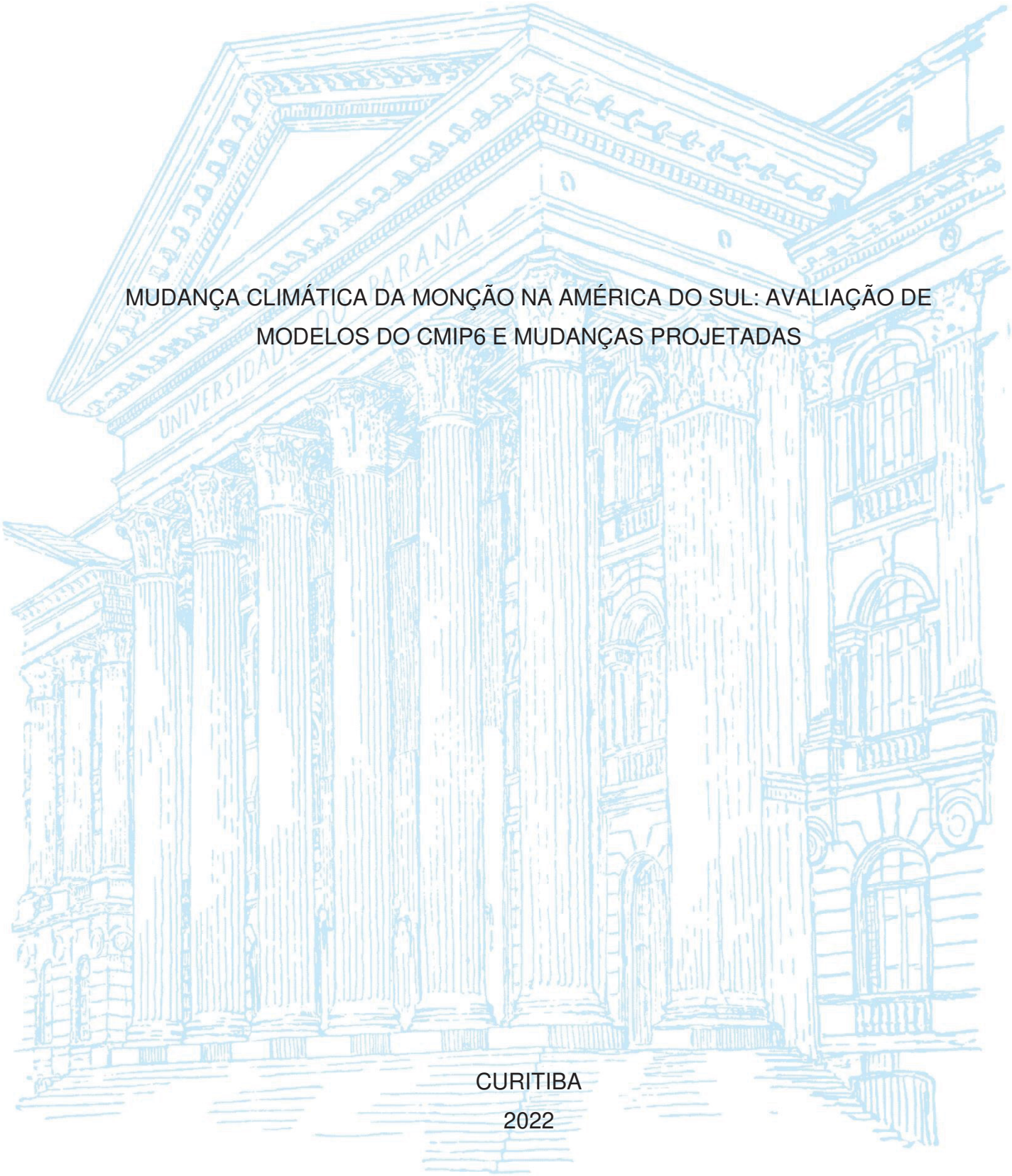
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DAYANE PADOAN



MUDANÇA CLIMÁTICA DA MONÇÃO NA AMÉRICA DO SUL: AVALIAÇÃO DE MODELOS DO CMIP6 E MUDANÇAS PROJETADAS

CURITIBA

2022

DAYANE PADOAN

MUDANÇA CLIMÁTICA DA MONÇÃO NA AMÉRICA DO SUL: AVALIAÇÃO DE MODELOS DO CMIP6 E MUDANÇAS PROJETADAS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Alice Marlene Grimm

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Padoan, Dayane
Mudança climática da monção na América do Sul: avaliação de modelos do CMIP6 e mudanças projetadas / Dayane Padoan. – Curitiba, 2022.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Alice Marlene Grimm

1. Mudanças climáticas. 2. Ventos. (Monções). .I. Grimm, Alice Marlene. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **DAYANE PADOAN** intitulada: **Mudança Climática da Monção na América do Sul: Avaliação de Modelos do CMIP6 e Mudanças Projetadas** , sob orientação da Profa. Dra. ALICE MARLENE GRIMM, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 29 de Novembro de 2022.

Assinatura Eletrônica
01/12/2022 09:08:35.0
ALICE MARLENE GRIMM
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
30/11/2022 09:58:56.0
REINALDO BOMFIM DA SILVEIRA
Avaliador Externo (SIMEPAR)

Assinatura Eletrônica
30/11/2022 08:30:11.0
MICHAEL MANNICH
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 239225
Para autenticar este documento/assinatura, acesse https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp e insira o codigo 239225

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, a Deus pela vida e pelas bênçãos incontáveis que recebo todos os dias.

Agradeço ao meu companheiro e melhor amigo, Henrique, por me incentivar, por me catapultar em direção às minhas aspirações, por acreditar em mim e na minha capacidade, por me amar. O seu apoio foi essencial ao longo de todo este trabalho.

Agradeço à minha orientadora, Profa. Alice Marlene Grimm. Obrigada por seus ensinamentos, pelas orientações, pelas críticas e incentivos, por toda ajuda, por se preocupar de fato com meu trabalho e comigo. Obrigada por acreditar em mim. Sinto muito orgulho em ser sua aluna.

Agradeço à minha família. Minha mãe Célia e meu pai Luiz, pela educação que me proporcionaram e pelo amor que me oferecem. Minha irmã Camila, por todo apoio, pelo exemplo e pelo amor. Agradeço também à minha família curitibana: minha sogra Evely, meu cunhado Fernando e meu sogro Lélio. Obrigada por estarem sempre ao meu lado e por todo carinho.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Meteorologia da UFPR por todo apoio. Em especial, a meu amigo Paulo Vinicius pela ajuda com a utilização dos programas computacionais. Obrigada por toda disposição e apoio, mesmo diante de uma pandemia. Também em especial, agradeço a minha amiga Luana por toda ajuda, apoio e amizade ao longo desses anos.

Agradeço ao PPGEA por todo apoio e auxílio. Em especial, à coordenação e à secretaria por sempre ajudarem no que foi preciso.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Esta pesquisa foi parcialmente desenvolvida no âmbito de um projeto do Programa de P&D da ENGIE BRASIL ENERGIA S.A. e COMPANHIA ENERGETICA ESTREITO, regulado pela ANEEL. Assim, agradeço também à ENGIE BRASIL ENERGIA S.A. pelo suporte financeiro.

Reconheço a contribuição do *Word Climate Research Programme* (WCRP) que, através do *Working Group on Coupled Modelling*, coordenou e promoveu o CMIP6. Agradeço aos grupos de modelagem climática por produzirem e disponibilizarem os resultados de seus modelos, ao *Earth System Grid Federation*

(ESGF) por arquivar os dados e fornecer acesso e às múltiplas agências de fomento que apoiam o CMIP6 e o ESGF.

Agradeço ainda pelos dados de reanálise do NCEP proporcionados por NOAA/OAR/ESRL PSL, Boulder, Colorado, USA.

“Quantas vezes um homem precisará olhar para cima
Antes que ele possa ver o céu?”
(Bob Dylan)

RESUMO

O sistema de monção da América do Sul (SMAS) é caracterizado por produzir alta precipitação durante o verão e seca no inverno austral sobre a maior parte do Brasil. Por ser responsável pela estação chuvosa e a maior parcela da precipitação anual, o conhecimento deste sistema, sua variabilidade e provável comportamento futuro é de grande relevância para o desenvolvimento socioeconômico da América do Sul (AS), visto que numerosos setores dependem do clima. O presente trabalho avalia como modelos participantes da sexta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6), que participam do Relatório de Avaliação 6 do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, em inglês), reproduzem o SMAS, e quais são as mudanças climáticas previstas para este sistema no clima futuro. Além da introdução, que apresenta justificativa, contexto e objetivos, é feita uma revisão da literatura sobre o assunto, abordando desde as diferentes definições da monção até como modelos climáticos que participaram das últimas versões do CMIP simulam esse sistema. Os resultados alcançados são dispostos em quatro capítulos. O primeiro avalia como os modelos do CMIP6 representam o SMAS no clima presente. O segundo e terceiro apresentam as projeções do SMAS pelos modelos, de acordo com os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Nesses três capítulos, são apresentadas climatologias de precipitação e circulação atmosférica, com resolução mensal e sazonal, simuladas pelos modelos analisados, e suas comparações com dados observados e dados de reanálise, no caso das simulações históricas. Além disso, modos de variabilidade de precipitação e temperatura da superfície do mar (TSM) são determinados, a fim de verificar a simulação da variabilidade climática pelos modelos, especialmente a associada ao El Niño-Oscilação Sul (ENOS). As análises revelam que a média do conjunto de todos os modelos e o modelo IPSL-CM6A-LR possuem melhor desempenho ao reproduzir o clima presente da AS. Já o modelo CESM2, é o melhor em representar o ENOS no clima presente. Embora a média do conjunto de todos os modelos seja melhor na reprodução do clima, em aspectos específicos, como a representação do ENOS, alguns modelos mostram melhor desempenho do que a média do conjunto. Assim, embora na análise de previsões, a média de um conjunto de rodadas de um certo modelo é melhor do que uma única rodada, a média de um conjunto de modelos, nem sempre fornece melhor resultado do que o melhor modelo. Diferenças entre clima futuro e presente também são exploradas ao abordar resultados de projeções. O quarto capítulo de resultados apresenta os principais impactos do ENOS no clima presente e no clima futuro nos dois cenários. No futuro, o aumento da TSM tropical devido às mudanças climáticas será similar ao padrão El Niño e, portanto, os impactos na precipitação da AS serão característicos da fase positiva do ENOS. As análises apresentadas pretendem contribuir para o estudo dos impactos causados por ações humanas na mudança climática da monção na América do Sul.

Palavras-chave: América do Sul; Monção; Mudanças climáticas; CMIP6.

ABSTRACT

The South American monsoon system (SMAS) is characterized by high precipitation during summer and dry austral winter over most of Brazil. Since it is responsible for the rainy season and the largest portion of annual precipitation, knowing this system, its variability and likely future behavior is of great relevance for the socioeconomic development of South America (SA), as many sectors depend on the climate. This work aims to evaluate how participating models of the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6), participating in the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), reproduce the SAMS, and what are the predicted anthropogenic climate changes for this system in the future climate. In addition to the introduction, which presents justification, context and objectives, a review of the literature on the subject is made, addressing from the different definitions of the monsoon to how climate models that participated in the latest versions of CMIP simulate this system. The results achieved are arranged in four chapters. The first one, assess how the CMIP6 models represent SAMS in the current climate; the second and third one, present the projections of the SAMS by the models according to the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. In these three chapters, precipitation and atmospheric circulation climatologies are presented, with monthly and seasonal resolution, simulated by the analyzed models, and their comparisons with observed data and reanalysis data, in the case of historical simulations. Furthermore, precipitation and sea surface temperature (SST) modes of variability are determined in order to verify the simulation of climate variability by the models, especially that associated with the El Niño-Southern Oscillation (ENSO). The analyzes reveal that the multi-model ensemble mean and the model IPSL-CM6A-LR perform better in reproducing the present SA climate. The model CESM2 is the best at representing ENSO in the present climate. Although the multi-model ensemble mean is better at reproducing climate, in specific aspects, such as the representation of ENSO, some models show better performance than the ensemble mean. Thus, although in forecast analysis, the average of a set of runs of a certain model is better than a single run, the average of a set of models does not always provide better results than the best model. Differences between future and present climate are also explored when addressing projection results. The fourth chapter of results presents the main impacts of ENSO on the present climate and on the future climate in both scenarios. In the future, the increase in tropical SST due to climate change will be similar to the El Niño pattern and therefore the impacts on SA precipitation will be characteristic of the positive phase of ENSO. These analyzes intend to contribute to the study of the impacts caused by human activities on the climate change of the monsoon in South America.

