 88, p. 1395–1410, 2007.

PEREYRA-CASTRO, K.; CAETANO, E. Wind-Ramp Predictability. **Atmosphere**, 2022.

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

PIEPER, Oliver. Pior seca em mais de 70 anos deixa capital do Uruguai quase sem água. **G1**, 5 jul. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/2023/07/05/pior-seca-em-mais-de-70-anos-deixa-capital-do-uruguai-quase-sem-agua.ghtml>. Acesso em: 18 set. 2023.

PRYOR, S.C.; BARTHELMIE, R.J.; KJELLSTRÖM, E. Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: analyses using a regional climate model. **Climate Dynamics**. v. 25, p. 815–835, 2005.

RAMIREZ, Rachel. Mês passado foi o junho mais quente já registrado no planeta. CNN, 6 jul. 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/mes-passado-foi-o-junho-mais-quente-ja-registrado-no-planeta/>. Acesso em: 18 set. 2023.

RAMOS, H. M. **Projeções climáticas regionais em alta resolução:** tendências no vento e potencial eólico do Nordeste do Brasil. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

RAO, V. B.; LIMA, M. C.; FRANCHITO, S. H. Seasonal and interannual variations of rainfall over eastern Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 6, p. 1754-1763, 1993.

REBOITA, M. S.; AMARO, T. R.; DE SOUZA, M. R. Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate. **Climate Dynamics**, v. 51, p. 187-205, 2018.

REBOITA, M. S.; FERNANDEZ, J.; LLOPART, M. P.; DA ROCHA, R. P.; PAMPUCH, L. A.; CRUZ, F. Assessment of RegCM4.3 over the CORDEX South America domain: sensitivity analysis for physical parameterization schemes. **Climate Research**, v. 60, p. 215–234, 2014.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n.2, p. 185-204, 2010.

SAILOR, D. J.; SMITH, M.; HART, M. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. **Renewable Energy**, v. 33, p. 2393-2406, Nov. 2008.

SEVLIAN, R.; RAJAGOPAL, R. Wind power ramps: Detection and statistics. IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, EUA, 2012.

SHERRY, M.; RIVAL, D. Meteorological phenomena associated with wind-power ramps downwind of mountainous terrain. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 7, 2015.

TAVARES, L. F. A. et al. Assessment of the offshore wind technical potential for the Brazilian Southeast and South regions. **Energy**, v. 196, 2020.

TEIXEIRA, R. F. B. O fenômeno da brisa e sua relação com a chuva sobre Fortaleza-CE. **Revista Brasileira De Meteorologia**, v. 23(3), p. 282–291, 2008.

TOBIN, I. et al. Climate change impacts on the power generation potential of a European mid-century wind farms scenario. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 3, Mar. 2016.

VAN VUUREN, D. P. et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climate Change**, v. 109, p. 5–31, 2011.

WALTON, R.; GALLUS JR, W.; TAKLE, E.S. Wind ramp events at turbine height-spatial consistency and causes at two Iowa wind farms. Fourth conference on weather, climate, and the new energy economy, Austin, Texas; Jan 2013.

YANG, B. et al. State-of-the-art one-stop handbook on wind forecasting technologies: An overview of classifications, methodologies, and analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, 2021.

## APÊNDICE

São Luís - Frequência rampas de subida - 1979-2005

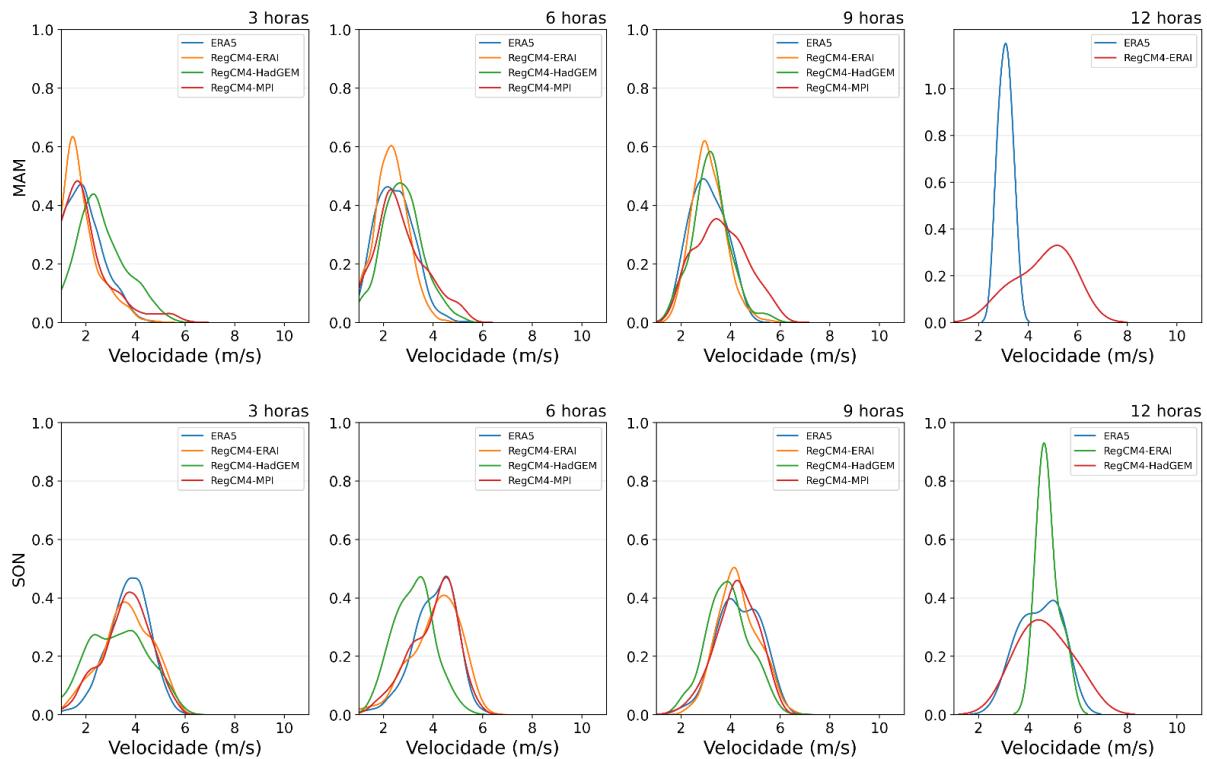
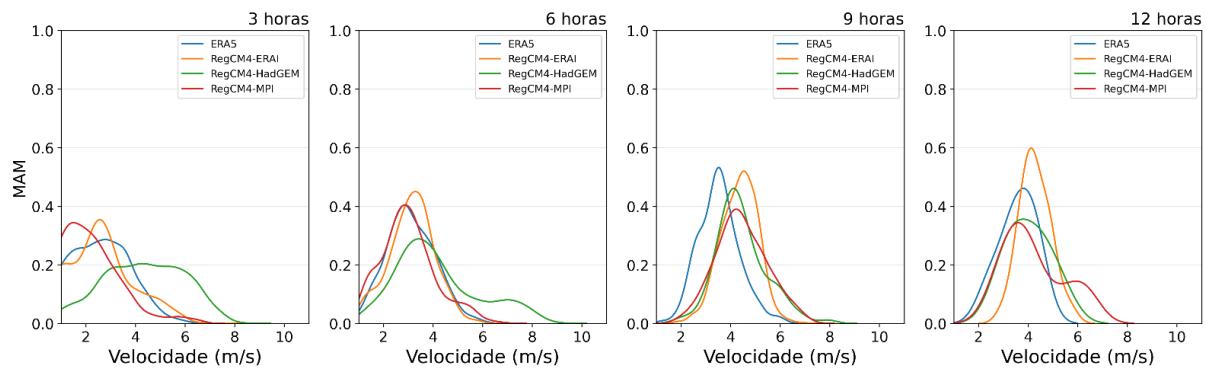


Figura A.1 - Função densidade de probabilidade de frequência de intensidade (m/s) de rampas de subida para diferentes tempos de permanência (3, 6, 9, e 12 horas) para São Luís no período de MAM (acima) e SON (abaixo).

Parnaíba - Frequência rampas de subida - 1979-2005



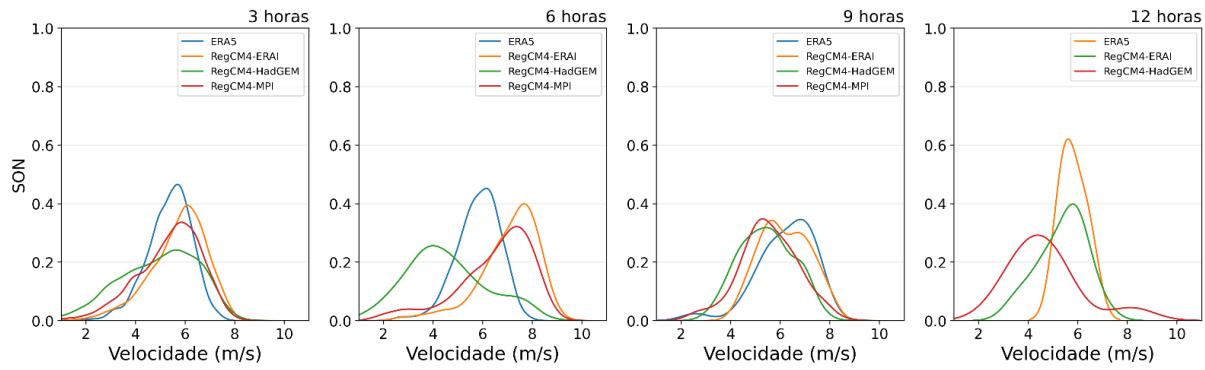


Figura A.2 - Semelhante à Figura A.1 para Parnaíba.