Keywords: South America; Monsoon; Climate change; CMIP6.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REGIÕES AFETADAS POR MONÇÕES DE ACORDO COM RAMAGE (1971, apud GAN; RODRIGUES; RAO, 2009). 52
FIGURA 2 – POSIÇÃO DA ZCIT MAIS AO NORTE EM JULHO (INVERNO AUSTRAL) E MAIS AO SUL EM JANEIRO (VERÃO AUSTRAL). 53
FIGURA 3 – MÉDIA CLIMATOLÓGICA PARA O ALCANCE ANUAL DA PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO UMA COMBINAÇÃO DE DADOS QUE COBREM O PERÍODO DE 1948 A 2003. 53
FIGURA 4 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL, USANDO DADOS ENTRE 1950 E 2005. 54
FIGURA 5 – TOPO: CIRCULAÇÃO EM 850 hPa E PRESSÃO AO NÍVEL DO MAR PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO. BASE: CIRCULAÇÃO EM 200 hPa E RADIAÇÃO DE ONDA LONGA EMERGENTE PARA C) PRIMAVERA E D) VERÃO. A BAIXA DO CHACO É INDICADA POR BC E A ALTA DA BOLÍVIA, POR AB. 55
FIGURA 6 – INDICAÇÃO DAS PRINCIPAIS REGIÕES AFETADAS POR ENOS NA AS. 59
FIGURA 7 – DIFERENÇA ENTRE AS CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO DE VERÃO E INVERNO (VERÃO - INVERNO) PARA CADA HEMISFÉRIO, DIMENSIONADA PELA TAXA ANUAL DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA E CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA EM 850 hPa PARA: A) DADOS OBSERVADOS E B) MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS DO CMIP6, PARA O PERÍODO DE 1979 A 2014. 70
FIGURA 8 – *FACTOR LOADINGS* (ESQUERDA) E RESPECTIVOS *FACTOR SCORES* (DIREITA) DO MODO ENOS CALCULADOS COM RESULTADOS DO MODELO MRI-ESM2-0 NO CENÁRIO SSP5-8.5 COM A) TENDÊNCIA NOS DADOS INICIAIS E B) SEM TENDÊNCIA NOS DADOS INICIAIS. 88
FIGURA 9 – CLIMATOLOGIA MENSAL DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO DADOS DO GPCC (1979-2014). 100
FIGURA 10 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO DADOS DO GPCC (1979-2014). 101

FIGURA 11 – CLIMATOLOGIA MENSAL DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO DADOS DE ESTAÇÕES (1979-2014). 102
FIGURA 12 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO DADOS DE ESTAÇÕES (1979-2014). 103
FIGURA 13 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO ACCESS-ESM1-5 NO CLIMA PRESENTE (1979-2014). 104
FIGURA 14 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MRI-ESM2-0 NO CLIMA PRESENTE (1979-2014). 105
FIGURA 15 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CANESM5 NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).....105
FIGURA 16 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO KACE-1-0-G NO CLIMA PRESENTE (1979-2014). 106
FIGURA 17 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).....106
FIGURA 18 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CNRM-CM6-1 NO CLIMA PRESENTE (1979-2014). 107
FIGURA 19 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR NO CLIMA PRESENTE (1979-2014). 108
FIGURA 20 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).....109
FIGURA 21 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MIROC6 NO CLIMA PRESENTE (1979-2014). 109
FIGURA 22 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MPI-ESM1-2-HR NO CLIMA PRESENTE (1979-2014). 110
FIGURA 23 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG NO CLIMA PRESENTE (1979-2014). 110
FIGURA 24 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS MODELOS NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).....111
FIGURA 25 – CLIMATOLOGIA MENSAL DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS (850 hPa) PARA DADOS DO NCEP/NCAR.....112
FIGURA 26 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS (850 hPa) PARA DADOS DO NCEP/NCAR.....113

FIGURA 27 – CLIMATOLOGIA MENSAL DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS (200 hPa) PARA DADOS DO NCEP/NCAR.....114
FIGURA 28 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS (200 hPa) PARA DADOS DO NCEP/NCAR.....115
FIGURA 29 – CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS DE MODELOS QUE SIMULAM EM OUTUBRO (EC-EARTH3-VEG) E NOVEMBRO (MRI-ESM2-0) A ALTERAÇÃO NA DIREÇÃO DO VENTO EQUATORIAL QUE INCIDE NO CONTINENTE. 117
FIGURA 30 – CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS DE MODELOS QUE MOSTRAM ALTERAÇÕES MAIS EVIDENTES NA VELOCIDADE DO VENTO NO VERÃO AUSTRAL. 118
FIGURA 31 – EXEMPLOS DE CAMPOS DE VENTO EM ALTOS NÍVEIS DE MODELOS QUE MOSTRAM ALTERAÇÕES NA CIRCULAÇÃO ANTICILÔNICA NO VERÃO AUSTRAL, NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).....119
FIGURA 32 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO DA MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS E DE DADOS OBSERVADOS (GPCC). 137
FIGURA 33 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM 850 hPa DA MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS E DE DADOS DA REANÁLISE. 138
FIGURA 34 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM 200 hPa DA MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS E DE DADOS DA REANÁLISE. 138
FIGURA 35 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO DO MODELO IPSL-CM6A-LR E DE DADOS OBSERVADOS (GPCC). 139
FIGURA 36 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM 850 hPa DO MODELO IPSL-CM6A-LR E DE DADOS DA REANÁLISE.140
FIGURA 37 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM 200 hPa DO MODELO IPSL-CM6A-LR E DE DADOS DA REANÁLISE.140
FIGURA 38 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO DO MODELO CNRM-CM6-1 E DOS DADOS OBSERVADOS (GPCC).141
FIGURA 39 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM 850 hPa DO MODELO CNRM-CM6-1 E DE DADOS DA REANÁLISE. .142

FIGURA 40 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM 200 hPa DO MODELO CNRM-CM6-1 E DE DADOS DA REANÁLISE. .142
FIGURA 41 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO USANDO DADOS DE ESTAÇÕES E DADOS DO GPCC. 144
FIGURA 42 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NA PRIMAVERA AUSTRAL PARA DADOS DO GPCC (1979-2014). 146
FIGURA 43 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NO VERÃO AUSTRAL PARA DADOS DO GPCC (1979-2014). 146
FIGURA 44 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS MODOS DIPOLO DE NOVEMBRO E JANEIRO PARA DADOS DO GPCC (1979-2014)..147
FIGURA 45 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NA PRIMAVERA PARA DADOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS (1979-2014). .148
FIGURA 46 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NO VERÃO PARA DADOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS (1979-2014). 149
FIGURA 47 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS MODOS DIPOLO DE NOVEMBRO E JANEIRO PARA DADOS DE ESTAÇÕES (1979-2014). 150
FIGURA 48 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS MODOS DIPOLO DA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO, D) JANEIRO, DE DADOS DO GPCC DE 1960 A 2000. 152
FIGURA 49 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS MODOS DIPOLO DA A)

PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO, D) JANEIRO, DE DADOS DE ESTAÇÕES DE 1960 A 2000. 153
FIGURA 50 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS MODOS DIPOLO DA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO, D) JANEIRO, DE DADOS DO GPCC DE 1960 A 2014. 154
FIGURA 51 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS MODOS DIPOLO DA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO, D) JANEIRO, DE DADOS DE ESTAÇÕES DE 1960 A 2014. 155
FIGURA 52 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS DOIS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NA PRIMAVERA PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG. 157
FIGURA 53 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS DOIS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NO VERÃO PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG. 157
FIGURA 54 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS DOIS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NA PRIMAVERA PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR (1979-2014). 158
FIGURA 55 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS DOIS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NO VERÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR (1979-2014). 159
FIGURA 56 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS DOIS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NA PRIMAVERA PARA O MODELO KACE-1-0-G (1979-2014).....160
FIGURA 57 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS DOIS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NO VERÃO PARA O MODELO KACE-1-0-G (1979-2014). 160

FIGURA 58 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA DADOS DO HADISST1.....162
FIGURA 59 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA DADOS DO HADISST1.....163
FIGURA 60 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR. 165
FIGURA 61 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR. 166
FIGURA 62 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA O MODELO CESM2.....167
FIGURA 63 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA O MODELO CESM2.....168
FIGURA 64 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS. .170
FIGURA 65 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS. .171
FIGURA 66 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE

QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO CANESM5. 173
FIGURA 67 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO CNRM-CM6-1. 173
FIGURA 68 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO EC-EARTH3-VEG. 174
FIGURA 69 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO HADGEM3-GC31-LL. 175
FIGURA 70 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO KACE-1-0-G. 175
FIGURA 71 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MPI-ESM1-2-HR. 176
FIGURA 72 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MRI-ESM2-0. 176

FIGURA 73 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MIROC6. 177
FIGURA 74 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA RESULTADOS DA MÉDIA DO CONJUNTO DE SETE MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE. 185
FIGURA 75 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA RESULTADOS DA MÉDIA DO CONJUNTO DE SETE MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE. 186
FIGURA 76 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE O NÚCLEO DA MONÇÃO (PAINÉIS À DIREITA), NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA. 188
FIGURA 77 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A REGIÃO DE MAIOR VARIABILIDADE DA MONÇÃO (PAINÉIS À DIREITA) NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA. 189
FIGURA 78 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE O CENTRO-OESTE DO BRASIL (PAINÉIS À DIREITA) NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA. 190
FIGURA 79 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE O CENTRO DO BRASIL (PAINÉIS À DIREITA) NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA. 191
FIGURA 80 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE O SUL DO BRASIL (PAINÉIS À DIREITA) NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA. 192
FIGURA 81 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A PARTE LESTE DO NORTE DO BRASIL (PAINÉIS À DIREITA) NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA.....193

FIGURA 82 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A PARTE OESTE DO NORTE DO BRASIL (PAINÉIS À DIREITA) NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA.....194
FIGURA 83 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO ACCESS-ESM1-5 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.....196
FIGURA 84 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CANESM5 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.....196
FIGURA 85 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.....197
FIGURA 86 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CNRM-CM6-1 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.....198
FIGURA 87 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.....198
FIGURA 88 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.....199
FIGURA 89 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL NO

CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.....200
FIGURA 90 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO KACE-1-0-G NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.....200
FIGURA 91 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MIROC6 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.....201
FIGURA 92 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MPI-ESM1-2-HR NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.....201
FIGURA 93 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MRI-ESM2-0 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.....202
FIGURA 94 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.....203
FIGURA 95 – CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS DE MODELOS QUE SIMULAM EM OUTUBRO E NOVEMBRO A ALTERAÇÃO NA DIREÇÃO DO VENTO EQUATORIAL QUE INCIDE NO CONTINENTE (CENÁRIO SSP2-4.5).....204
FIGURA 96 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS (850 hPa) PARA O MODELO

ACCESS-ESM1-5 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE. 205
FIGURA 97 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS (850 hPa) PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE. 205
FIGURA 98 – EXEMPLOS DE CAMPOS DE VENTO EM ALTOS NÍVEIS DE MODELOS QUE MOSTRAM ALTERAÇÕES NA CIRCULAÇÃO ANTICILÔNICA NO VERÃO AUSTRAL NO CENÁRIO SSP2-4.5...206
FIGURA 99 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO ACCESS-ESM1-5. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO. 207
FIGURA 100 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO COM ANOMALIA EM CESA NA PRIMAVERA PARA O MODELO CANESM5. B) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO CANESM5. 208
FIGURA 101 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO CESM2. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO. 208
FIGURA 102 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO CNRM-CM6-1. 209

FIGURA 103 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO. 209
FIGURA 104 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL. B) MESMO QUE (A), MAS PARA DOIS MODOS DO VERÃO. 210
FIGURA 105 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO COM ANOMALIA EM CESA NA PRIMAVERA PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR. B) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR. 210
FIGURA 106 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO COM ANOMALIA EM CESA NA PRIMAVERA PARA O MODELO KACE-1-0-G. 211
FIGURA 107 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO MPI-ESM1-2-HR. 211
FIGURA 108 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO MRI-ESM2-0. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO. 212
FIGURA 109 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS

DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP2-4.5. 214
FIGURA 110 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP2-4.5. 215
FIGURA 111 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE 10 MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP2-4.5..... 217
FIGURA 112 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE 10 MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP2-4.5..... 218
FIGURA 113 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE TIVERAM MELHOR DESEMPENHO AO SIMULAR O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP2-4.5. 220
FIGURA 114 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE TIVERAM MELHOR DESEMPENHO AO SIMULAR O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP2-4.5. 221
FIGURA 115 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO CNRM-CM6-1 NO CENÁRIO SSP2-4.5..... 223

FIGURA 116 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO EC-EARTH3-VEG NO CENÁRIO SSP2-4.5. 224
FIGURA 117 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CENÁRIO SSP2-4.5.....224
FIGURA 118 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO KACE-1-0-G NO CENÁRIO SSP2-4.5. 225
FIGURA 119 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MPI-ESM1-2-HR NO CENÁRIO SSP2-4.5. 225
FIGURA 120 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MRI-ESM2-0 NO CENÁRIO SSP2-4.5. 226
FIGURA 121 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO CANESM5 NO CENÁRIO SSP2-4.5. 227
FIGURA 122 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS

SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP2-4.5.....227
FIGURA 123 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MIROC6 NO CENÁRIO SSP2-4.5. 228
FIGURA 124 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR. 229
FIGURA 125 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO DO MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP2-4.5 E NAS RODADAS HISTÓRICAS. 230
FIGURA 126 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR. 231
FIGURA 127 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS, PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR. 232
FIGURA 128 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR. 232
FIGURA 129 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2. 233
FIGURA 130 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO DO MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP2-4.5 E NAS RODADAS HISTÓRICAS. 234
FIGURA 131 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2....235
FIGURA 132 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2....236

FIGURA 133 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2. 237
FIGURA 134 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS. 238
FIGURA 135 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS NO CENÁRIO SSP2-4.5 E NAS RODADAS HISTÓRICAS 239
FIGURA 136 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS. 240
FIGURA 137 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS. 240
FIGURA 138 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA RESULTADOS DA MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS. 241
FIGURA 139 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA RESULTADOS DA MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE. 242
FIGURA 140 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE NO CENÁRIO SSP2-4.5 E NAS RODADAS HISTÓRICAS. 243
FIGURA 141 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO

DOS 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.....244
FIGURA 142 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.....245
FIGURA 143 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE. 245
FIGURA 144 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO ACCESS-ESM1-5 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.....247
FIGURA 145 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CANESM5 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.....247
FIGURA 146 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.....248
FIGURA 147 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CNRM-CM6-1 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.....249
FIGURA 148 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS

CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.....249
FIGURA 149 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.....250
FIGURA 150 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.....251
FIGURA 151 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO KACE-1-0-G NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.....251
FIGURA 152 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MIROC6 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.....252
FIGURA 153 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MPI-ESM1-2-HR NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.....253
FIGURA 154 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MRI-ESM2-0 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.....253
FIGURA 155 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS NO

CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE. 254
FIGURA 156 – CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS DE MODELOS QUE SIMULAM EM SETEMBRO, OUTUBRO E NOVEMBRO A ALTERAÇÃO NA DIREÇÃO DO VENTO EQUATORIAL QUE INCIDE NO CONTINENTE (CENÁRIO SSP5-8.5). 255
FIGURA 157 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS (850 hPa) PARA O MODELO ACCESS-ESM1-5 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE. 256
FIGURA 158 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS (850 hPa) PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE. 257
FIGURA 159 – EXEMPLOS DE CAMPOS DE VENTO EM ALTOS NÍVEIS DE MODELOS QUE MOSTRAM ALTERAÇÕES NA CIRCULAÇÃO ANTICILÔNICA NO VERÃO AUSTRAL, NO CENÁRIO SSP5-8.5. . 258
FIGURA 160 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS (200 hPa) PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE. 259
FIGURA 161 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO ACCESS-ESM1-5 NO CENÁRIO SSP5-8.5. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO. 260
FIGURA 162 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE

DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO CANESM5 NO CENÁRIO SSP5-8.5. ..261
FIGURA 163 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO CNRM-CM6-1 NO CENÁRIO SSP5-8.5. 261
FIGURA 164 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO TERCEIRO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO PRIMAVERA PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP5-8.5. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO. 262
FIGURA 165 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG NO CENÁRIO SSP5-8.5. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO. 262
FIGURA 166 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CENÁRIO SSP5-8.5.....263
FIGURA 167 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO KACE-1-0-G NO CENÁRIO SSP5-8.5. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO.263
FIGURA 168 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP5-8.5. 264