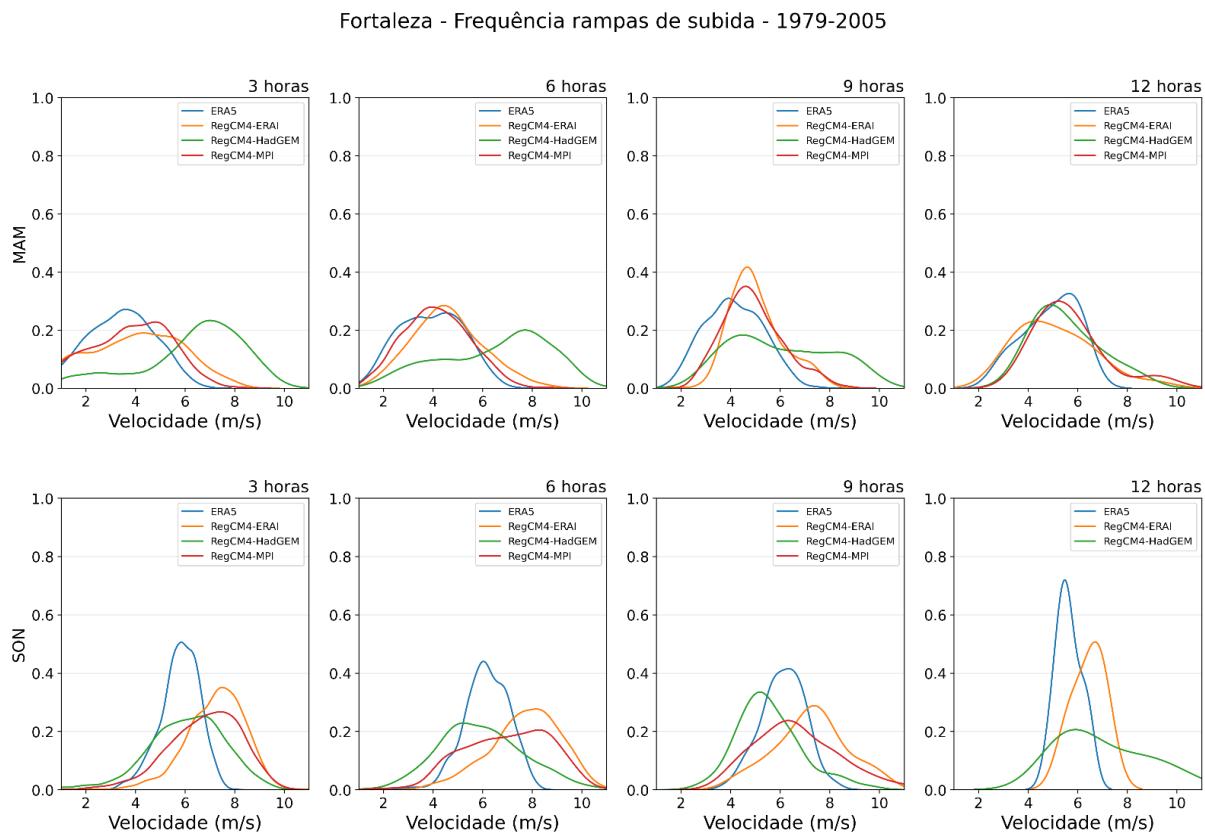


Figura A.3 - Semelhante à Figura A.1 para Fortaleza.

### Natal - Frequência rampas de subida - 1979-2005

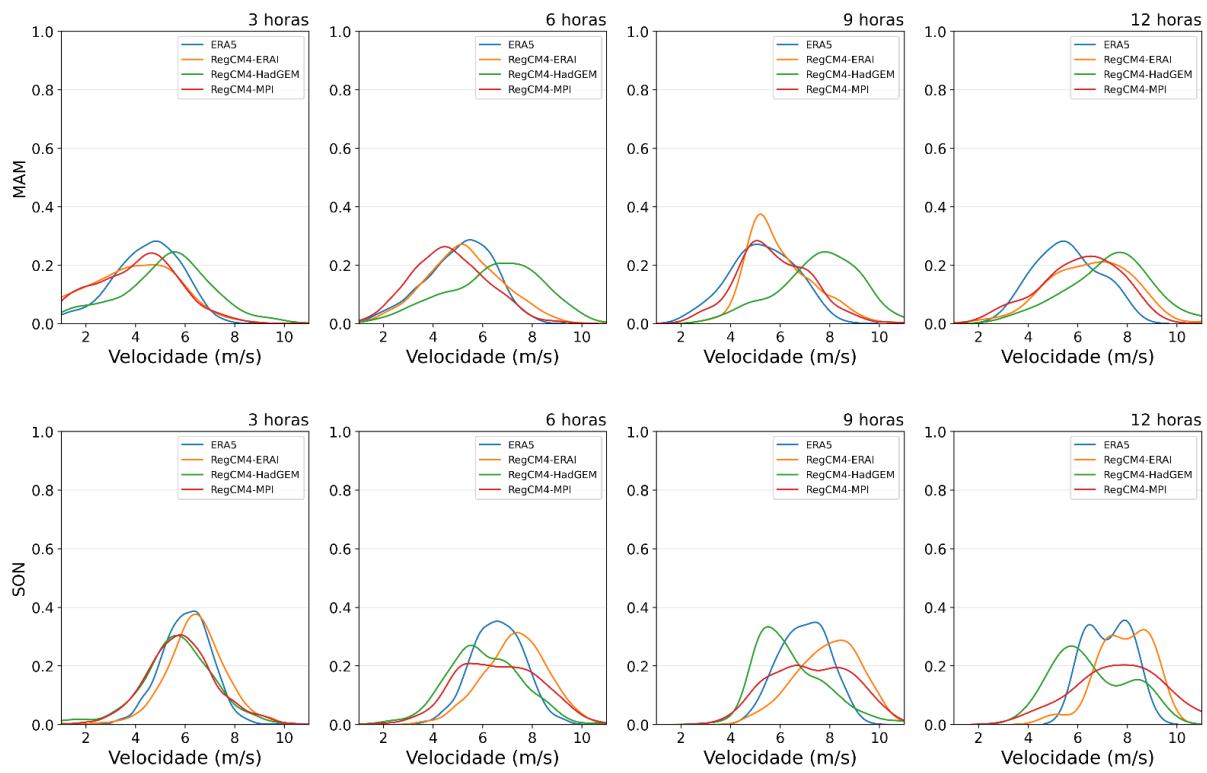


Figura A.4 - Semelhante à Figura A.1 para Natal.

### João Pessoa - Frequência rampas de subida - 1979-2005

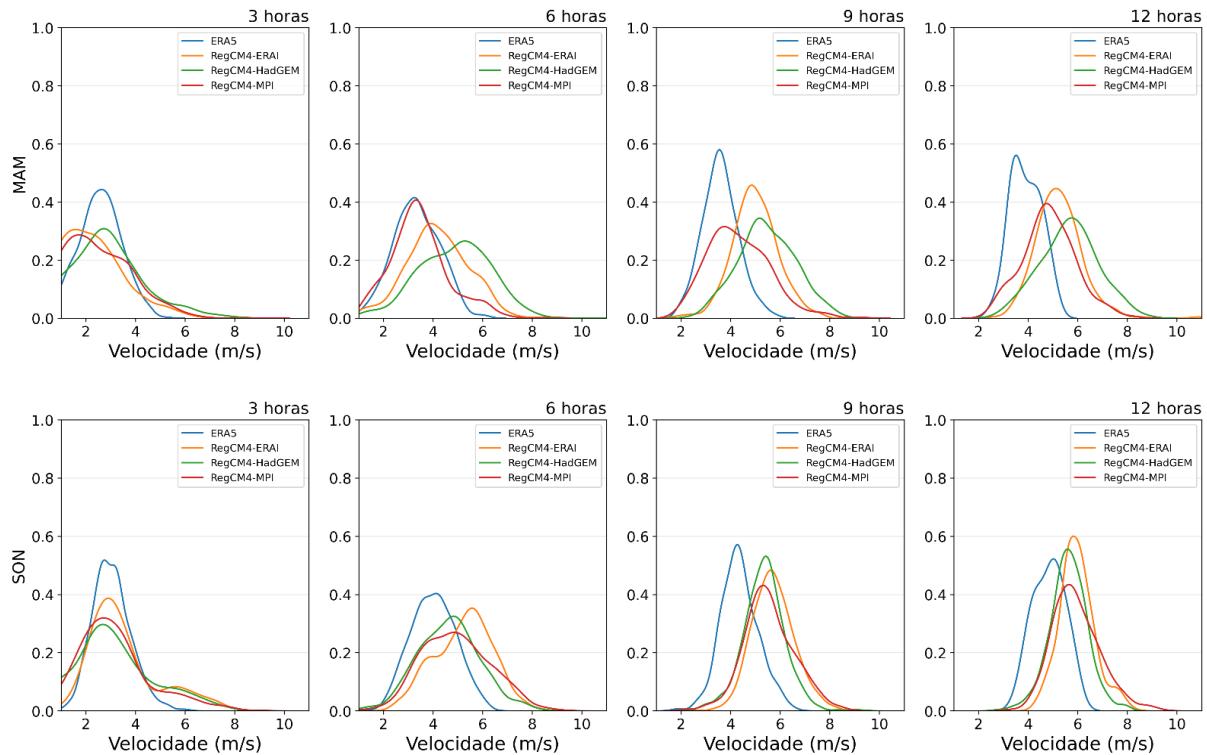


Figura A.5 - Semelhante à Figura A.1 para João Pessoa.

### Petrolina - Frequência rampas de subida - 1979-2005

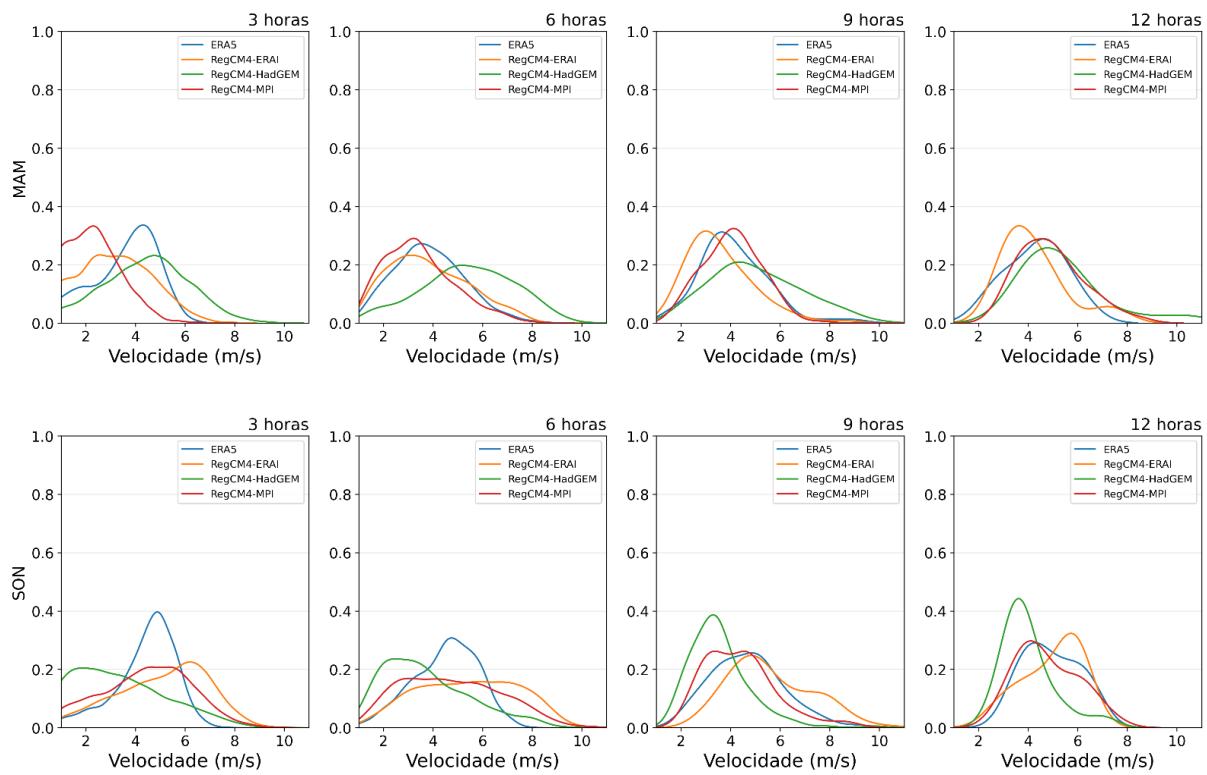


Figura A.6 - Semelhante à Figura A.1 para Petrolina.