FIGURA 169 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO MIROC6 NO CENÁRIO SSP5-8.5.....264
FIGURA 170 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO MPI-ESM1-2-HR NO CENÁRIO SSP5-8.5. 264
FIGURA 171 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO MRI-ESM2-0 NO CENÁRIO SSP5-8.5. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO.265
FIGURA 172 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP5-8.5.....267
FIGURA 173 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP5-8.5. 268
FIGURA 174 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE 10 MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP5-8.5.....270
FIGURA 175 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE 10 MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP5-8.5.....271
FIGURA 176 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS

DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA RESULTADOS DA MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE TIVERAM MELHOR DESEMPENHO AO SIMULAR O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP5-8.5. 273
FIGURA 177 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA RESULTADOS DA MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE TIVERAM MELHOR DESEMPENHO AO SIMULAR O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP5-8.5. 274
FIGURA 178 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO CNRM-CM6-1 NO CENÁRIO SSP5-8.5 276
FIGURA 179 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO EC-EARTH3-VEG NO CENÁRIO SSP5-8.5. 276
FIGURA 180 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CENÁRIO SSP5-8.5. 277
FIGURA 181 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO KACE-1-0-G NO CENÁRIO SSP5-8.5. 277
FIGURA 182 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS

SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS ABAIXO) SIMULADOS PELO MODELO MPI-ESM1-2-HR NO CENÁRIO SSP5-8.5. 278
FIGURA 183 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MRI-ESM2-0 NO CENÁRIO SSP5-8.5. 278
FIGURA 184 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO CANESM5 NO CENÁRIO SSP5-8.5. 279
FIGURA 185 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP5-8.5.....280
FIGURA 186 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MIROC6 NO CENÁRIO SSP5-8.5. 280
FIGURA 187 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR. 281
FIGURA 188 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP5-8.5 (AZUL ESCURO), NO CENÁRIO SSP2-4.5 (AZUL CLARO TRACEJADO) E NAS RODADAS HISTÓRICAS (AZUL CLARO CONTÍNUO). 283
FIGURA 189 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR. 284

FIGURA 190 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR. 285
FIGURA 191 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR. 285
FIGURA 192 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2. 286
FIGURA 193 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP5-8.5 (VERMELHO ESCURO), NO CENÁRIO SSP2-4.5 (VERMELHO CLARO TRACEJADO) E NAS RODADAS HISTÓRICAS (VERMELHO CLARO CONTÍNUO). 287
FIGURA 194 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2....289
FIGURA 195 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2....289
FIGURA 196 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2.....290
FIGURA 197 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS. 291
FIGURA 198 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS NO CENÁRIO SSP5-8.5 (VERDE ESCURO), NO CENÁRIO SSP2-4.5 (VERDE CLARO TRACEJADO) E NAS RODADAS HISTÓRICAS (VERDE CLARO CONTÍNUO).....292
FIGURA 199 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO

CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS. 294
FIGURA 200 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS. 294
FIGURA 201 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS.....295
FIGURA 202 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE. 296
FIGURA 203 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE NO CENÁRIO SSP5-8.5 (CINZA ESCURO), NO CENÁRIO SSP2-4.5 (CINZA CLARO TRACEJADO) E NAS RODADAS HISTÓRICAS (CINZA CLARO CONTÍNUO). 297
FIGURA 204 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.....299
FIGURA 205 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.....299
FIGURA 206 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE. 300

FIGURA 207 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO DO GPCC E CP DO MODO ENOS DO HADISST1 PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO. 302
FIGURA 208 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO PARA DADOS DO GPCC PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO.....304
FIGURA 209 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO DE DADOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E CP DO MODO ENOS DO HADISST1 PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO. 305
FIGURA 210 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO PARA DADOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO. 305
FIGURA 211 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E CP DO MODO ENOS SIMULADOS NO CLIMA PRESENTE PELO MODELO CESM2 PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO. 306
FIGURA 212 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E CP DO MODO ENOS SIMULADOS NO CENÁRIO SSP5-8.5 PELO MODELO CESM2 PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO. 307
FIGURA 213 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CLIMA PRESENTE PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO. 308
FIGURA 214 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP2-4.5 PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO. 309
FIGURA 215 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP5-8.5 PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO. 310
FIGURA 216 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E CP DO MODO ENOS SIMULADOS NO CLIMA PRESENTE PELA MÉDIA DO CONJUNTO DOS 10 MODELOS QUE REPRODUZEM ENOS PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO. 311
FIGURA 217 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E CP DO MODO ENOS SIMULADOS NO CLIMA PRESENTE PELA MÉDIA DO CONJUNTO

DOS 7 MELHORES MODELOS EM REPRODUZIR ENOS PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO. 311
FIGURA 218 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E CP DO MODO ENOS SIMULADOS NO CENÁRIO SSP5-8.5 PELA MÉDIA DO CONJUNTO DOS 10 MODELOS QUE REPRODUZEM ENOS PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO. 312
FIGURA 219 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E CP DO MODO ENOS SIMULADOS NO CENÁRIO SSP5-8.5 PELA MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MELHORES MODELOS EM REPRODUZIR ENOS PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO. 313
FIGURA 220 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NO CLIMA PRESENTE PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 10 MODELOS QUE REPRODUZEM O ENOS, PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO. 314
FIGURA 221 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NO CLIMA PRESENTE PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MELHORES MODELOS EM REPRODUZIR ENOS, PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO. 315
FIGURA 222 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NO CENÁRIO SSP2-4.5 PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 10 MODELOS QUE REPRODUZEM O ENOS, PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO. 316
FIGURA 223 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NO CENÁRIO SSP2-4.5 PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MELHORES MODELOS EM REPRODUZIR ENOS, PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO. 317
FIGURA 224 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NO CENÁRIO SSP5-8.5 PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 10 MODELOS QUE REPRODUZEM O ENOS, PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO. 318
FIGURA 225 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NO CENÁRIO SSP5-8.5 PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MELHORES MODELOS EM REPRODUZIR ENOS, PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO. 319

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MODELOS UTILIZADOS DO CMIP6. (Continua).....78
TABELA 2 – ÍNDICES (1-r) OBTIDOS DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ESPACIAL (r) ENTRE PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA (GPCC) E SIMULADA PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014, APÓS SEREM PADRONIZADOS PELA MÉDIA DE (1-r) PARA CADA MÊS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 120
TABELA 3 – ÍNDICES (1-r) OBTIDOS DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ESPACIAL (r) ENTRE O COMPONENTE ZONAL DO VENTO EM 850 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014, APÓS SEREM PADRONIZADOS PELA MÉDIA DE (1-r) PARA CADA MÊS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 121
TABELA 4 – ÍNDICES (1-r) OBTIDOS DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ESPACIAL (r) ENTRE O COMPONENTE ZONAL DO VENTO EM 200 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014, APÓS SEREM PADRONIZADOS PELA MÉDIA DE (1-r) PARA CADA MÊS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 122
TABELA 5 – ÍNDICES (1-r) OBTIDOS DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ESPACIAL (r) ENTRE O COMPONENTE MERIDIONAL DO VENTO EM 850 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014, APÓS SEREM PADRONIZADOS PELA MÉDIA DE (1-r) PARA CADA MÊS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 123
TABELA 6 – ÍNDICES (1-r) OBTIDOS DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ESPACIAL (r) ENTRE O COMPONENTE MERIDIONAL DO VENTO EM 200 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014, APÓS SEREM PADRONIZADOS PELA MÉDIA DE (1-r) PARA CADA MÊS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 124

TABELA 7 – RMSE PADRONIZADO ENTRE PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA (GPCC) E SIMULADA PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.....125
TABELA 8 – RMSE PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE ZONAL DO VENTO EM 850 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.....126
TABELA 9 – RMSE PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE ZONAL DO VENTO EM 200 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.....127
TABELA 10 – RMSE PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE MERIDIONAL DO VENTO EM 850 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.....128
TABELA 11 – RMSE PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE MERIDIONAL DO VENTO EM 200 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.....129
TABELA 12 – BIAS PADRONIZADO ENTRE PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA (GPCC) E SIMULADA PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. VALORES DESTACADOS EM AMARELO REFEREM-SE A VALOR NEGATIVO

DO BIAS REAL. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 130
TABELA 13 – BIAS PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE ZONAL DO VENTO EM 850 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. VALORES DESTACADOS EM AMARELO REFEREM-SE A VALOR NEGATIVO DO BIAS REAL. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 131
TABELA 14 – BIAS PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE ZONAL DO VENTO EM 200 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. VALORES DESTACADOS EM AMARELO REFEREM-SE A VALOR NEGATIVO DO BIAS REAL. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 132
TABELA 15 – BIAS PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE MERIDIONAL DO VENTO EM 850 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. VALORES DESTACADOS EM AMARELO REFEREM-SE A VALOR NEGATIVO DO BIAS REAL. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 133
TABELA 16 – BIAS PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE MERIDIONAL DO VENTO EM 200 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. VALORES DESTACADOS EM AMARELO REFEREM-SE A VALOR NEGATIVO DO BIAS REAL. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 134
TABELA 17 – ÍNDICE GERAL POR VARIÁVEL PARA CADA MODELO E MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS. AS MÉDIAS NA ÚLTIMA COLUNA SÃO OS ÍNDICES GERAIS (IG). 135

TABELA 18 – CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS MODELOS NA REPRESENTAÇÃO DO CLIMA PRESENTE. 136
TABELA 19 – ÍNDICES MENSAIS OBTIDOS DA COMPARAÇÃO DE DADOS DO GPCC COM DADOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS. O CÁLCULO DO BIAS É FEITO COMO (DADOS DE ESTAÇÕES - GPCC). 143
TABELA 20 – ÍNDICES SAZONAIS OBTIDOS DA COMPARAÇÃO DE DADOS DO GPCC COM DADOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS. 143
TABELA 21 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE COMPONENTES PRINCIPAIS DOS MODOS ROTACIONADOS APRESENTADOS ANTERIORMENTE E SIGNIFICÂNCIA ASSOCIADA. 156
TABELA 22 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE COMPONENTES PRINCIPAIS DOS RESPECTIVOS MODOS ROTACIONADOS DOS MODELOS E SIGNIFICÂNCIA ASSOCIADA.....161
TABELA 23 – LISTAS DE ANOS EN E LN RESULTANTES DOS DADOS OBSERVADOS (HADISST1) NA PRIMAVERA, NO VERÃO E ANOS EM COMUM ENTRE AS ESTAÇÕES. 164
TABELA 24 – LISTAS DE ANOS EN E LN SIMULADOS PELO MODELO CESM2 NA PRIMAVERA, NO VERÃO E ANOS EM COMUM ENTRE AS ESTAÇÕES.....169
TABELA 25 – LISTAS DE ANOS EN E LN RESULTANTES DA MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NA PRIMAVERA, NO VERÃO E ANOS EM COMUM ENTRE AS ESTAÇÕES.....172
TABELA 26 – ÍNDICES (1-r) OBTIDOS DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ESPACIAL (r) ENTRE FL DO MODO ENOS OBSERVADO (HADISST1) E DO SIMULADO POR CADA MODELO ESPECIFICADO, PARA O PERÍODO 1979-2014, APÓS SEREM PADRONIZADOS PELA MÉDIA DE (1-r) PARA CADA ESTAÇÃO (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 178
TABELA 27 – RMSE PADRONIZADO ENTRE FL DO MODO ENOS OBSERVADO (HADISST1) E SIMULADO POR CADA MODELO ESPECIFICADO PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA

DIVISÃO PELA MÉDIA SAZONAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 179
TABELA 28 – MÓDULOS DAS DIFERENÇAS PADRONIZADAS ENTRE AS VARIÂNCIAS DAS SÉRIES DE FS DO MODO ENOS OBSERVADO (HADISST1) E SIMULADO POR CADA MODELO ESPECIFICADO PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA SAZONAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 180
TABELA 29 – RMSE PADRONIZADO ENTRE AS CURVAS DE DEP DO MODO ENOS OBSERVADO (HADISST1) E DO MODO ENOS SIMULADO POR CADA MODELO ESPECIFICADO PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO. 181
TABELA 30 – ÍNDICE GERAL DE CADA MODELO E MÉDIA DO CONJUNTO DESSES MODELOS.....182
TABELA 31 – NÚMERO DE VEZES QUE O MODELO APARECE ENTRE OS 8 MELHORES NA CLASSIFICAÇÃO DE CADA ÍNDICE. 183
TABELA 32 – CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS AO SIMULAREM O MODO ENOS.....183
TABELA 33 – LISTAS DE ANOS EN E LN RESULTANTES DA MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM ENOS, PARA PRIMAVERA, VERÃO E ANOS EM COMUM ENTRE AS ESTAÇÕES.....187
TABELA 34 – LISTAS DE ANOS COM EVENTOS EN E LN SIMULADOS PELO MODELO CESM2 NA PRIMAVERA, NO VERÃO E EM AMBAS AS ESTAÇÕES, PARA PROJEÇÕES NO CENÁRIO SSP2-4.5.....216
TABELA 35 – LISTAS DE ANOS EN E LN SIMULADOS PELA MÉDIA DO CONJUNTO DE 10 MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NA PRIMAVERA, NO VERÃO E EM AMBAS AS ESTAÇÕES, PARA PROJEÇÕES NO CENÁRIO SSP2-4.5. 219
TABELA 36 – LISTAS DE ANOS EN E LN SIMULADOS PELA MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE TIVERAM MELHOR DESEMPENHO AO SIMULAR O MODO ENOS NO CLIMA

PRESENTE, NA PRIMAVERA, NO VERÃO E ANOS EM COMUM ENTRE AS ESTAÇÕES, PARA PROJEÇÕES NO CENÁRIO SSP2-4.5. 222
TABELA 37 – LISTAS DE ANOS EN E LN SIMULADOS PELO MODELO CESM2 NA PRIMAVERA, NO VERÃO E EM AMBAS AS ESTAÇÕES, PARA PROJEÇÕES NO CENÁRIO SSP5-8.5. 269
TABELA 38 – LISTAS DE ANOS EN E LN SIMULADOS PELA MÉDIA DO CONJUNTO DE 10 MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NA PRIMAVERA, NO VERÃO E EM AMBAS AS ESTAÇÕES, PARA PROJEÇÕES NO CENÁRIO SSP5-8.5. 272
TABELA 39 – LISTAS DE ANOS EN E LN SIMULADOS PELA MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE TIVERAM MELHOR DESEMPENHO AO SIMULAR O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NA PRIMAVERA, NO VERÃO E EM AMBAS AS ESTAÇÕES, PARA PROJEÇÕES NO CENÁRIO SSP5-8.5. 275

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ACP	- Análise de Componentes Principais
AMIP	- Projeto de Intercomparação de Modelos Atmosféricos
AOGCM	- Modelo de Circulação Geral Atmosfera-Oceano
AR4	- Relatório de Avaliação 4
AR5	- Relatório de Avaliação 5
AR6	- Relatório de Avaliação 6
AS	- América do Sul
CESA	- Centro-leste da América do Sul
CGM	- Concentração de Gelo Marinho
CMIP	- Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados
CP	- Componente Principal
DECK	- Diagnóstico, Avaliação e Caracterização do Clima
DJF	- dezembro, janeiro, fevereiro
ENOS	- El Niño-Oscilação Sul
EOF	- Função Ortogonal Empírica
EN	- El Niño
ESGF	- *Earth System Grid Federation*
ESM	- Modelo de Sistema Terrestre
FAR	- Relatório de Avaliação 1
GEE	- Gases do Efeito Estufa
HN	- Hemisfério Norte
HS	- Hemisfério Sul
IOP	- Oscilação Interdecadal do Pacífico
IPCC	- Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
JJA	- junho, julho, agosto
LN	- La Niña
MAM	- março, abril, maio
OMA	- Oscilação Multidecadal do Atlântico
OMJ	- Oscilação de Madden-Julian
OMM	- Organização Meteorológica Mundial
PGM	- Precipitação Global de Monções
PNUMA	- Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

RCP - *Representative Concentration Pathway*
SAR - Relatório de Avaliação 2
SESA - Sudeste da América do Sul
SMAS - Sistema de Monção da América do Sul
SON - setembro, outubro, novembro
SSP - *Shared Socioeconomic Pathway*
TAR - Relatório de Avaliação 3
TSM - Temperatura da Superfície do Mar
WCRP - *World Climate Research Programme*
WGCM - *Working Group on Coupled Modelling*
ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 46
1.1 JUSTIFICATIVA 46
1.2 OBJETIVOS 49
1.2.1 Objetivos gerais 49
1.2.2 Objetivos específicos 49
2 REVISÃO DA LITERATURA 51
2.1 O SISTEMA DE MONÇÃO DA AMÉRICA DO SUL (SMAS) 51
2.1.1 Definição de Monção 51
2.1.2 Evolução do SMAS 54
2.1.3 Variabilidade climática natural e influência de ações antrópicas no SMAS 57
2.2 O PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC) 61
2.3 PROJETO DE INTERCOMPARAÇÃO DE MODELOS ACOPLADOS (CMIP) 64
2.4 SIMULAÇÕES DO SMAS POR MODELOS DO CMIP6 69
2.4.1 Representações do SMAS por modelos do CMIP6 69
2.4.2 Projeções do SMAS por modelos do CMIP6 73
3 DADOS E MÉTODOS 77
3.1 DADOS 77
3.2 MÉTODOS 80
3.2.1 Cálculo de climatologias 80
3.2.2 Análise da simulação do clima presente 82
3.2.3 Análise de Componentes Principais (ACP) 85
3.2.4 Correlação entre séries de *Factor Scores* dos modos dipolo 88
3.2.5 Análise da simulação de ENOS 89
3.2.6 Ciclos anuais de precipitação em regiões da monção 95
3.2.7 Correlação entre precipitação e TSM 96
3.2.8 Composição de Anomalias 96
4 DESEMPENHO DOS MODELOS NA SIMULAÇÃO DO CLIMA PRESENTE 99
4.1 PRECIPITAÇÃO 99
4.2 CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA 111
4.3 AVALIAÇÃO DE CLIMATOLOGIAS 119
4.4 MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO 144
4.5 MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM 161

4.6 SIMULAÇÃO DE ENOS 172
4.7 CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO 187
5 PROJEÇÕES DOS MODELOS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 195
5.1 PRECIPITAÇÃO 195
5.2 CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA 203
5.3 MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO 206
5.4 MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM 213
5.5 DIFERENÇAS ENTRE CLIMA FUTURO E CLIMA PRESENTE 228
6 PROJEÇÕES DOS MODELOS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 246
6.1 PRECIPITAÇÃO 246
6.2 CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA 254
6.3 MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO 259
6.4 MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM 265
6.5 DIFERENÇAS ENTRE CLIMA FUTURO E CLIMA PRESENTE 281
7 IMPACTO DE ENOS NO CLIMA PRESENTE E NO CLIMA FUTURO 301
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS 321
REFERÊNCIAS 327
ANEXO 1 – TABELA DE REFERÊNCIAS CMIP6 336
ANEXO 2 – CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO 337
ANEXO 3 – FIGURAS ANÁLISE ESPECTRAL 355

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Grande parte da América do Sul (AS) sofre a influência de um sistema de monção caracterizado por produzir alta precipitação durante o verão austral e invernos secos. Por afetar a maior parte do continente e ser responsável pela estação chuvosa, existe grande interesse em estudar o comportamento da monção na AS. Além disto, na região da monção ocorrem atividades importantes para o desenvolvimento socioeconômico e que dependem fortemente de condições climáticas, como a produção agrícola e de energia hidroelétrica (GRIMM, 2019a).

O aumento da precipitação no verão austral está relacionado, dentre outros fatores, com o aquecimento diferencial entre o continente e os oceanos adjacentes nessa época do ano. O contraste de temperatura provoca alterações em sistemas de alta e baixa pressão próximos ou sobre o continente, levando a mudanças na circulação atmosférica e, consequentemente, na distribuição de umidade dentro da AS. O sistema de monção da AS (SMAS) pode sofrer variações causadas por oscilações naturais do sistema climático ou mesmo pela interferência humana no meio ambiente.

A variabilidade climática natural pode ocorrer em escala intrassazonal, interanual ou interdecadal, e também pode haver combinação entre as variações de diferentes escalas, provocando graves desastres naturais (GRIMM et al., 2020a). A variabilidade intrassazonal sofre forte influência da Oscilação de Madden-Julian, a qual é responsável por aumentar a precipitação de monção e a ocorrência de eventos extremos no centro-leste e sudeste da AS em diferentes fases (GRIMM, 2019b). Já a variabilidade interanual está ligada principalmente às fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS), impactando na quantidade de precipitação sazonal e mensal e também na frequência de eventos extremos de precipitação (GRIMM, 2011). Por outro lado, modos de variabilidade interdecadal causados por anomalias na temperatura da superfície do mar (TSM), como as oscilações do Atlântico (e.g., a Oscilação Multidecadal do Atlântico, OMA), do Pacífico (e.g., a Oscilação Interdecadal do Pacífico, OIP), entre outras, além de oscilações atmosféricas, também influenciam a precipitação de monção (GRIMM; SABOIA, 2015).

Além da variabilidade natural, o SMAS também está sujeito a mudanças causadas por atividades antrópicas. Vários estudos têm analisado as tendências observadas em diferentes sistemas de monção ao redor do globo (Ásia-Austrália, África e Américas). Houve tendência decrescente da precipitação global de monções (PGM) terrestres entre as décadas de 1950 e 1980 (WANG; DING, 2006), e intensificação após 1980 (WANG et al., 2012), principalmente devido às variações das monções no Hemisfério Norte (HN). Uma análise do século XX indica que as tendências de curto período podem fazer parte da variabilidade natural multidecadal, principalmente daquela forçada pelo Atlântico (OMA) e pelo Pacífico (IOP) (WANG et al., 2013). Contudo, apesar desta influência da variabilidade natural, há evidências de que os aerossóis antrópicos foram um fator dominante nas alterações da monção na África e no sul e leste da Ásia (POLSON et al., 2014). Ademais, é possível que a emissão de gases de efeito estufa (GEE) cause um aumento na precipitação de monção, mais do que compensando a redução causada por aerossóis (WANG et al., 2021). Dessa forma, com a crescente emissão de GEE desde o século passado e, consequentemente, aumento do forçamento radiativo, espera-se que o SMAS sofra alterações. No entanto, dadas as variações climáticas naturais, identificar as mudanças causadas por fatores antrópicos tem sido um desafio para a comunidade científica.

A fim de reunir informações sobre como as atividades humanas podem contribuir para mudanças climáticas em todo planeta, foi criado em 1988 o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). Esse órgão é responsável pela produção e publicação de relatórios que reúnem avaliações das mudanças no clima, considerando suas bases físicas, seus impactos e mecanismos de adaptação e mitigação. Os relatórios recebem o nome de *Assessment Report* (AR) e têm sido emitidos aproximadamente a cada seis anos desde 1990. O último relatório, o AR6, teve sua terceira parte publicada em abril de 2022. Para a avaliação das mudanças climáticas, pesquisadores que contribuem na elaboração dos relatórios, utilizam resultados de observações e de simulações e projeções de modelos climáticos. Resultados de modelos que participam do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP, em inglês) têm contribuído para a produção dos últimos relatórios. Esse projeto reúne resultados de modelos produzidos por diversos centros de modelagem climática em todo mundo. Para que seja possível a comparação e análise desses resultados, são seguidos protocolos e padrões na realização dos

experimentos, os quais envolvem desde rodadas históricas do período pré-industrial, até projeções em diferentes cenários futuros. Dessa forma, o AR6 conta com a contribuição de resultados dos modelos do CMIP6 (EYRING et al., 2016).

Por serem modelos com acoplamento entre o oceano e a atmosfera, os modelos do CMIP estão sujeitos a diversos tipos de erros e tendências ao reproduzirem o clima, como a defasagem entre oscilações observadas e simuladas. Mesmo assim, os modelos do CMIP6 são aperfeiçoados em relação aos do CMIP5. Resultados de projeções futuras do CMIP6 mostram precipitação sobre os continentes 50% maior do que a prevista pelo CMIP5 para o final do século (WANG et al., 2021), com o HN apresentando um maior aumento na precipitação (WANG; JIN; LIU, 2020). Para a AS, de maneira geral, os resultados das projeções do CMIP6 concordam com os do CMIP5, indicando poucas alterações na precipitação média da monção, porém apresentando um aumento conforme a emissão de GEE também aumenta (KITOH et al., 2013; ALMAZROUI et al., 2021). Com o acúmulo desses gases na atmosfera, estima-se para o futuro um clima com características de El Niño, com o aumento da temperatura da superfície do mar no centro-leste do Pacífico, induzindo ao aumento da precipitação de monção no HN e à redução no HS (WANG; JIN; LIU, 2020).

Por se tratarem de dados recentes, ainda não foram feitos estudos completos com os resultados do CMIP6 sobre o SMAS. Não há ainda análise dos resultados dos modelos do CMIP6 com maior resolução temporal e espacial para a AS, que considere o ciclo da monção, desde seu início até seu fim, a nível mensal, bimensal ou trimestral, ou que considere as diferenças de comportamento entre diferentes regiões do domínio da monção. Estas informações são extremamente relevantes para planejamento em longo prazo.

Embora as projeções indiquem insignificante alteração da chuva total de monção (NDJFM) numa média sobre o domínio total da monção sobre a AS, não se pode absolutamente supor que os efeitos da mudança antrópica sejam omissíveis. Para entender a importância de tais efeitos, é necessário ressaltar que a mudança climática projetada tanto pelo CMIP5 como pelo CMIP6 indica um clima futuro mais semelhante ao El Niño, com aumento da TSM no Pacífico central-leste em relação ao clima atual (WANG et al., 2021) e diminuição da circulação tropical de Walker. Alguns poucos resultados do CMIP5 com maior resolução temporal indicam que as principais mudanças na monção da AS se assemelham aos impactos do El Niño (SETH et al., 2013), embora haja bastante dispersão entre os resultados desses modelos

anteriores. Contudo, tal verificação não foi feita ainda nos resultados do CMIP6. Estes impactos do El Niño são afetados pela tendência à reversão primavera-verão das anomalias de precipitação no Centro-Leste da AS (GRIMM, 2003; GRIMM; PAL; GIORGI, 2007; GRIMM; ZILLI, 2009). Eles incluem condições mais secas (mais úmidas) na parte tropical (subtropical) da monção da AS na primavera, impulsionadas pelas mudanças na circulação tropical de Walker e pela teleconexão extratropical. No pico do verão, as anomalias de precipitação tendem a reverter para positivas no Centro-Leste da AS e são enfraquecidas e deslocadas para o sudoeste no sudeste da AS. Condições secas permanecem no centro-nordeste da Amazônia e condições mais úmidas na região equatorial oeste da AS.

Sendo assim, é de grande importância verificar como os modelos mais recentes do CMIP6 reproduzem no clima presente a precipitação e a circulação do SMAS, com suas variações dentro da estação da monção, assim como o clima nas outras estações do ano. Além disso, é fundamental analisar se projeções futuras mostram o aumento dessas variações como resultado de um clima semelhante ao El Niño, e como as mudanças estariam distribuídas dentro da estação da monção.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

Avaliar como os modelos climáticos que participam do CMIP6 reproduzem o clima presente da estação de monção da América do Sul e suas variações da primavera para o verão. Pretende-se também determinar as mudanças climáticas previstas para o final do século XXI, além de estudar, no clima presente e futuro, a simulação da variabilidade interanual da monção associada com o modo ENOS.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar simulações do clima presente por modelos do CMIP6, especialmente quanto às características observadas de circulação e precipitação da monção. Ainda para o clima presente, busca-se verificar a simulação da variabilidade climática interanual em cada modelo.