### Irecê - Frequência rampas de subida - 1979-2005

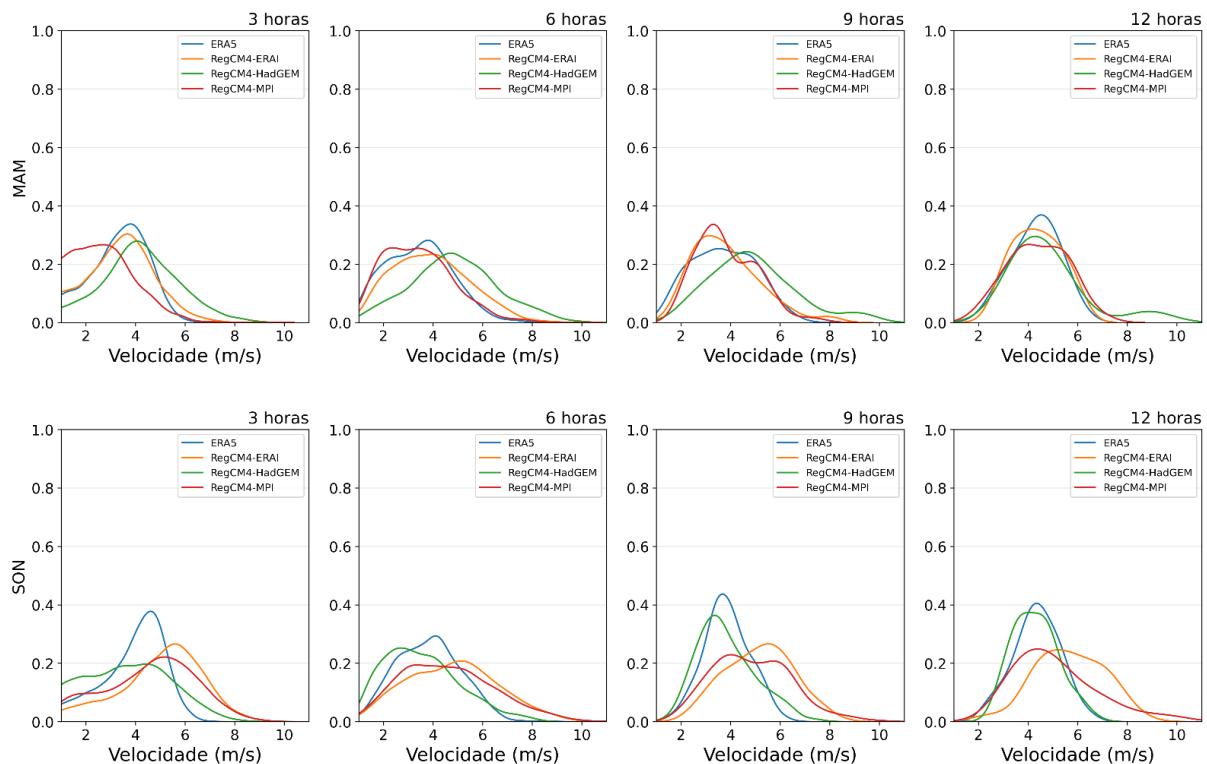


Figura A.7 - Semelhante à Figura A.1 para Irecê.

### Guanambi - Frequência rampas de subida - 1979-2005

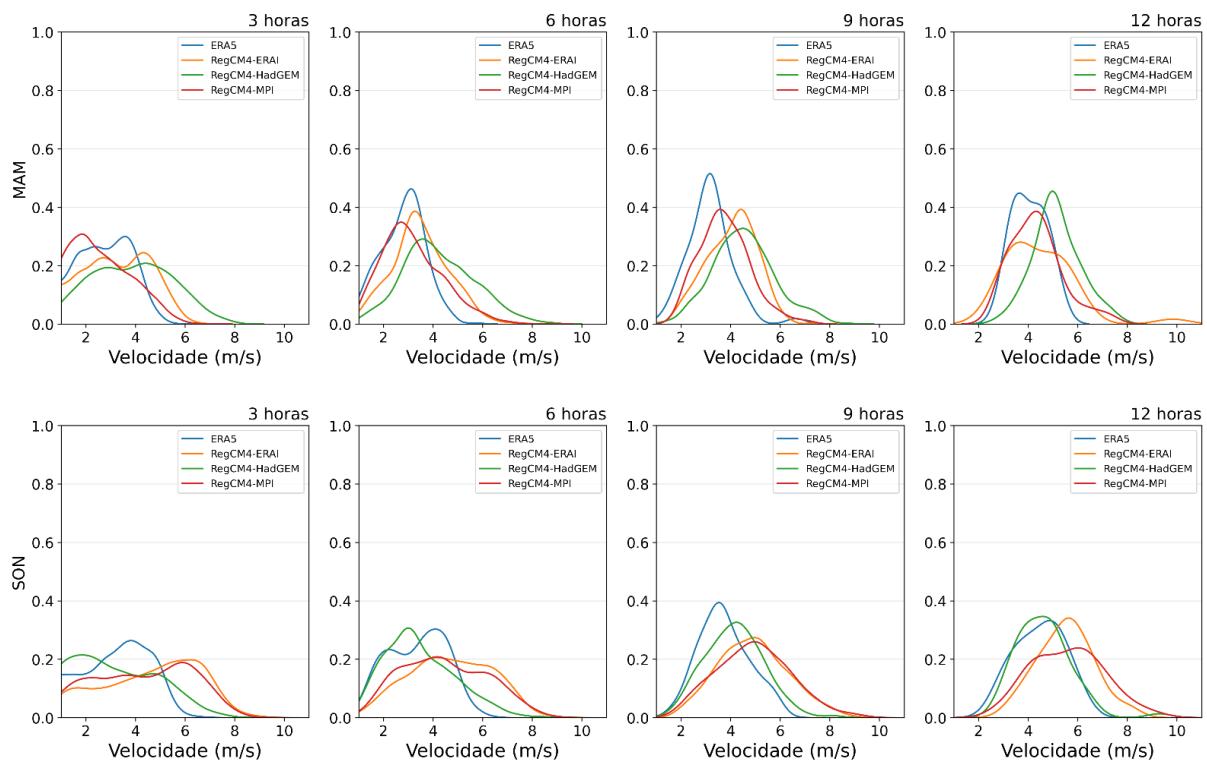


Figura A.8 - Semelhante à Figura A.1 para Guanambi.

### São Luís - Frequência rampas de descida - 1979-2005

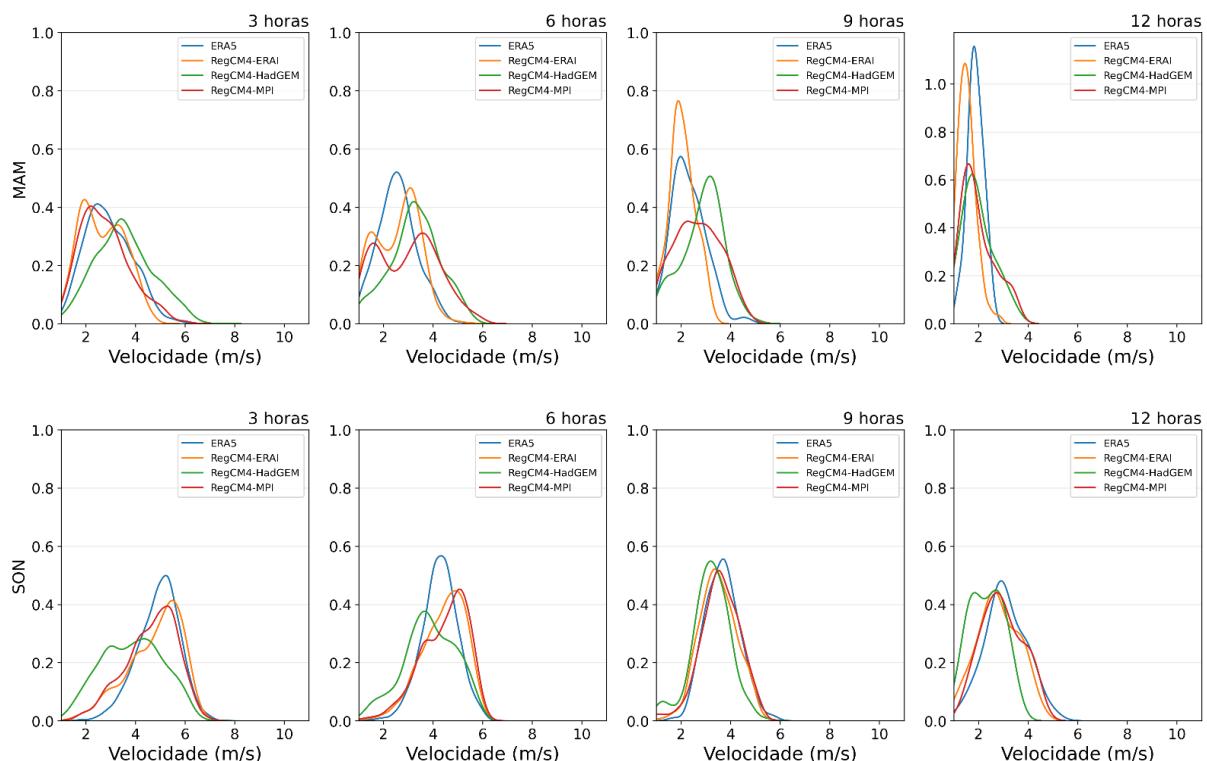


Figura A.9 - Função densidade de probabilidade de frequência na permanência de rampas de descida para São Luís no período de MAM (acima) e SON (abaixo).

### Parnaíba - Frequência rampas de descida - 1979-2005

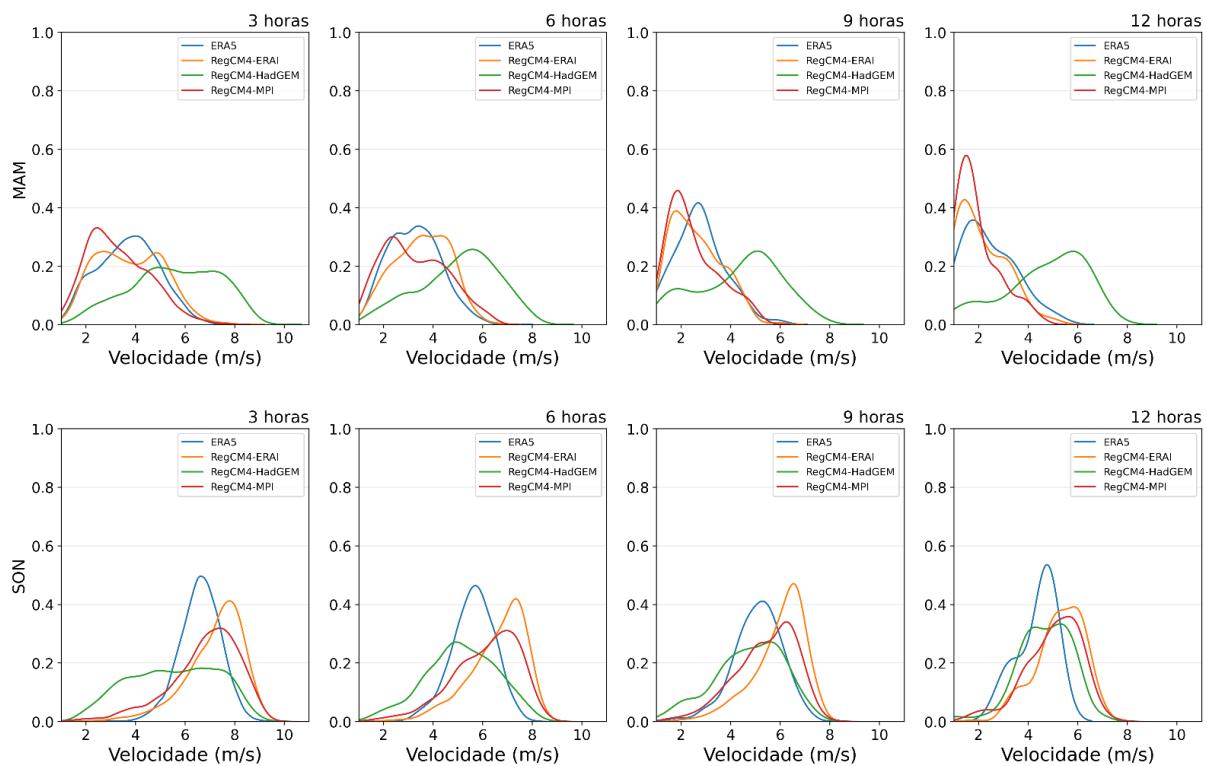


Figura A.10 - Semelhante à Figura A.9 para Parnaíba.

### Fortaleza - Frequência rampas de descida - 1979-2005

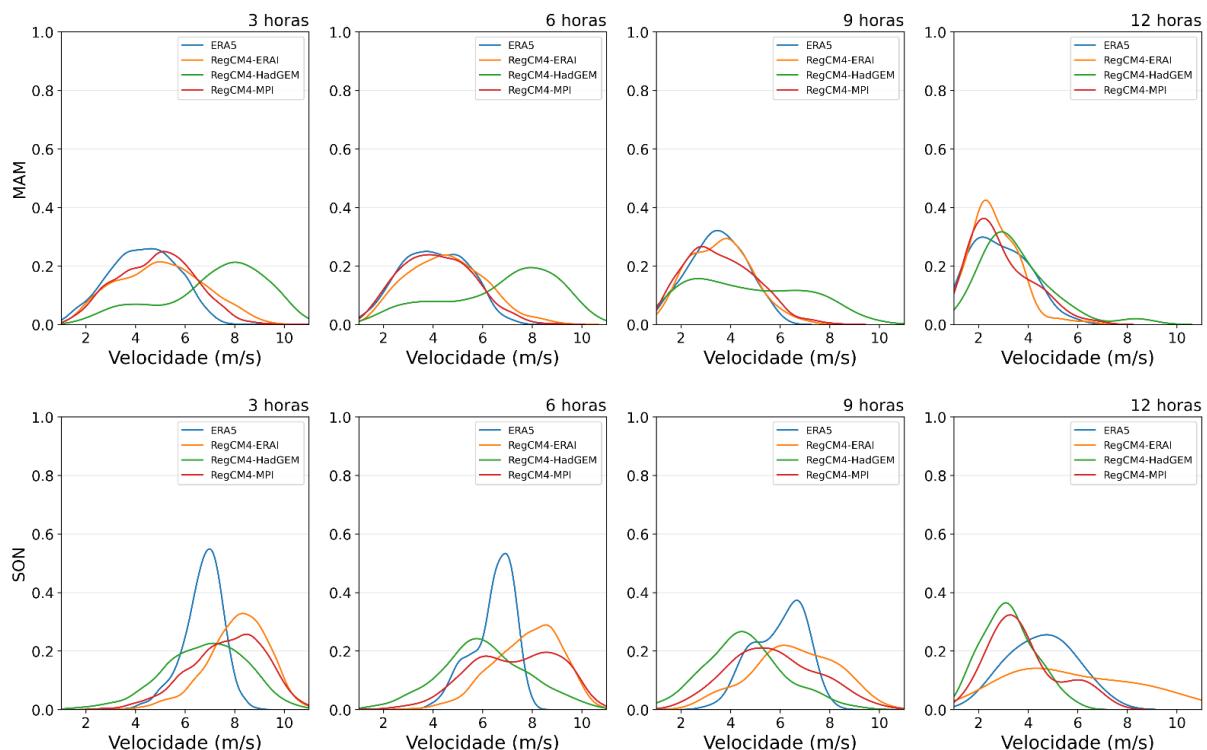


Figura A.11 - Semelhante à Figura A.9 para Fortaleza.

### Natal - Frequência rampas de descida - 1979-2005

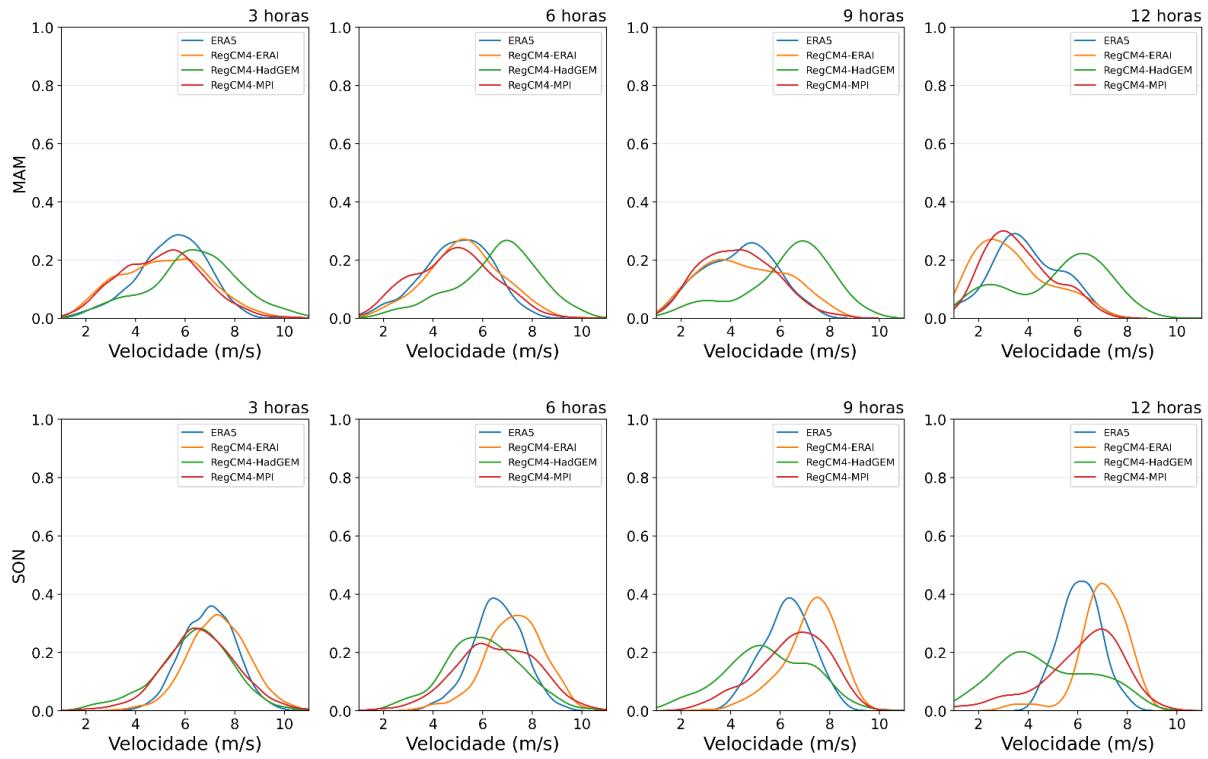


Figura A.12 - Semelhante à Figura A.9 para Natal.

### João Pessoa - Frequência rampas de descida - 1979-2005

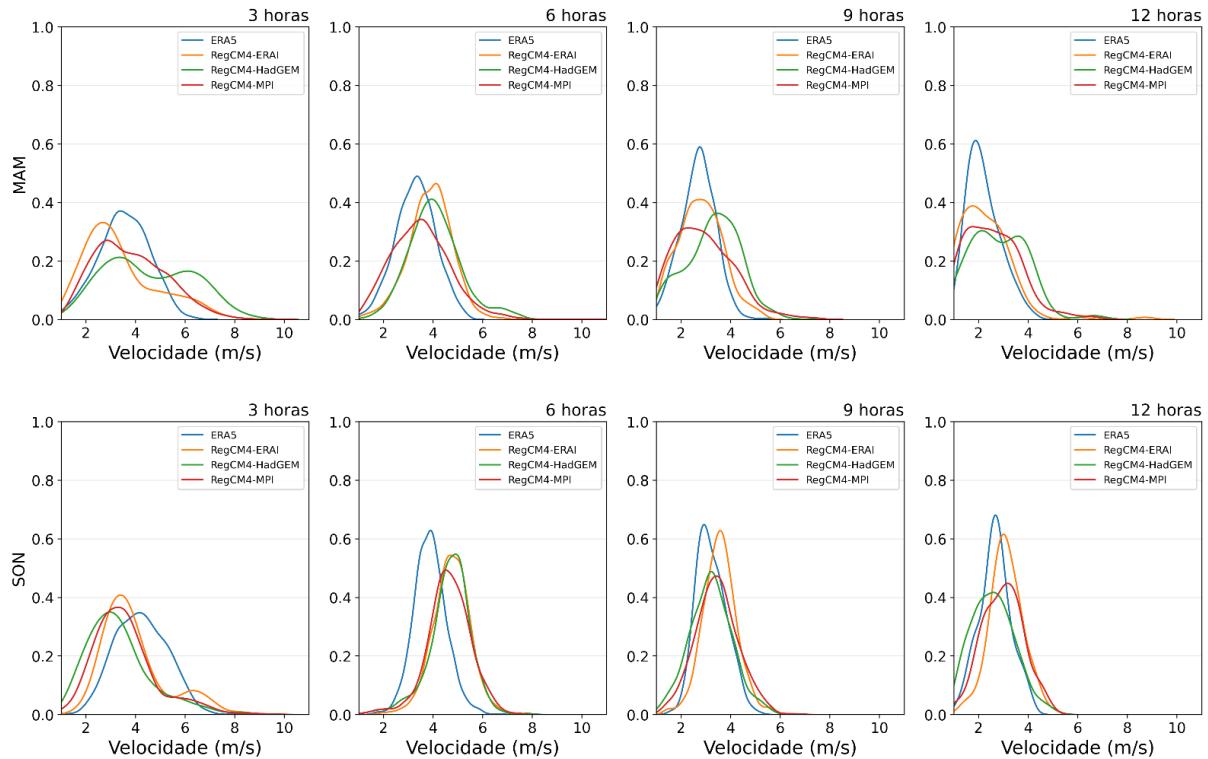


Figura A.13 - Semelhante à Figura A.9 para João Pessoa.