- Determinar as mudanças climáticas entre clima presente e futuro no início, auge e final da estação de monção.
- Verificar as mudanças climáticas na variabilidade interanual da monção associada com ENOS.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O SISTEMA DE MONÇÃO DA AMÉRICA DO SUL (SMAS)

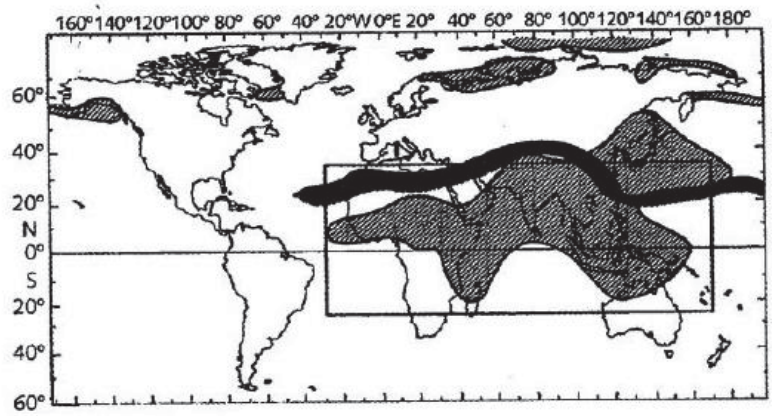
2.1.1 Definição de Monção

O termo “monção” deriva do Árabe *mausam*, que significa “estação”, e seu conceito está associado a mudanças sazonais tanto da precipitação, quanto da direção predominante dos ventos em baixos níveis. Desde a década de 1970, a definição das regiões afetadas por sistemas de monções em todo o mundo tem sido atualizada de acordo com diferentes critérios. Ramage (1971, apud GAN; RODRIGUES; RAO, 2009) estabeleceu o domínio da monção global com base em 4 critérios envolvendo a reversão da direção predominante do vento e alterações em sua velocidade. O primeiro critério proposto pelo autor é o de que deve ser observada uma mudança da direção predominante do vento em pelo menos 120° entre janeiro e julho. Nesse período, a frequência média da direção predominante do vento deve ser maior que 40% (segundo critério). O terceiro parâmetro proposto estabelece que a média do vento resultante em pelo menos um dos meses deve exceder 3 m/s. Já o quarto critério indica que deve haver ao menos uma alternância entre ciclone e anticiclone a cada dois anos em janeiro ou julho dentro de uma área de 5° de latitude-longitude. Seguindo esses critérios, as regiões afetadas por sistemas de monções estariam localizadas entre 25°S e 35°N de latitude e 30°W e 170°E de longitude e, portanto, a região central da AS não seria considerada como sendo afetada por um regime de monção (FIGURA 1).

Segundo Moran e Morgan (1986), um sistema de monção caracteriza-se por um padrão de circulação no qual há inversões sazonais na direção do vento, desencadeando verões úmidos e invernos secos nos continentes. Isso acontece devido ao aquecimento diferencial entre a terra e a água. Para a mesma quantidade de radiação solar que incide sobre a superfície da Terra, os continentes se aquecem mais e mais rapidamente que os oceanos vizinhos. Em estações mais quentes, como a primavera e, principalmente, o verão, o ar sobre os continentes é mais quente e instável do que o ar sobre os oceanos adjacentes, implicando em pressões mais baixas sobre os continentes e mais altas sobre os oceanos. O gradiente horizontal de pressão que surge entre essas áreas faz com que o ar úmido em baixos níveis

proveniente do oceano se desloque em direção ao continente, onde é aquecido e ascende, implicando na formação de nuvens e, consequentemente, precipitação. Após ocorrer divergência em altos níveis, o ar desce novamente sobre os oceanos, completando a circulação. Em estações mais frias, sobretudo no inverno, a circulação tende a ser invertida, implicando em condições secas sobre os continentes.

FIGURA 1 – REGIÕES AFETADAS POR MONÇÕES DE ACORDO COM RAMAGE (1971, apud GAN; RODRIGUES; RAO, 2009).



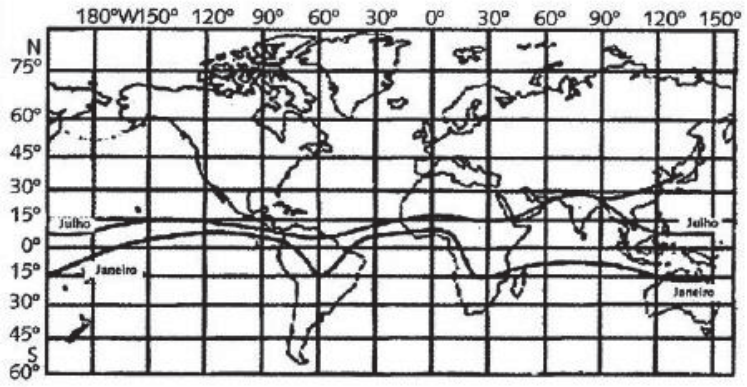
FONTE: Ramage (1971, apud GAN; RODRIGUES; RAO, 2009).
LEGENDA: As áreas hachuradas indicam as regiões em que os 3 primeiros critérios são satisfeitos e a faixa em preto demarca o limite norte onde o quarto critério é satisfeito. O retângulo inclui as regiões que satisfazem todos os critérios.

Asnani (1993, apud GAN; RODRIGUES; RAO, 2009) propôs que o domínio da monção global está localizado na faixa entre 5° a norte da posição mais ao norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e 5° ao sul da posição mais ao sul da ZCIT. Por esse critério, a região central da AS é considerada uma região afetada pelo regime de monção (FIGURA 2). Para Zhou e Lau (1998), na AS o sistema de monção revela-se na inversão sazonal da direção do vento em baixos níveis entre julho e janeiro quando é retirada a média climatológica anual.

Estudos mais recentes abordam a definição do domínio da monção global com base nas características de sua precipitação. Assim, atualmente considera-se como domínio da monção global regiões da Ásia, África, Oceania, América do Norte e América do Sul. Wang e Ding (2006), por exemplo, estabeleceram que uma região possui um regime de monção se a diferença entre a precipitação média de inverno e a precipitação média de verão (medida denominada “alcance anual”) exceder 180 mm; e se a precipitação de verão local exceder 35% da precipitação anual. A FIGURA 3 mostra o domínio da monção global de acordo com esses autores. Wang e Ding

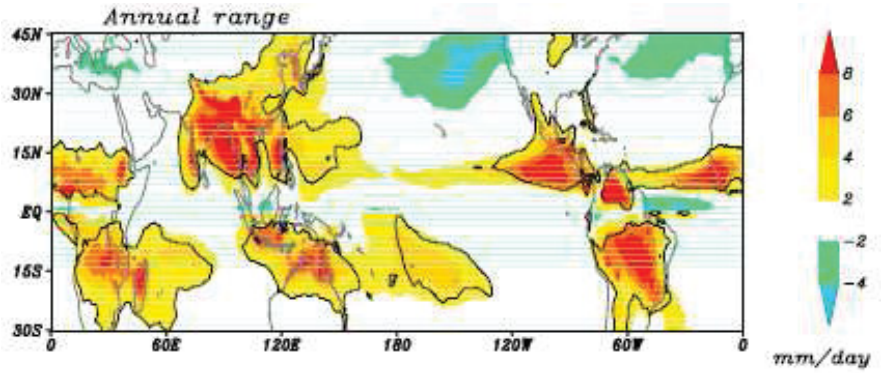
(2008) ainda delimitaram o domínio da monção global de acordo com um índice dado pela razão entre o alcance anual da precipitação e a precipitação média anual. Se o valor calculado para esse índice é maior que 50% e o alcance anual é superior a 300 mm, então a região está dentro do domínio da monção. Já Wang et al. (2012), definiram uma região como sendo afetada por um sistema de monção se o alcance anual da precipitação excede 2 mm/dia e se a precipitação de verão local é superior a 55% do total anual. Seguindo esses critérios para a definição do domínio da monção global, Grimm et al. (2020b) mostraram a região afetada pelo sistema de monção da AS (SMAS) (circunscrita pela linha vermelha) e o ciclo anual de precipitação na AS em cada quadrícula do mapa (FIGURA 4), contextualizados a uma revisão completa das monções americanas.

FIGURA 2 – POSIÇÃO DA ZCIT MAIS AO NORTE EM JULHO (INVERNO AUSTRAL) E MAIS AO SUL EM JANEIRO (VERÃO AUSTRAL).



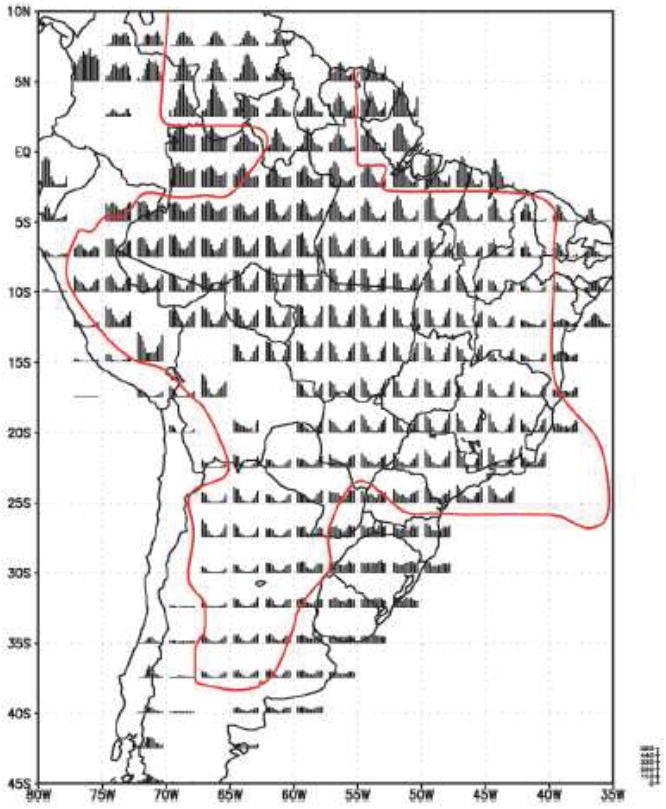
FONTE: Asnani (1993, apud GAN; RODRIGUES; RAO, 2009).

FIGURA 3 – MÉDIA CLIMATOLÓGICA PARA O ALCANCE ANUAL DA PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO UMA COMBINAÇÃO DE DADOS QUE COBREM O PERÍODO DE 1948 A 2003.



FONTE: Wang e Ding (2006).
LEGENDA: O domínio da monção global é delimitado pelas linhas pretas (WANG; DING, 2006).

FIGURA 4 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL, USANDO DADOS ENTRE 1950 E 2005.



FONTE: Grimm et al. (2020b).
LEGENDA: O sistema de monção ocorre na região interior à demarcação da linha vermelha (GRIMM et al., 2020b).

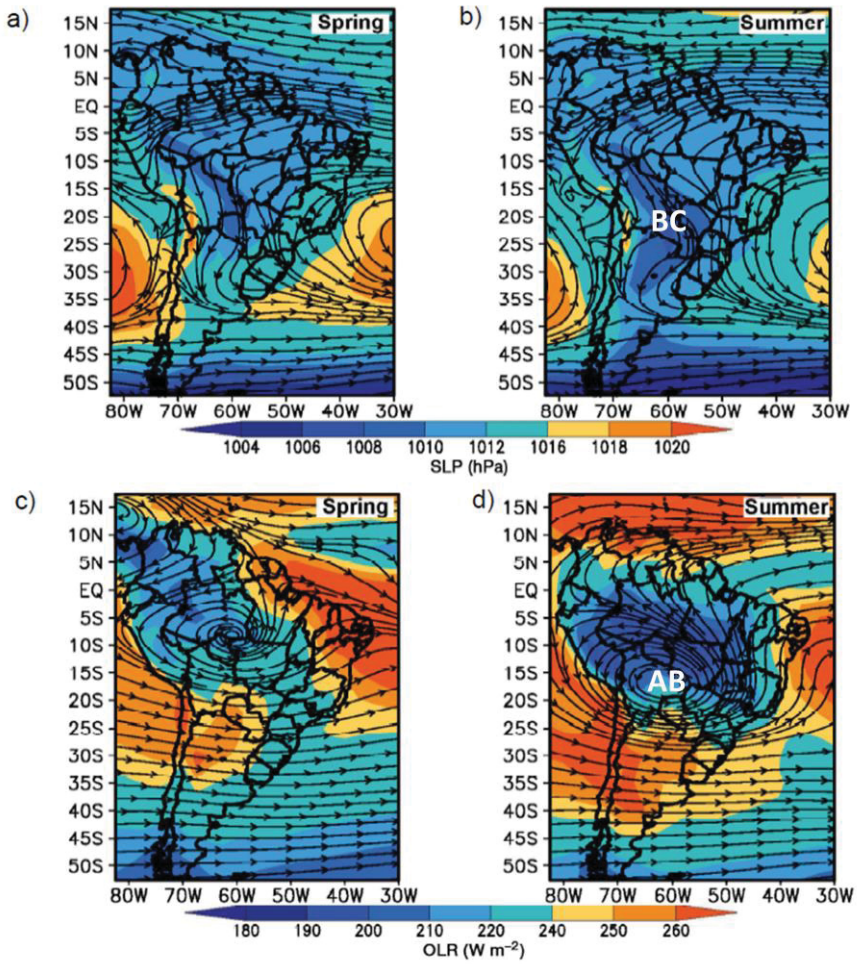
2.1.2 Evolução do SMAS

A circulação de monção da AS se inicia durante a primavera austral, entre setembro e novembro. Ela se caracteriza por convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis sobre a bacia do Amazonas, resultantes do intenso aquecimento da região e consequente diminuição da pressão na superfície (FIGURA 5a, FIGURA 5c).

Durante o verão austral (entre dezembro e fevereiro), ocorre o fortalecimento de um sistema de baixa pressão localizado na região do Chaco (FIGURA 5b: área em azul mais escuro, abrangendo o Brasil, Paraguai, Bolívia e Argentina), o que provoca um aumento do gradiente de pressão em relação à alta do noroeste do Saara, fazendo com que os ventos alísios tropicais de nordeste se tornem mais intensos (GRIMM, 2019a). Esses ventos em baixos níveis cruzam o equador e penetram na AS, levando umidade para a região amazônica. Ao atingirem os Andes e também por conta da

conservação de vorticidade absoluta (GAN; RODRIGUES; RAO, 2009), os ventos se tornam de noroeste e dirigem-se para o sul, onde a circulação se torna ciclônica em torno da baixa do Chaco. Em seu movimento para o sul, os ventos associam-se ao jato de baixos níveis (JBN) a leste dos Andes (FIGURA 5b), responsável por levar umidade da região tropical amazônica para o sul do Brasil e norte da Argentina (MARENGO et al., 2004). A circulação associada à alta do Atlântico Sul, que está mais distante do continente nessa época, produz aumento de precipitação na região da Amazônia, no Centro e Sudeste do Brasil e em regiões a leste dos Andes (GRIMM, 2019a).

FIGURA 5 – TOPO: CIRCULAÇÃO EM 850 hPa E PRESSÃO AO NÍVEL DO MAR PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO. BASE: CIRCULAÇÃO EM 200 hPa E RADIAÇÃO DE ONDA LONGA EMERGENTE PARA C) PRIMAVERA E D) VERÃO. A BAIXA DO CHACO É INDICADA POR BC E A ALTA DA BOLÍVIA, POR AB.



FONTE: Adaptado de Grimm et al. (2016).