### Petrolina - Frequência rampas de descida - 1979-2005

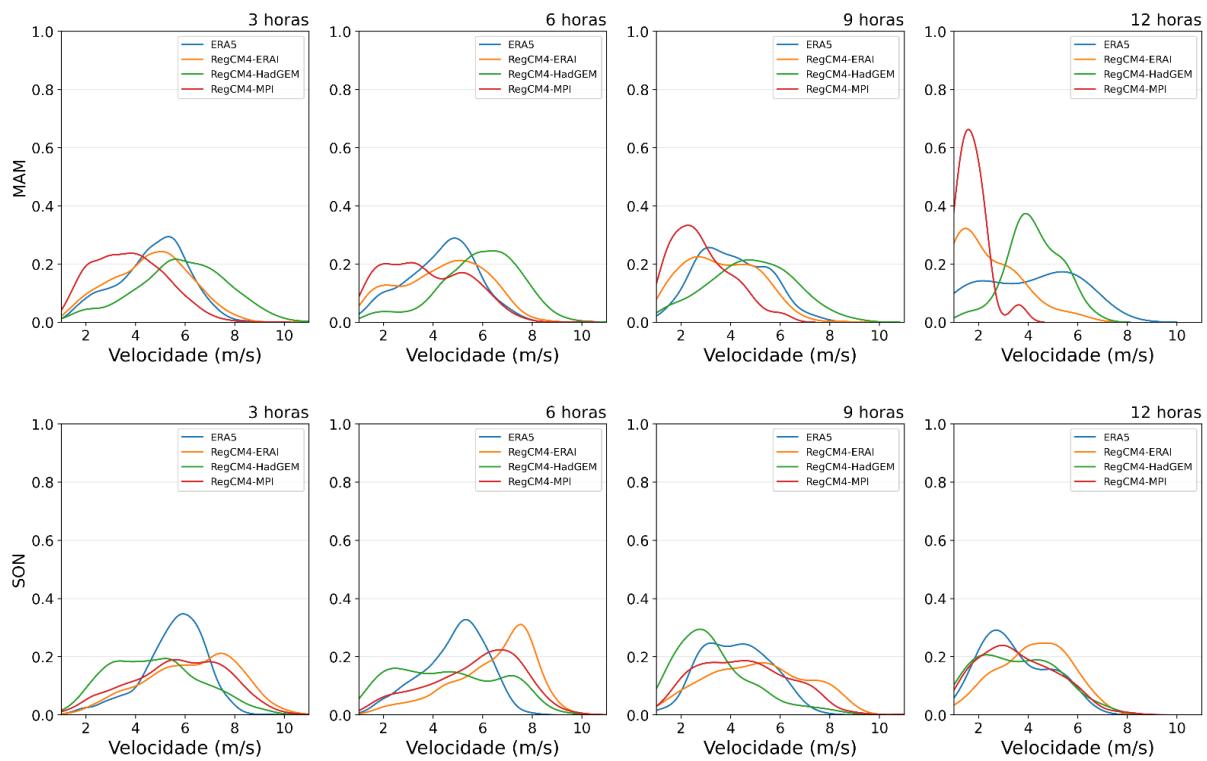


Figura A.14 - Semelhante à Figura A.9 para Petrolina.

### Irecê - Frequência rampas de descida - 1979-2005

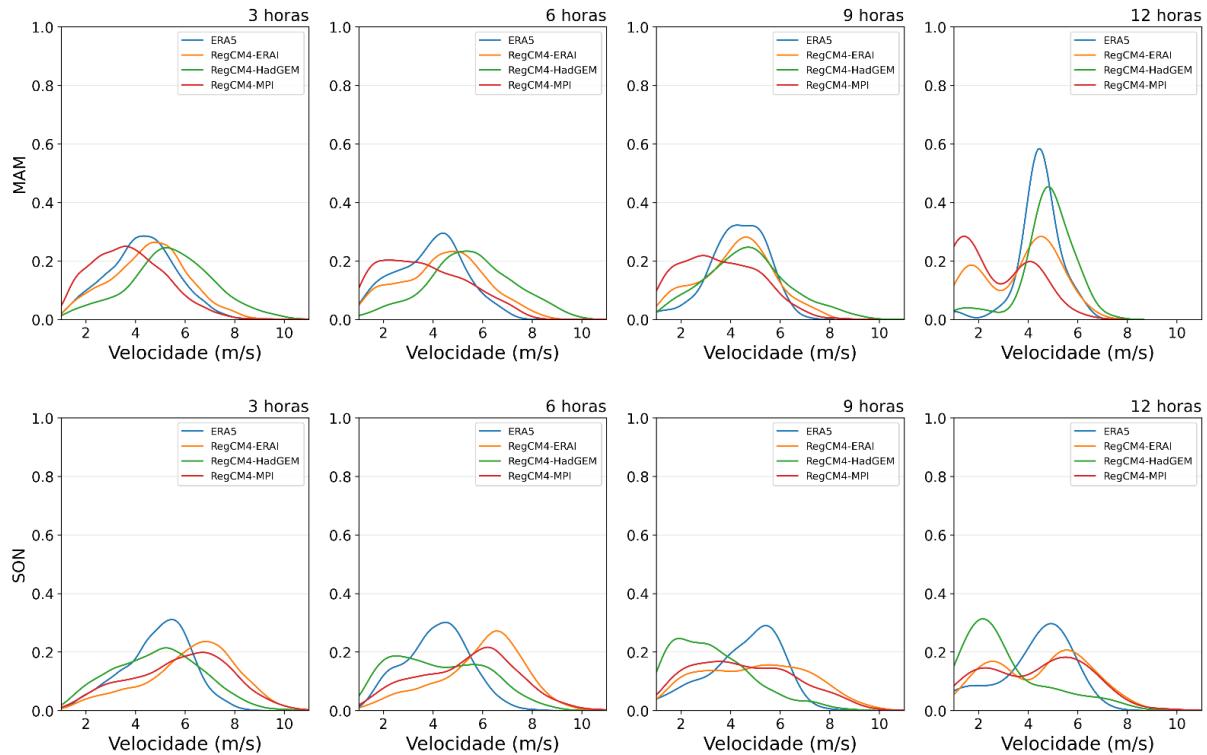


Figura A.15 - Semelhante à Figura A.9 para Irecê.

### Guanambi - Frequência rampas de descida - 1979-2005

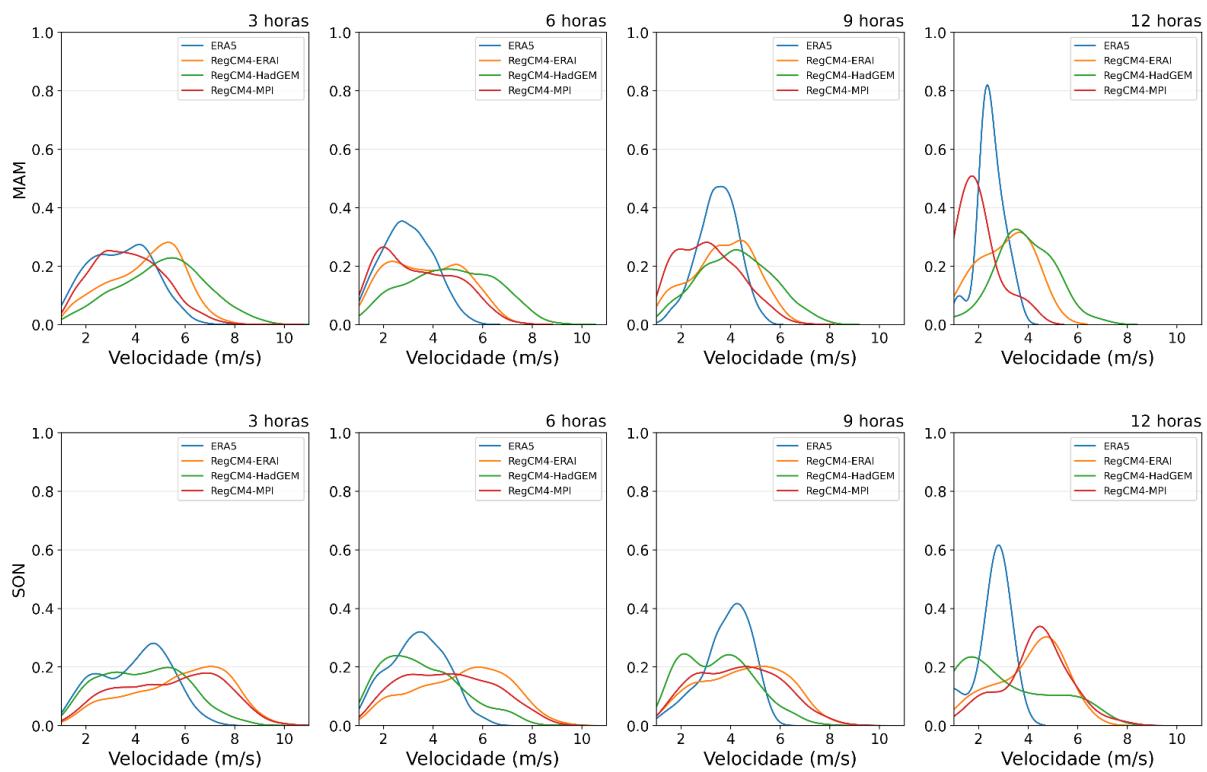


Figura A.16 - Semelhante à Figura A.9 para Guanambi.

### São Luís - Frequência não-rampas - 1979-2005

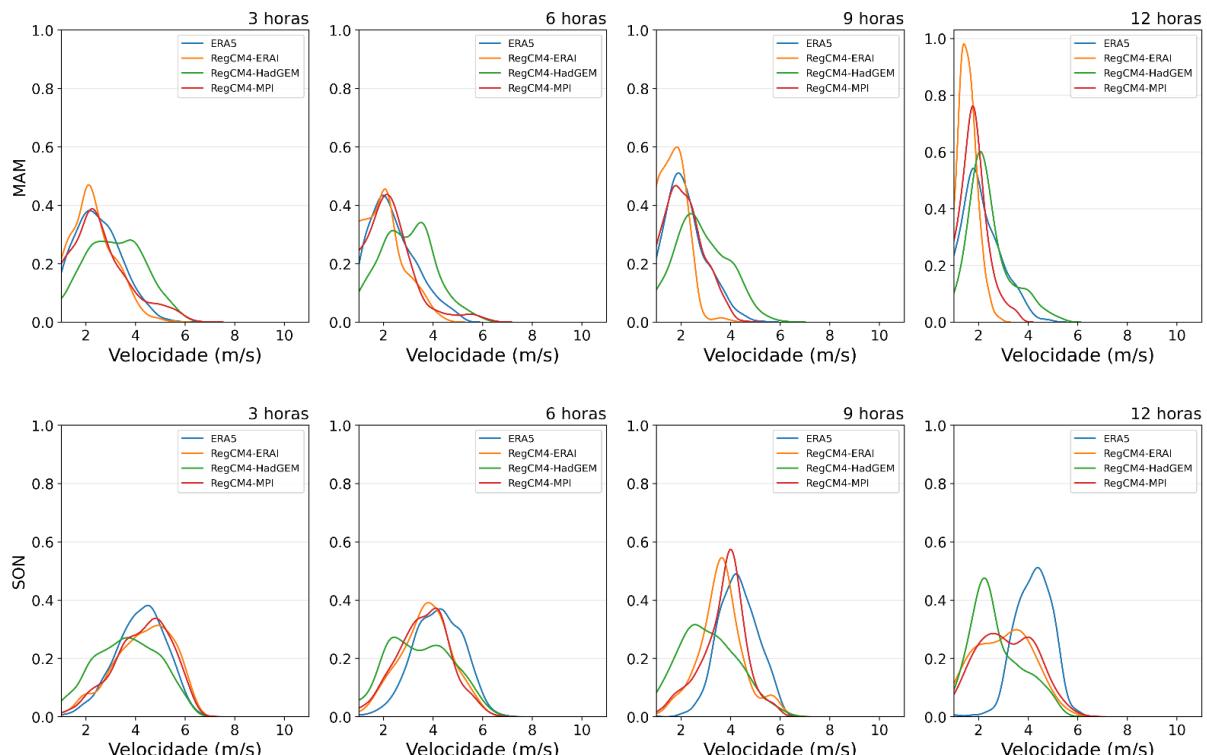


Figura A.17 - Função densidade de probabilidade de frequência na permanência de não-rampas para São Luís no período de MAM (acima) e SON (abaixo).

### Parnaíba - Frequência não-rampas - 1979-2005

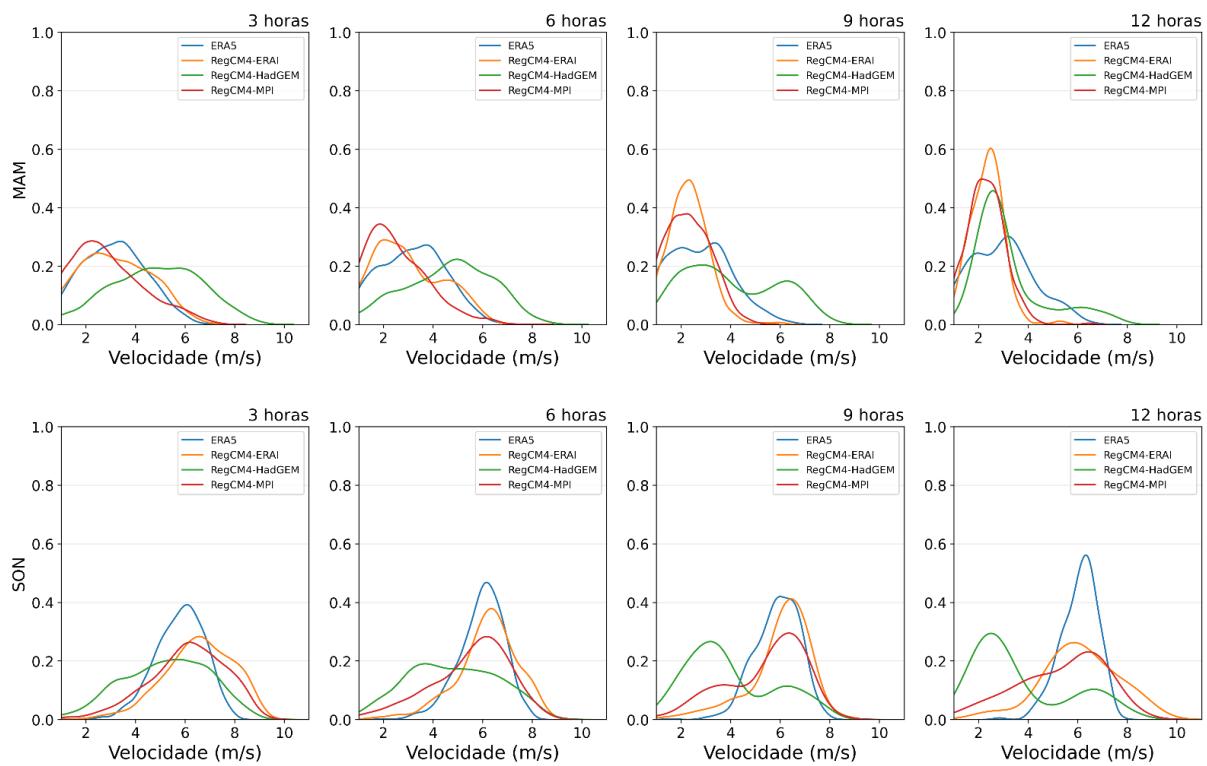


Figura A.18 - Semelhante à Figura A.17 para Parnaíba.

### Fortaleza - Frequência não-rampas - 1979-2005

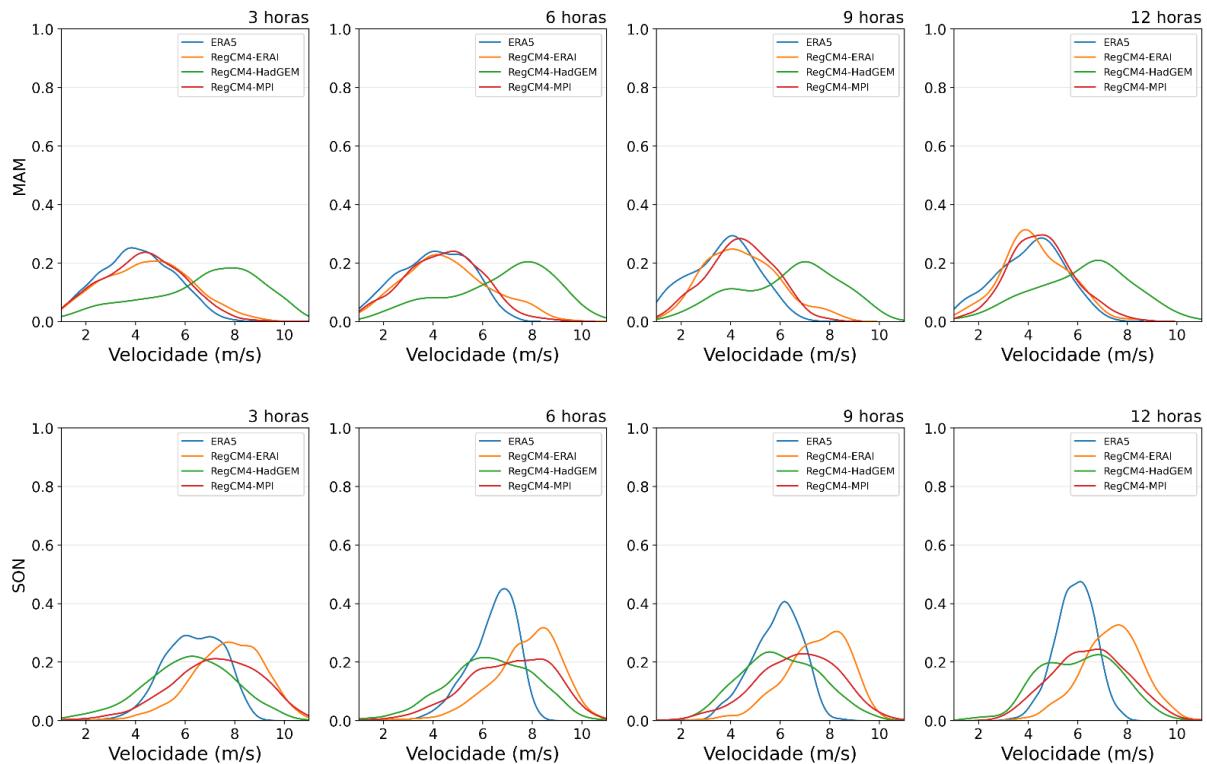


Figura A.19 - Semelhante à Figura A.17 para Fortaleza.

### Natal - Frequência não-rampas - 1979-2005

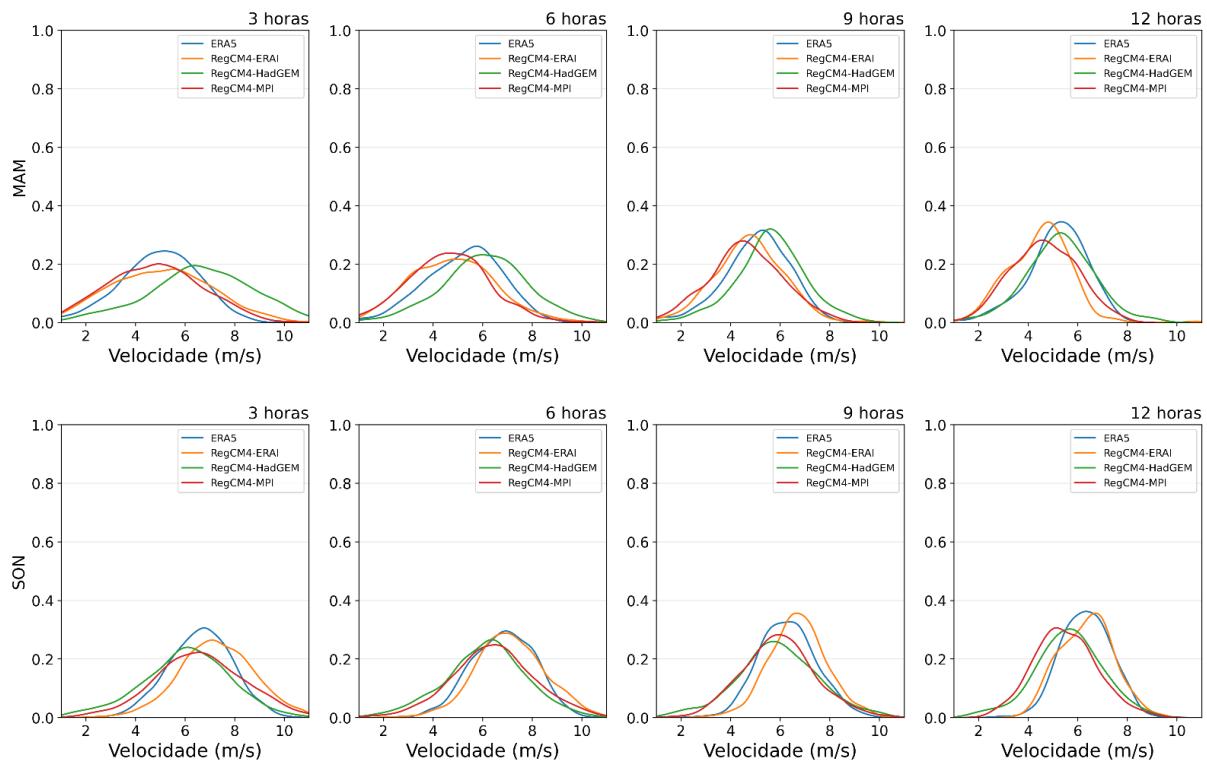


Figura A.20 - Semelhante à Figura A.17 para Natal.