Outro fator que explica o aumento da precipitação associado ao SMAS durante o verão austral é a fase mais ativa da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), uma banda de nebulosidade noroeste-sudeste, que se estende do Centro para o Sudeste do Brasil, em direção ao Atlântico Sul.

Em altos níveis, ainda durante o verão, uma circulação anticiclônica é observada sobre o altiplano boliviano, denominada Alta da Bolívia (AB) (FIGURA 5d), a qual resulta da convecção aumentada no centro do continente devida à monção. Esta alta desloca-se para sul desde a Amazônia, entre a primavera (FIGURA 5c), e o verão (FIGURA 5d). Além disso, a circulação também é complementada em altos níveis pela presença de um cavado (circulação ciclônica) próximo ao Nordeste do Brasil.

Entre o final do verão e início do outono, a alta do Atlântico Sul se aproxima do continente, ocorrendo um enfraquecimento do fluxo equatorial que entra na AS vindo do HN. Com a redução da umidade levada para a região subtropical, o principal centro de precipitação se desloca dos subtrópicos para o noroeste da AS. Consequentemente, a diferença de temperatura entre o continente subtropical e o oceano torna-se insignificante e observa-se, então, uma diminuição do cisalhamento vertical do vento no SMAS (ZHOU; LAU, 1998). Após março, o sistema de monção se enfraquece e a precipitação retorna aos trópicos.

Segundo Kousky (1988), o início da circulação de monção ocorre quando a radiação de onda longa emergente atinge um valor inferior a 240 W/m² (usado como limiar de convecção), tendo sido maior que esse valor em 10 de 12 pêntadas anteriores e permanecendo menor que esse limite por 10 de 12 pêntadas posteriores. A progressão da convecção e precipitação de monção ocorre de noroeste para sudeste no seu início e inversamente em sua fase final. No entanto, uma vez que no noroeste da Amazônia a radiação de onda longa emergente quase sempre está abaixo desse limite, o início da monção nessa região não pode ser determinado por essa definição. Liebmann e Marengo (2001) definem o início da monção a partir do momento em que o acúmulo de precipitação ultrapassa o obtido usando a média de chuva diária do local. Dessa forma, a forte precipitação ligada à estação chuvosa começa na primavera austral no Centro do Brasil e então progride para Sul e para Norte, de maneira que no centro-sul da AS ocorre entre janeiro e março e próximo ao equador, entre março e maio (GRIMM, 2011; LIEBMANN; MECHOSO, 2011). No Nordeste do Brasil, a estação chuvosa ocorre entre abril e junho, quando a ZCIT está

em sua posição mais ao sul (GRIMM, 2019a). Na FIGURA 4 é possível verificar a progressão da estação chuvosa através dos ciclos anuais de precipitação.

2.1.3 Variabilidade climática natural e influência de ações antrópicas no SMAS

A precipitação associada ao SMAS está sujeita à variabilidade climática natural em diferentes escalas temporais: intrassazonal, interanual e interdecadal. A variabilidade intrassazonal da precipitação na AS ocorre principalmente na região centro-leste do Brasil (designada CESA), incluindo a ZCAS, enquanto no Oeste da AS, essa variabilidade é pequena. As anomalias de precipitação resultantes da variabilidade intrassazonal, tanto no centro-leste da AS, quanto na região da ZCAS, formam uma espécie de dipolo com a região dos subtrópicos ao sul, no Sudeste da AS (designado SESA). Enquanto uma fase do dipolo é marcada por alta precipitação no centro-leste (e na ZCAS) e baixa precipitação ao sul, a fase oposta é definida por pouca precipitação na ZCAS e alta precipitação sobre o Uruguai, Sul do Brasil e nordeste da Argentina (SESA). As anomalias dos ventos zonais de oeste (leste) que ocorrem durante o verão sobre a região tropical do Brasil estão associados à fase ativa (inativa) deste dipolo no centro-leste da AS (incluindo a ZCAS) (sudeste da AS) e ao transporte de umidade para esta região (desta região), com enfraquecimento (fortalecimento) do JBN (GRIMM, 2019a).

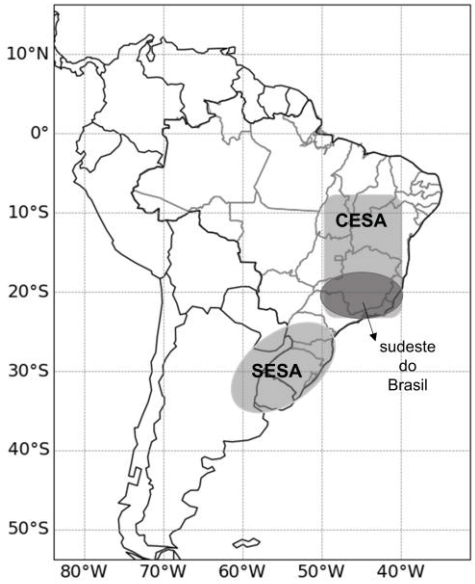
A Oscilação de Madden-Julian (OMJ) é a principal fonte de variabilidade climática tropical intrassazonal e intervém fortemente na AS. Além de aumentar a precipitação média diária em mais de 30% com relação à climatologia no centro-leste da AS, a OMJ favorece as anomalias de precipitação na ZCAS e na região subtropical da AS (em fases diferentes), fortalecendo também as anomalias na região tropical (GRIMM, 2019b).

Já a variabilidade interanual da monção na AS é fortemente relacionada às fases do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (GRIMM, 2003, 2004, 2011; GRIMM; ZILLI, 2009). Considerando anomalias de precipitação anual, durante a fase quente do ENOS, a precipitação permanece abaixo da média no nordeste da AS e aumenta no sudeste da AS. Na fase fria do ENOS, esse padrão de precipitação se inverte. Isso acontece por conta de combinações de anomalias nas circulações de Walker e Hadley com anomalias nos padrões das ondas de Rossby, causadas por fontes de calor associadas ao ENOS (GRIMM, 2003, 2004, 2011). Na primavera e começo do verão

austral, devido ao intenso movimento ascendente sobre o Pacífico causado pelo El Niño, anomalias de subsidência são observadas na região Amazônica, resultando em anomalias anticiclônicas em baixos níveis predominantes no centro-leste do Brasil, nos trópicos e subtrópicos. Essas anomalias desviam a umidade provinda do Atlântico para o noroeste da AS e para o sul do Brasil, causando anomalias de precipitação negativas no norte e centro-leste do Brasil e positivas no sul do Brasil (GRIMM, 2003). Com um maior aquecimento do continente durante o verão, resultante das anomalias negativas de precipitação na primavera no centro-leste, surgem anomalias de circulações ciclônica em baixos níveis (e anticiclônica em altos níveis) no sudeste do Brasil, levando umidade para a região centro-leste do Brasil e, consequentemente, a precipitação nessa área aumenta no verão (GRIMM, 2003; 2011; GRIMM et al., 2007). No final do verão, as anomalias de circulações ciclônicas em baixos níveis desaparecem por conta da redução da temperatura do continente e, portanto, a precipitação diminui no centro-leste do Brasil. Surgem anomalias de precipitação negativas no norte do Brasil e na ZCAS e positivas no sul do Brasil (GRIMM, 2003).

Do exposto acima, vê-se que maior parte da variabilidade interanual da precipitação de monção no SMAS provém de ENOS, em combinação com forçamento regional devido a interação superfície-atmosfera. Os impactos mudam entre o início (primavera) e o auge (verão) da estação de monções sobre o centro-leste da AS (incluindo a ZCAS) e parte do sudeste da AS, sugerindo que influências remotas prevalecem na primavera, enquanto no pico do verão processos regionais de interação superfície-atmosfera dominam, ligados à topografia, à condições anteriores de umidade do solo e interação oceano-atmosfera junto da costa (GRIMM, 2003; GRIMM; PAL; GIORGI, 2007). Por exemplo, durante El Niño, CESA (SESA) exibe precipitação abaixo (acima) do normal em novembro, mas acima (parcialmente abaixo) da precipitação normal no próximo mês de janeiro. Embora mais forte durante ENOS, a tendência para anomalias inversas entre o início e o pico das monções sobre CESA também existe em outros anos, desde que hajam anomalias significativas nesta região capazes de produzir os processos de interação superfície-atmosfera que levam à inversão da circulação regional e das anomalias de precipitação (GRIMM; PAL; GIORGI, 2007; GRIMM; ZILLI, 2009). A FIGURA 6 apresenta em destaque as principais regiões da AS afetadas de forma diversa pelo ENOS em novembro e janeiro seguinte.

FIGURA 6 – INDICAÇÃO DAS PRINCIPAIS REGIÕES AFETADAS POR ENOS NA AS.



FONTE: A autora (2022).

A variabilidade climática interdecadal da monção na AS pode decorrer de oscilações globais da TSM, na Oscilação Interdecadal do Pacífico (OIP) e na Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA), ou mesmo por oscilações climáticas mais regionais, oceânicas e atmosféricas (GRIMM, 2019a). Grimm e Saboia (2015) mostraram, através da análise de funções ortogonais empíricas rotacionadas, a variabilidade interdecadal presente na precipitação de monção da primavera e do verão austral na AS. As análises mostraram uma forte relação entre a variabilidade interdecadal da primavera e do verão, resultante de influências locais e remotas, de forma semelhante à observada para a variabilidade interanual descrita acima. Assim, os principais modos de primavera e de verão mostraram um padrão tipo dipolo, com anomalias opostas em CESA e SESA, com tendência à inversão da polaridade da primavera para o verão.

A combinação de oscilações climáticas em diferentes escalas através de superposição construtiva (produzindo anomalias de mesmo sinal) pode levar à ocorrência de eventos extremos de precipitação na AS. Fenômenos como cheias e secas intensas, bem como suas consequências para a sociedade e o meio ambiente, têm sido relacionados com a combinação de diferentes modos de variabilidade climática, afetando diversas regiões da AS (GRIMM, 2019a; GRIMM et al., 2020a).

Uma vez que o regime de monção é intrinsecamente ligado ao fluxo de radiação no sistema terrestre, a variação da precipitação na superfície pode ocorrer

não apenas por variabilidade climática natural, mas também por atividades humanas que causam forçamento radiativo, como a emissão de gases do efeito estufa (GEE) e aerossóis na atmosfera. Estudos feitos na Ásia sugerem que a presença de aerossóis na atmosfera reduz a radiação solar que chega até a superfície, fazendo com que a diferença de temperatura entre a terra e a água também diminua, o que acaba por impedir o desenvolvimento da monção. Em uma escala regional, os aerossóis podem ainda interferir enfraquecendo a circulação ou até mesmo contribuir para a formação de nuvens, já que podem servir como núcleos de condensação (LI et al., 2016). Para o sistema de monções da Índia, Wang et al. (2009) mostraram que, dentre os aerossóis de origem antrópica, aqueles responsáveis por absorver a radiação solar possuem grande influência na circulação de monção e no desenvolvimento de precipitação convectiva.

De acordo com Wang e Ding (2006), a precipitação terrestre ligada ao sistema de monção global diminuiu de 1948 a 1980, tendo uma redução significativa no HN, o que pode estar associado com a emissão de aerossóis antropogênicos neste período (POLSON et al., 2014). Wang et al. (2012) mostraram que a precipitação ligada ao sistema de monção do HN aumentou a partir de 1980, porém no Hemisfério Sul (HS) não foram observadas diferenças significativas. Isso pode ser explicado por um maior aquecimento do HN resultante de forçamentos produzidos por atividades humanas, como a emissão de GEE, levando a contrastes de temperaturas entre os hemisférios. Para a AS tropical, os sinais de mudança observados na precipitação não são muito consistentes e as tendências variam conforme o período de análise. Sobre a AS subtropical, a única região que tem apresentado uma tendência consistente na precipitação é o sudeste do continente (SESA), mas esta também é significativamente associada com variação interdecadal natural, embora seja também atribuída à diminuição da camada de ozônio e ao aumento de GEE. Contudo, os sinais são mais fortes e coerentes quando se analisa a temperatura e a frequência de eventos extremos de precipitação e temperatura (SKANSI et al., 2013). Portanto, pode-se considerar que há uma influência antrópica sobre as monções, sendo muito importante avaliá-la e prevê-la.

De forma geral, analisar alterações no SMAS causadas pela interferência humana no sistema terrestre é algo bastante complexo. Além da falta de dados observados em longo período de tempo, a AS possui carência de registros diários em diversos períodos (SKANSI et al., 2013). Somado a isso, existe grande dificuldade em

diferenciar variações ligadas à variabilidade natural (e.g., interdecadal) de alterações provocadas por atividades humanas. Contudo, apesar das grandes incertezas presentes nas projeções, Grimm (2011) verificou que mudanças climáticas associadas à emissão de GEE são capazes de alterar a precipitação sazonal da AS, bem como a variabilidade de precipitação ligada ao ENOS.

Outra influência antrópica sobre o clima está associada ao uso da terra. Especificamente, o desmatamento pode contribuir fortemente para que haja mudanças no SMAS (LIEBMANN; MECHOSO, 2011). Dados recentes do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (2021) mostram que a Amazônia tem apresentado altas taxas de desmatamento. Desde 1988 até 2020, mais de 729 mil km² foram desmatados dentro do bioma Amazônia, sendo 300 mil km² correspondentes aos últimos 20 anos. Com a redução da cobertura vegetal, há aumento da radiação de onda longa emitida pela Terra, pois há menos transformação em calor sensível. Conforme o albedo é intensificado, o fluxo de calor sensível e latente diminui por conta da redução da energia absorvida pela superfície, implicando na redução de convecção. Dessa forma, o desmatamento em grande escala pode implicar em redução de precipitação (DIRMEYER; SHUKLA, 1994), podendo até mesmo contribuir para alteração da precipitação em todo planeta.

Visto que a maior parte da AS é afetada pelo sistema de monção, atividades como a produção agrícola ou a geração de energia hidroelétrica dependem fortemente do comportamento desse sistema. Portanto, o conhecimento de suas características, sua variabilidade natural e possíveis mudanças causadas por ações humanas, é de grande importância para o desenvolvimento social e econômico da maioria dos países da AS.

2.2 O PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC)

A fim de proporcionar aos governos dos países informações científicas para a criação de políticas climáticas, em 1988 foi criado o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, em inglês), por uma ação da Organização Meteorológica Mundial (OMM) em conjunto com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA).