### João Pessoa - Frequência não-rampas - 1979-2005

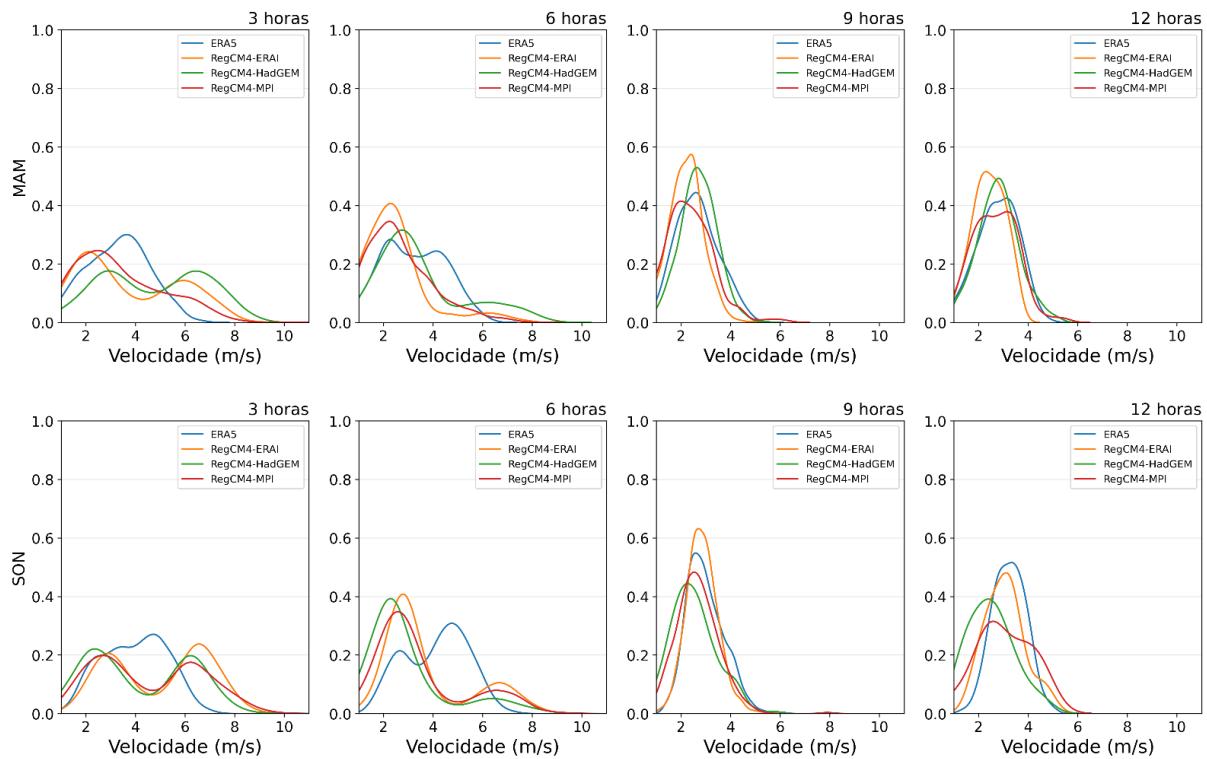


Figura A.21 - Semelhante à Figura A.17 para João Pessoa.

### Petrolina - Frequência não-rampas - 1979-2005

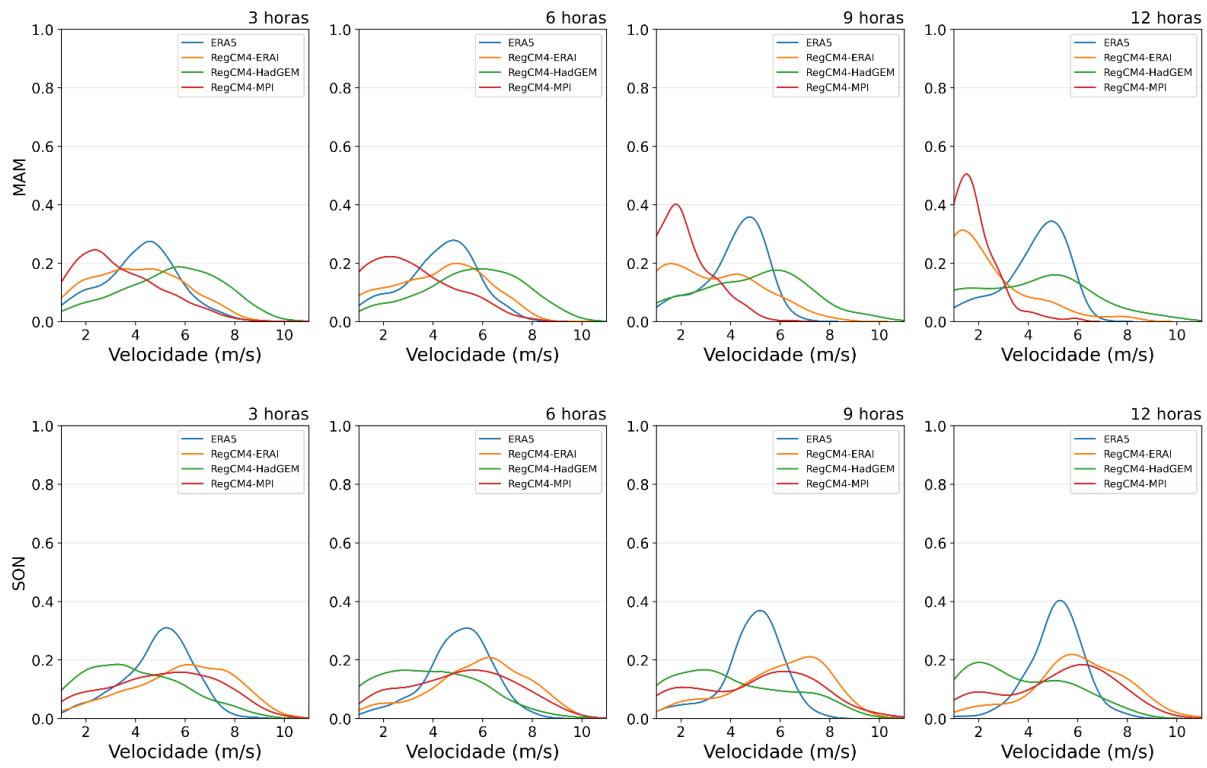


Figura A.22 - Semelhante à Figura A.17 para Petrolina.

### Irecê - Frequência não-rampas - 1979-2005

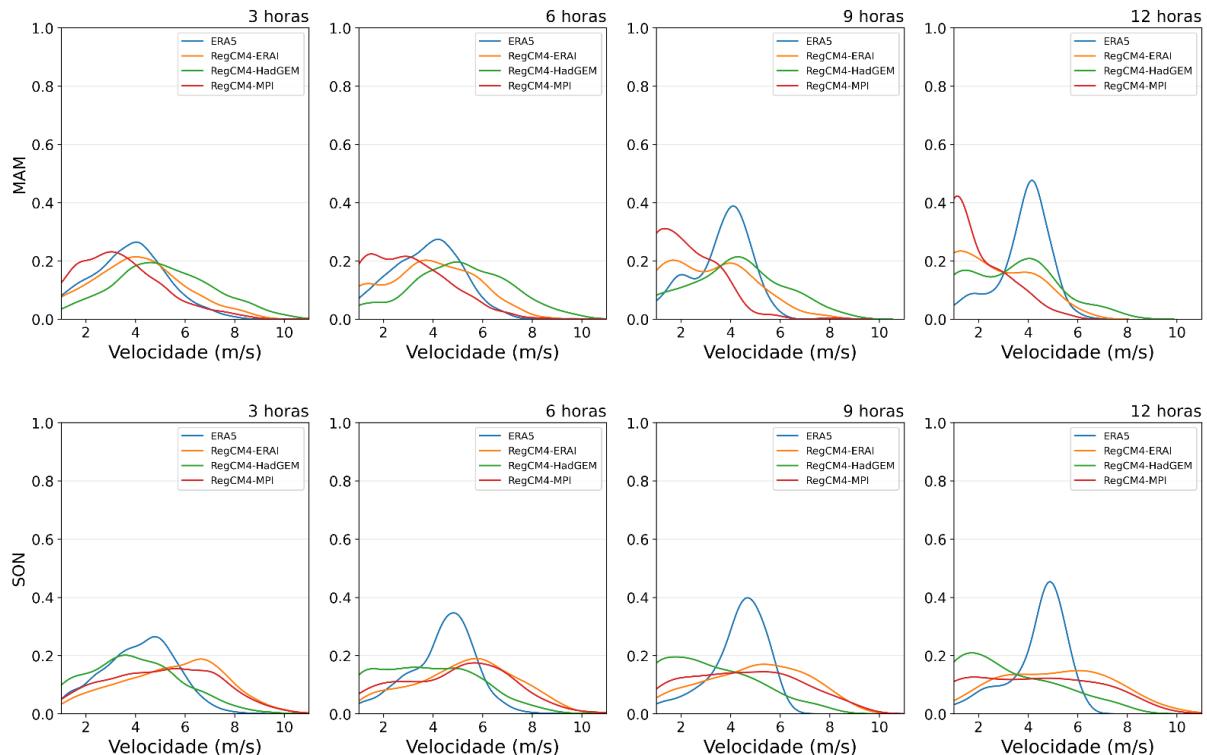


Figura A.23 - Semelhante à Figura A.17 para Irecê.

### Guanambi - Frequência não-rampas - 1979-2005

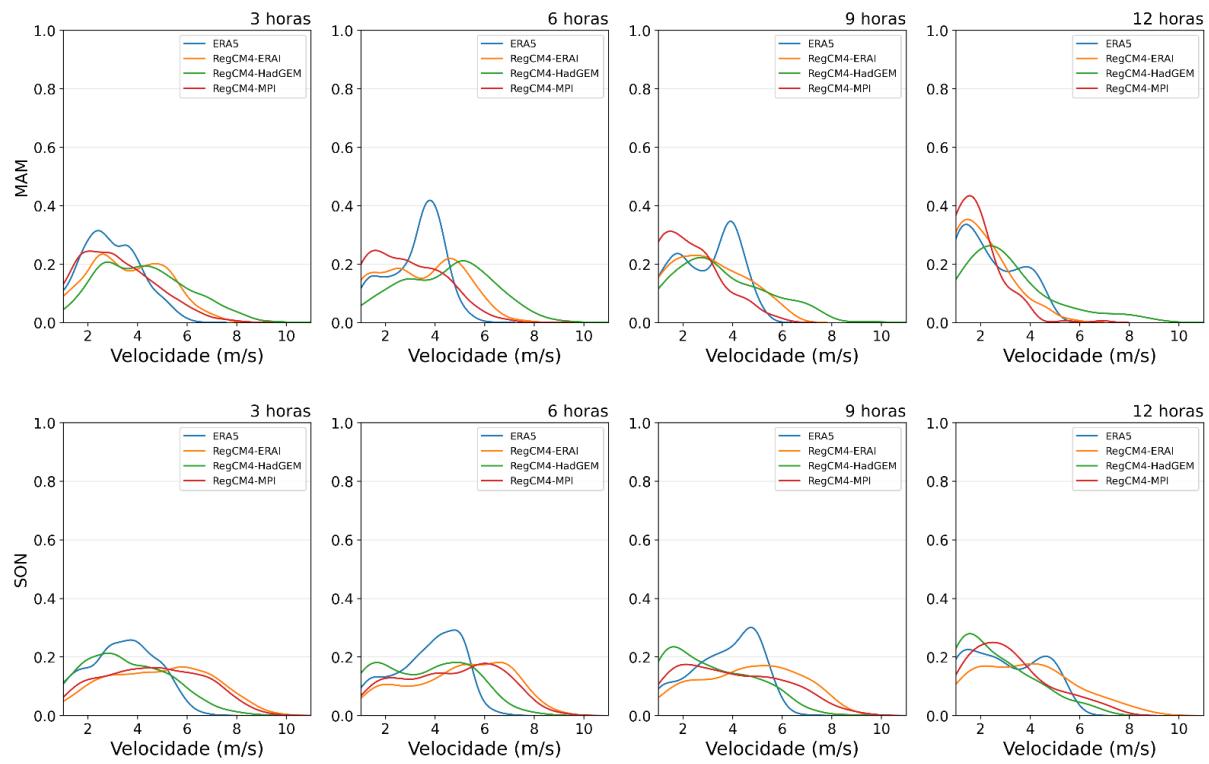


Figura A.24 - Semelhante à Figura A.17 para Guanambi.

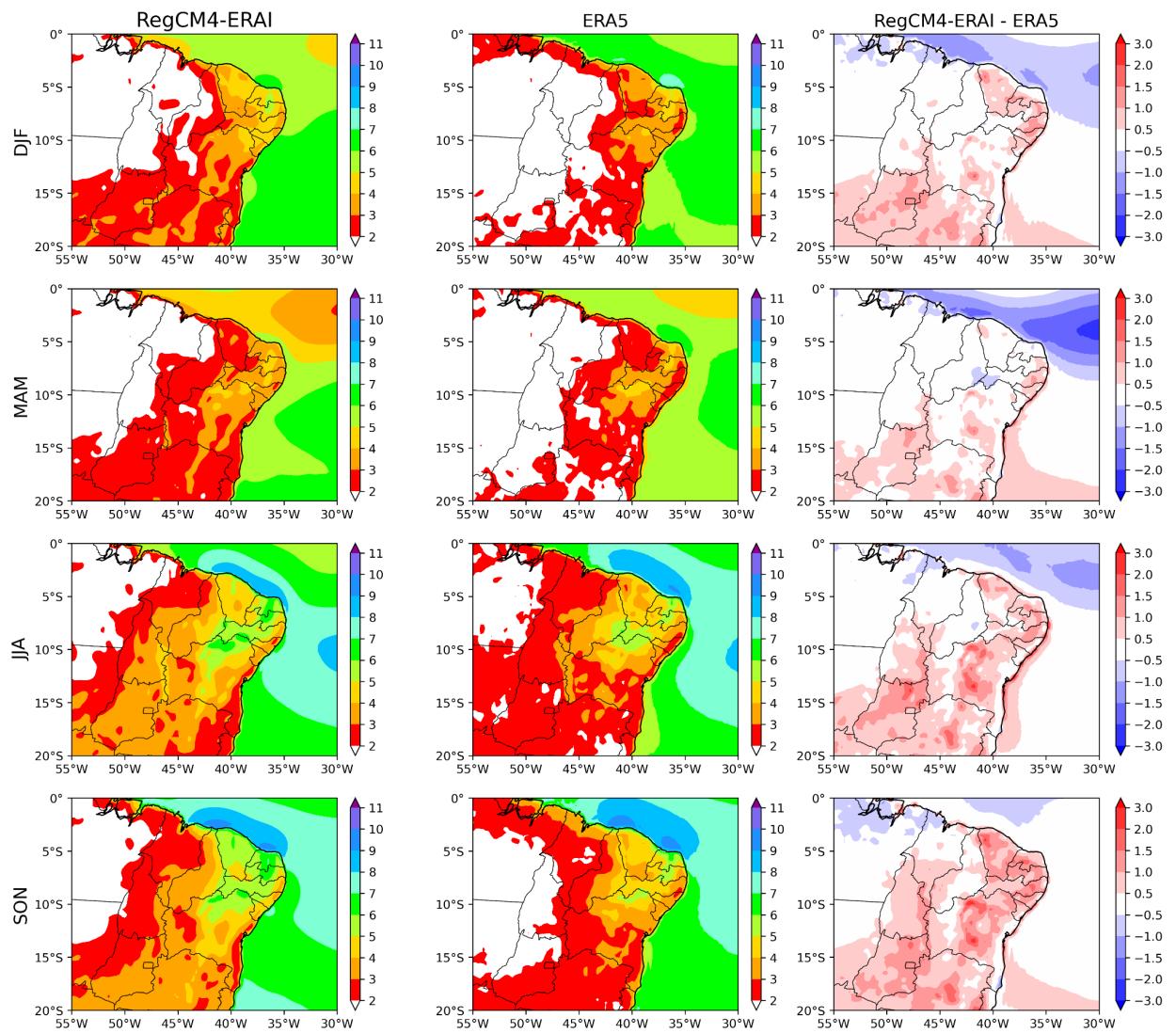


Figura A.25 - Magnitude média sazonal do vento (m/s) a 10 m no período 1979-2014 para RegCM4-ERA5 (esquerda) e ERA5 (centro) e diferença entre RegCM4-ERA5 e ERA5 (direita).

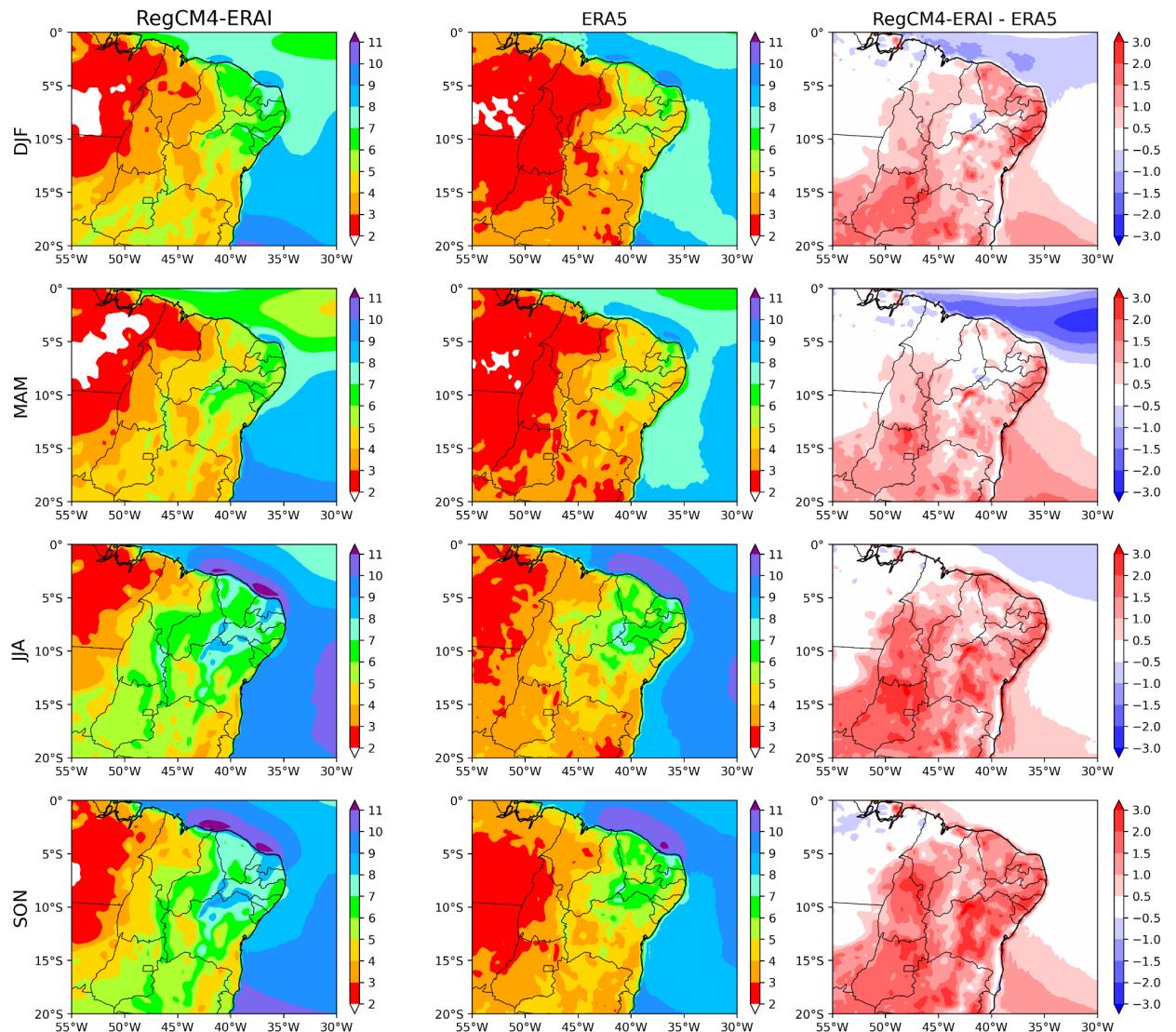


Figura A.26 - Limiar de extremos de magnitude do vento (m/s) a 10 m de altura (percentil de 90%) no período 1979-2014 para RegCM4-ERAI (esquerda), ERA5 (centro) e diferença entre RegCM4-ERAI e ERA5 (direita).