No IPCC, pesquisadores associados a instituições em todo o mundo contribuem para a produção de relatórios que reúnem avaliações climáticas recentes

produzidas pela comunidade científica. Tais relatórios tratam sobre mudanças climáticas e seus impactos no planeta e também discutem sobre fatores que possam reduzir os danos causados pelas mesmas. Para tanto, o IPCC divide-se em três grupos de trabalho e em uma Força Tarefa.

O primeiro grupo de trabalho (*Working Group I*) ocupa-se das bases físicas das mudanças climáticas. O grupo avalia observações de alterações no sistema climático, buscando entender os mecanismos que estão provocando tais mudanças com base em modelos climáticos, além de estudar projeções para o clima futuro. O segundo grupo de trabalho (*Working Group II*) avalia os impactos das mudanças climáticas nos ecossistemas, seres humanos e suas sociedades, considerando suas vulnerabilidades a essas mudanças. O *Working Group II* também aborda meios de adaptação, ou seja, como é possível diminuir consequências negativas das mudanças no clima. O terceiro grupo (*Working Group III*), aborda a mitigação das mudanças climáticas, ou seja, formas de combater as causas ou reduzir os impactos causados por essas. Por último, a Força Tarefa (TFI) busca desenvolver metodologias para cálculo e informações sobre emissão e extinção de GEE na atmosfera.

Até o momento, o IPCC já publicou seis relatórios. O primeiro relatório (*First Assessment Report - FAR*), publicado em 1990, destaca a crescente emissão de GEE na atmosfera por atividades humanas e consequente aumento da temperatura média da superfície da Terra, dentre outros fatores que contribuem para que o clima sofra alterações. Dessa forma, o FAR reforça a importância da cooperação entre países para ações de controle das emissões de GEE e adaptação aos efeitos das mudanças climáticas. O segundo relatório (*Second Assessment Report - SAR*), publicado em 1995, aborda questões como a tendência de alguns aerossóis de origem antrópica produzirem forçamento radiativo negativo, ou como os impactos que o aquecimento global causa no ciclo hidrológico do planeta (HOUGHTON et al., 1996). O relatório discute também previsões de que o clima continuará a mudar no futuro, oferecendo em sua totalidade um rico material para a adoção do Protocolo de Kyoto em 1997. O terceiro relatório (*Third Assessment Report - TAR*), de 2001, expõe assuntos como o contínuo aumento de GEE na atmosfera por atividades humanas, provocando crescente forçamento radiativo. O TAR ainda foca nos impactos causados pelas mudanças climáticas e na necessidade de adaptação (ALBRITTON et al., 2001). Já o quarto relatório (*Fourth Assessment Report, AR4*), de 2007, dentre outros assuntos, mostra que ações antrópicas podem não somente ter causado aumento da

temperatura média da superfície, mas é provável que também tenham afetado padrões de vento, aumentado o risco de ondas de calor, e o aumento do nível dos oceanos na segunda metade do século vinte (BERNSTEIN et al., 2007). O quinto relatório (*Fifth Assessment Report, AR5*), finalizado entre 2013 e 2014, apresenta as principais mudanças observadas na atmosfera, nos oceanos e na criosfera ao longo dos anos, bem como as causas de tais alterações. Além disso, o relatório também aborda os impactos das mudanças climáticas e projeções para o futuro, como a intensificação de eventos extremos de precipitação (PACHAURI et al., 2014). Com isso, o AR5 proporcionou uma forte base científica para o Acordo de Paris de 2015, que colocou como meta um aumento da temperatura média global abaixo de 1,5°C.

O sexto relatório (*Sixth Assessment Report, AR6*) teve sua terceira parte publicada em abril de 2022, contando também com a publicação de três relatórios especiais (*Special Reports*) e um aprimoramento do relatório de metodologia, além de um Atlas interativo.

De maneira geral, as bases físicas do sexto relatório afirmam que ações humanas têm contribuído cada vez mais para o aquecimento do sistema climático e que já é possível ver mudanças na atmosfera, no oceano, na criosfera e na biosfera. O nível médio do mar, por exemplo, subiu em 20 cm entre 1901 e 2018, experimentando desde 1900 o aumento mais rápido dos últimos 3000 anos. Além disso, o relatório aponta que o aquecimento global excederá 1,5°C durante o século XXI a menos que ocorram grandes reduções nas emissões de CO_2 e de outros GEE nas próximas décadas. O aumento da temperatura média global também será responsável por intensificar o ciclo hidrológico do planeta, provocando alterações na precipitação de monção de diferentes regiões, por exemplo. Sobretudo, é possível verificar que muitas dessas mudanças já são consideradas irreversíveis, especialmente alterações observadas nos oceanos, nas coberturas de gelo e no aumento do nível do mar (MASSON-DELMOTTE et al., 2021).

O AR6 ainda informa que as mudanças climáticas causadas por ações humanas, incluindo eventos extremos mais intensos e frequentes, ocasionaram impactos prejudiciais, perdas e danos à natureza e às pessoas, além das consequências provindas da variabilidade climática natural. A curto prazo, o aquecimento em 1,5°C implicará em diversos riscos para os ecossistemas e os seres humanos, o que poderá ser reduzido caso ações sejam tomadas a fim de manter o aumento da temperatura próximo desse nível, embora alguns danos sejam

irreparáveis (PÖRTNER et al., 2022). O relatório ainda aborda caminhos para realizar a mitigação das mudanças climáticas, como a adoção de processos industriais que utilizem tecnologias de baixas (ou até mesmo sem) emissões de GEE. Tecnologias com os mesmos princípios também podem contribuir para a redução de emissões no setor de transportes, como o uso de veículos elétricos ou biocombustíveis sustentáveis (SHUKLA et al., 2022).

2.3 PROJETO DE INTERCOMPARAÇÃO DE MODELOS ACOPLADOS (CMIP)

Para a elaboração dos últimos relatórios, o IPCC contou com grande contribuição de resultados apresentados pelo Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP), um projeto organizado pelo *Working Group on Coupled Modelling* (WGCM), do *World Climate Research Programme* (WCRP).

Criado em 1995, o CMIP possui como objetivo oferecer informações sobre mudanças climáticas na Terra ao longo do tempo, sejam elas causadas por variabilidade natural ou por mudanças no forçamento radiativo (EYRING et al., 2016). Para tanto, o projeto reúne resultados de modelos climáticos que reproduzem o clima passado, presente e futuro, incluindo acoplamento entre o oceano e a atmosfera. Tais modelos são elaborados por diversos centros de modelagem climática em todo mundo.

A fim de possibilitar a análise e comparação das simulações, além de proporcionar aos usuários uma melhor organização, o CMIP possui protocolos e padrões de publicações internos que devem ser respeitados pelas instituições ao submeterem os resultados de seus modelos. Atualmente, o *Earth System Grid Federation* (ESGF), uma colaboração de centros de modelagem climática, é responsável por oferecer o acesso seguro de dados dos modelos climáticos do CMIP à comunidade científica através de uma plataforma online.

A primeira fase do CMIP, denominada CMIP1, apresentou resultados de modelos acoplados gerando rodadas de controle do período presente (MEEHL et al., 2005). Na fase seguinte, o CMIP2, as rodadas também incluíram experimentos nos quais a quantidade de emissão de CO_2 na atmosfera era acrescida de 1% ao ano. Devido às restrições nos resultados dos modelos produzidos nessas fases, seguiu-se o CMIP2+, visando reunir todos os dados produzidos pelas rodadas de controle e por forçamento de CO_2.

Com resultados de modelos submetidos entre 2005 e 2006, o CMIP3 forneceu uma forte base científica para o AR4 do IPCC. Essa fase contou com modelos climáticos mais complexos, denominados modelos de circulação geral atmosfera-oceano (AOGCMs, em inglês). O projeto envolveu doze experimentos, dentre eles simulações desde o final do século 1800 (período pré-industrial) até o ano 2000, podendo incluir forçamentos naturais e de origem antropogênica (MEEHL et al., 2007).

Entre 2010 e 2014 ocorreu a quinta fase do CMIP, o CMIP5, buscando resolver problemas levantados durante o AR4 do IPCC a fim de auxiliar a elaboração do AR5. O CMIP5 procurou identificar aspectos relacionados ao ciclo do carbono e às nuvens, responsáveis por causar diferenças entre modelos ainda não explicadas. Além disso, o projeto tinha o intuito de avaliar a capacidade dos modelos em simularem o clima passado e prever mudanças futuras, bem como entender como simulações em condições iniciais de forçamento semelhantes podem produzir resultados significativamente distintos. Essa fase buscou abranger interesses de diferentes comunidades, como cientistas das áreas de modelagem climática, modelagem biogeoquímica e análise do clima (TAYLOR; STOUFFER; MEEHL, 2012).

Para tanto, o CMIP5 contou com dois grupos de experimentos realizados em AOGCMs. O primeiro grupo caracterizou-se por simulações de curto prazo, podendo ser históricas ou de previsão do clima. O segundo grupo, por sua vez, envolveu simulações de longo prazo. Nesse grupo de experimentos, pela primeira vez na história do CMIP, alguns AOGCMs foram acoplados com componentes biogeoquímicos, passando então a denominarem-se Modelos de Sistema Terrestre (ESMs, em inglês). Assim, o ciclo do carbono passou a ser computado dentro desses modelos, tornando-os mais complexos. Esse grupo compreendeu rodadas históricas, rodadas de controle, simulações de modelos atmosféricos com TSM observada integrantes do *Atmosferic Model Intercomparison Project* (AMIP) e simulações de projeções futuras, usando diferentes cenários denominados RCPs (*Representative Concentration Pathways*). Foram estabelecidos quatro cenários diferentes que o planeta poderia seguir até o final do século XXI, de acordo com parâmetros como a emissão e concentração atmosférica de GEE. Os cenários foram denominados RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 e RCP2.6, sendo caracterizados de acordo com a quantidade de forçamento radiativo esperada em 2100, em comparação com o período pré-industrial (de 1850 a 1900). Por exemplo, o cenário RCP8.5, indica que o forçamento radiativo aumentará até alcançar 8.5 W/m² em 2100 (TAYLOR;

STOUFFER; MEEHL, 2012). Nesse cenário, o sistema terrestre seguiria com as emissões antrópicas crescentes de GEE na atmosfera, sem a interferência de políticas climáticas até o final do século. O cenário RCP2.6 indica um futuro com rígida mitigação e os cenários RCP4.5 e RCP6.0 descrevem cenários intermediários.

Atualmente o CMIP encontra-se em sua sexta fase, o CMIP6, tendo seu design experimental e organização descritos por Eyring et al. (2016). A presente fase procura contribuir para a resolução dos Grandes Desafios da Ciência do WCRP (*WCRP Grand Science Challenges*), tais como o aquecimento da criosfera e suas consequências para o planeta, a avaliação de eventos climáticos extremos e o desenvolvimento da previsão do tempo de curto prazo, por exemplo. Assim, o CMIP6 possui como intuito responder questões sobre como o sistema terrestre reage ao forçamento, quais são as origens e consequências de vieses nos modelos e como é possível avaliar as mudanças climáticas dadas as incertezas e variabilidade climática dentro de diferentes cenários.

Buscando proporcionar uma melhor experiência tanto para as instituições que submetem seus modelos, quanto para os usuários dos dados, o CMIP6 estrutura-se em três partes. A primeira é constituída pelo Diagnóstico, Avaliação e Caracterização do Clima (DECK, em inglês) e por simulações históricas. A segunda parte ocupa-se da padronização e documentação dos modelos, para que os resultados produzidos nessa etapa do CMIP sejam organizados, facilitando o acesso e análise dos dados. Já a terceira parte reúne um conjunto de modelos construídos com base no DECK e nas simulações históricas, visando solucionar questões até então não respondidas por fases anteriores do CMIP (EYRING et al., 2016).

O DECK é composto por um conjunto de quatro experimentos, formando a base sobre a qual as fases do CMIP serão estruturadas a partir do CMIP6. O primeiro experimento é formado por modelos do AMIP e compreende simulações históricas, de 1979 até 2014, da circulação geral da atmosfera. Os modelos do AMIP não são acoplados, ou seja, nesses modelos a TSM e a concentração de gelo marinho (CGM) são prescritos com base em observações. Isso permite que os componentes atmosféricos e terrestres sejam avaliados isoladamente das demais interações, o que facilita a identificações de erros que se originam destes componentes nos modelos. Diferentemente do AMIP, todos os demais experimentos possuem acoplamento oceano-atmosfera.

O segundo experimento do DECK é composto por rodadas de controle pré-industriais (piControl ou esm-piControl), ou seja, rodadas que partem de condições iniciais observadas e se estendem até pelo menos as condições climáticas da superfície se estabilizarem. Nessas rodadas são utilizados forçamentos de 1850, ano a partir do qual houve intensificação nas atividades industriais. Enquanto as rodadas piControl possuem concentrações de CO_2 prescritas, as esm-piControl obtêm essa informação a partir de cálculos no modelo, tendo como dados prescritos apenas as fontes antropogênicas de CO_2.

O terceiro experimento, denominado abrupt-4xCO_2, consiste na quadruplicação da quantidade inicial de CO_2 na atmosfera. Esse experimento é realizado desde o CMIP5 e suas condições iniciais são semelhantes às da rodada piControl, exceto pela quantidade de CO_2 no ar em 1850, a qual é quadruplicada e mantida fixa em todo experimento, permitindo a análise do forçamento radiativo efetivo e da sensibilidade climática de equilíbrio (EYRING et al., 2016).

Já o quarto experimento (1pctCO_2), que é realizado desde o CMIP2, possui o objetivo de verificar o comportamento de modelos submetidos ao aumento de CO_2 atmosférico em quantidades menores e mais realistas do que no experimento abrupt-4XCO_2. O 1pctCO_2 também parte da rodada piControl, entretanto a concentração de CO_2 é acrescida de 1% ao ano, a partir de 1850.

As simulações históricas do CMIP englobam o período de 1850 até 2014 e denominam-se historical ou esm-hist, derivando das rodadas de controle piControl e esm-piControl, respectivamente. Essas simulações são submetidas a diversos tipos de forçamentos baseados em observações como variabilidade solar, concentrações de GEE de origem antrópica na atmosfera e presença de aerossóis vulcânicos (EYRING et al., 2016).

A terceira parte do CMIP6 é formada por um conjunto de 21 projetos com diferentes propostas, dentro dos quais os grupos de modelagem climática podem submeter os resultados de seus modelos. Esse conjunto recebe o nome de '*Model Intercomparison Projects*', ou MIPs, e todos os modelos envolvidos também realizam experimentos do DECK e das rodadas históricas. Cada um dos 21 temas selecionados para essas simulações foi escolhido previamente, de acordo com interesses de grupos de pesquisa que participariam do CMIP6, tendo em vista sanar questões deixadas em

aberto por fases anteriores do CMIP como, por exemplo, a identificação de erros sistemáticos em modelos (EYRING et al., 2016).

Analogamente às simulações de projeções futuras realizadas no CMIP5, um dos MIPs (ScenarioMIP) ocupa-se em realizar experimentos em cenários futuros, através de modelos que envolvem dados socieconômicos em seus cálculos. Tais modelos são conhecidos como *Integrated Assessment Models* (IAMs).

Os cenários sobre os quais as simulações são realizadas denominam-se SSPs ('*Shared Socioeconomic Pathways*') e dividem-se em cinco caminhos pelos quais a sociedade pode evoluir até o final do século XXI. Além disso, os modelos avaliam como a mitigação das mudanças climáticas pode ser alcançada ao agregar resultados dos RCPs nas projeções. Dessa forma, o primeiro caminho (SSP1) propõe um cenário otimista, no qual a sociedade recebe investimentos nas áreas da educação e da saúde, possuindo alto desenvolvimento econômico acompanhado de crescentes práticas sustentáveis. O quinto caminho (SSP5) segue o mesmo cenário que o primeiro com exceção da sustentabilidade, que é substituída pelo consumo de combustíveis fósseis. Por outro lado, o terceiro caminho (SSP3) narra um cenário pessimista, com poucos investimentos em saúde e educação e baixo desenvolvimento econômico, no qual os países focam em segurança regional. O quarto caminho (SSP4) assemelha-se ao SSP3, porém descreve um cenário com grande desigualdade entre os países. Já o segundo (SSP2) apresenta um cenário central, no qual as tendências econômicas e sociais seguem o padrão histórico (O'NEILL et al., 2016).

Dentro de cada um dos cinco cenários os experimentos distinguem-se de acordo com o forçamento radiativo esperado no fim do século, assim como os RCPs no CMIP5. Dessa forma, no CMIP6 as projeções podem ser classificadas pelo forçamento esperado até 2100 de 8.5 W/m², 7.0 W/m², 6.0 W/m², 4.5 W/m², 3.4 W/m², 2.6 W/m² ou 1.9 W/m², e a nomenclatura do experimento é expressa como, por exemplo, SSP2-4.5. Os quatro cenários do CMIP5 receberam novas versões para o CMIP6, portanto, o cenário SSP1-2.6 é correspondente ao RCP2.6, o SSP2-4.5 ao RCP4.5, o SSP4-6.0 ao RCP6.0 e, por fim, o SSP5-8.5 é equivalente ao RCP8.5. Para os modelos participantes do ScenarioMIP, é exigido que sejam feitas simulações em todos esses quatro cenários, com exceção do SSP4-6.0, o qual é substituído pelo novo SSP3-7.0. Assim, os cenários-base do ScenarioMIP são formados pelos SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5.

Cerca de 20 instituições de pesquisa participaram do CMIP5, submetendo resultados de mais de 50 modelos. Já o CMIP6 conta atualmente com a participação de mais de 100 modelos de 53 instituições ao redor do mundo.

2.4 SIMULAÇÕES DO SMAS POR MODELOS DO CMIP6

2.4.1 Representações do SMAS por modelos do CMIP6

De acordo com o sexto relatório do IPCC (AR6), mudanças climáticas provocadas pelo aquecimento global já podem ser observadas em todo mundo, sendo evidente a influência humana no aumento da temperatura. Segundo o relatório, em comparação com o período pré-industrial (1850-1900), a temperatura atual (2011-2020) da superfície global aumentou em 1,09°C, sendo que destes, 1,07°C deveu-se provavelmente às ações humanas (MASSON-DELMOTTE et al., 2021). O AR6 também atribui às atividades antrópicas alterações nos padrões de precipitação desde a metade do século XX, além do aumento de eventos climáticos extremos como chuvas intensas e secas. O relatório mostra que a precipitação média sobre os continentes provavelmente aumentou desde 1950, com uma taxa de aumento maior a partir de 1980. Contudo, no domínio da monção global, houve diminuição da precipitação entre as décadas de 1950 e 1980 como consequência de emissões de aerossóis antropogênicos. Após esse período, constatou-se o aumento da precipitação, resultado da crescente emissão de GEE por atividades humanas e da variabilidade climática natural.

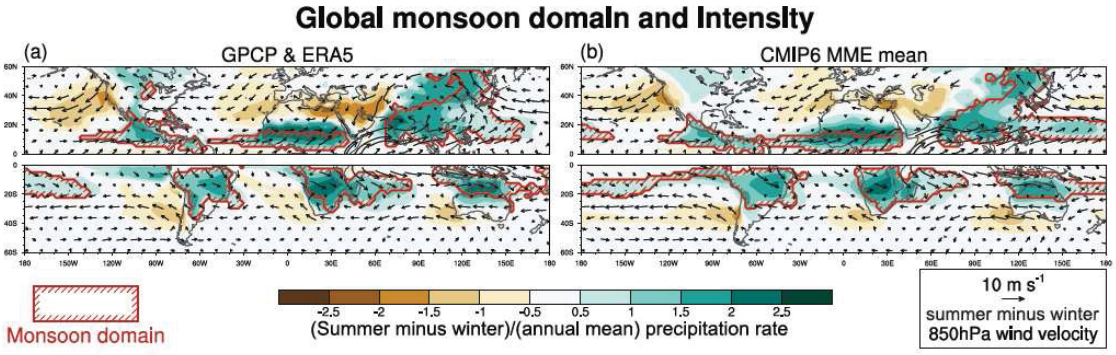
De acordo com o estudo feito por Wang, Jin e Liu (2020) utilizando um conjunto de 15 modelos participantes do CMIP6, concluiu-se que os modelos representam realisticamente o domínio da monção global sobre os continentes no clima presente, embora o domínio se estenda demasiadamente sobre os oceanos. Além disso, os modelos subestimam a intensidade da precipitação de monção sobre o México e leste da Ásia e superestimam em regiões subtropicais normalmente secas. Considerando o domínio total da monção global, o conjunto de modelos reproduz bem a precipitação anual média no HN, subestimando-a em apenas 1,7%. Também a duração da monção é bem representada nesse hemisfério. Por outro lado, os modelos simulam a precipitação anual média no domínio da monção do HS 20,2% maior do que valores observados, com o começo da monção avançado em duas pêntadas e o

seu fim atrasado em 4,5 pêntadas. Além disso, através da comparação do primeiro modo de variabilidade dos modelos com o primeiro modo observado e sua correlação com o índice Niño-3.4, mostrou-se que os modelos são capazes de reproduzir bem a variabilidade interanual da precipitação da monção global, apesar de subestimarem sua relação com o ENOS.

Embora os modelos do CMIP6 reproduzam melhor a precipitação média anual global em relação aos modelos do CMIP5, ainda apresentam erros sistemáticos como dupla ZCIT no Pacífico tropical e deslocamento para sul da ZCIT no Atlântico equatorial. Logo, os modelos do CMIP6 ainda possuem limitações ao simularem padrões de precipitação, especialmente sobre o oceano tropical (EYRING et al., 2021).

A FIGURA 7 abaixo apresenta a intensidade da precipitação no domínio da monção global, definida pela diferença entre as climatologias de precipitação de verão e inverno em cada hemisfério, dimensionada pela taxa de precipitação média anual (WANG; DING, 2008). Ainda, é mostrada a circulação atmosférica em 850 hPa, tanto para dados observados (FIGURA 7a) como para a média de um conjunto de 56 modelos do CMIP6 participantes das rodadas históricas (FIGURA 7b), no período de 1979 a 2014. Assim, verifica-se o aumento da precipitação do inverno para o verão no domínio da monção global (regiões delimitadas por linhas vermelhas) e a capacidade dos modelos do CMIP6 reproduzirem satisfatoriamente as condições observadas, especialmente no HN.

FIGURA 7 – DIFERENÇA ENTRE AS CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO DE VERÃO E INVERNO (VERÃO - INVERNO) PARA CADA HEMISFÉRIO, DIMENSIONADA PELA TAXA ANUAL DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA E CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA EM 850 hPa PARA: A) DADOS OBSERVADOS E B) MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS DO CMIP6, PARA O PERÍODO DE 1979 A 2014.



FONTE: Adaptado de Eyring et al. (2021).

Através de resultados de modelos que participaram do CMIP5, Vera e Díaz (2015) mostraram que para a AS, no período de 1902 a 2005, houve tendência positiva na precipitação de verão em SESA e negativa no centro do Brasil e sul dos Andes, consistentes com observações para mesmo período. Essas mudanças na precipitação estão relacionadas com forçamentos provocados por atividades antrópicas (VERA e DÍAZ, 2015) e, em SESA, também estão associadas à variabilidade interdecadal (GRIMM; SABOIA, 2015; CARVALHO; GRIMM; DOMINGUEZ, 2020) e à diminuição do ozônio na atmosfera (GONZALEZ et al., 2014).

Utilizando um maior número de resultados de modelos do CMIP5 para o período de 1980 a 2005, Díaz e Vera (2017) verificaram que os modelos reproduzem bem a precipitação de verão na AS, apesar de não representarem adequadamente a precipitação associada à ZCIT no Atlântico equatorial. Os modelos superestimam a precipitação média no Nordeste do Brasil, na costa do Pacífico e no sul dos Andes e a subestimam em regiões próximas ao equador e sobre o domínio da monção, na ZCAS e em SESA. Além disso, verificou-se que a distribuição espacial da variabilidade interanual simulada pelos modelos é similar à observada. Os modelos fazem boa representação da variabilidade na ZCAS, porém mostram valores maiores que o observado no Nordeste do Brasil e menores que o observado em SESA. Os autores ainda avaliaram a performance dos modelos ao simularem as características do primeiro modo de variabilidade de precipitação de verão da AS. Assim, constatou-se que os modelos apresentam resultados semelhantes entre si e muito próximos do observado. Todas as simulações analisadas mostram um padrão de dipolo centrados em SESA e na região da ZCAS (conforme descrito por Grimm (2011)), demonstrando uma reprodução satisfatória do primeiro modo de variabilidade do verão. Em comparação com o período de 1902 a 1953, os modelos apresentam para o período de 1954 a 2005 aumento na frequência de anomalias de precipitação positivas em SESA e negativas na região da ZCAS e diminuição na frequência de inversões dessas anomalias.

Um estudo conduzido por Díaz, Saurral e Vera (2021) utilizando um conjunto de 7 modelos participantes do CMIP5 e 4 modelos do CMIP6, avaliou a climatologia, a variabilidade interanual e tendências de precipitação no verão austral sobre a AS, para o período de 1981 a 2010. De acordo com os autores, todos os modelos são capazes de reproduzir até certo ponto os padrões de precipitação observados,

divergindo entre si quanto à localização e intensidade do máximo da precipitação de monção. Alguns modelos falham ao representar a chuva associada à ZCIT e, consequentemente, apresentam valores maiores que o observado para a chuva no Nordeste do Brasil. Com relação à variabilidade interanual, alguns modelos a superestimam no centro do Brasil e em regiões próximas, enquanto outros a subestimam em quase todas as demais regiões. As simulações também mostram falhas ao reproduzir o máximo secundário da variabilidade interanual de precipitação em SESA, onde a maioria dos modelos subestimam a variabilidade. Para o período de 1952 a 2014, os resultados dos modelos mostram grandes discrepâncias para tendências da precipitação média de verão, discordando entre si sobre os sinais apresentados pelas tendências, especialmente na região tropical. Contudo, em SESA os modelos apresentam tendências positivas para a precipitação no verão enquanto que, no sul dos Andes, todos os modelos indicam tendências negativas, diferindo-se apenas em intensidade.

Através da análise de 38 modelos que participaram unicamente do CMIP6, Almazroui et al. (2021) verificaram que os modelos são capazes de reproduzir bem a precipitação observada sobre a AS no clima presente, particularmente de abril a setembro. Em concordância com observações, os modelos simulam bem a precipitação no domínio da monção da AS e em SESA. Entretanto, subestimam a precipitação sobre a Amazônia e sobre a bacia do Prata e superestimam na Bolívia, no Peru, no Equador e em parte da Colômbia. Assim também, Ortega et al. (2021), ao avaliar a performance de modelos do CMIP6 ao representarem a precipitação sazonal da AS, verificaram que as simulações reproduzem bem a chuva sobre o continente nas regiões do Chaco e do Cerrado brasileiro, além de mostrarem o máximo da precipitação sobre os Andes. Por outro lado, os modelos novamente falham ao representarem a ZCIT, subestimando a precipitação no noroeste da AS e nos oceanos Pacífico e Atlântico equatoriais.

De forma geral, não existe um modelo que consiga reproduzir todas as características do clima na AS. A performance dos modelos varia muito de acordo com a escala espacial e temporal em que as análises são feitas e também segundo o parâmetro que está sendo avaliado. Além disso, vale destacar que tanto Almazroui et al. (2021) quanto Ortega et al. (2021) utilizaram em seus estudos apenas uma única rodada de cada modelo, o que favorece a presença e propagação de erros sistemáticos nas análises. Sendo assim, não existem estudos recentes que avaliem a

performance de modelos do CMIP6 ao reproduzirem aspectos do SMAS, utilizando a média do conjunto de rodadas de cada modelo.

2.4.2 Projeções do SMAS por modelos do CMIP6

De acordo com o AR6, é muito provável que a temperatura média da superfície global aumente até o final do século XXI em todos os cenários de emissões considerados, em comparação com o período pré-industrial (1850-1900). Dentro do cenário de baixas emissões SSP1-1.9, é esperado que haja o aumento de 1,0°C a 1,8°C; no cenário intermediário SSP2-4.5, o aumento esperado é de 2,1°C a 3,5°C e no cenário SSP5-8.5 de altas emissões de GEE, estima-se o aumento de 3,3°C a 5,7°C (MASSON-DELMOTTE et al., 2021). O aumento da temperatura provoca muitas mudanças no sistema climático em geral, como o aumento da frequência e intensidade de extremos de calor, o derretimento de coberturas de neve, a elevação do nível dos oceanos, eventos de precipitação intensa e secas em determinadas regiões. Também é esperado aumento na precipitação anual média sobre os continentes em quase todos os cenários do AR6. Nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, por exemplo, projeta-se o aumento na precipitação anual média de 1,5% a 8% e de 1% a 13%, respectivamente, até o final do século. Concomitantemente, estima-se com alta confiança que haverá aumento na precipitação de monção de médio a longo prazo em escala global (MASSON-DELMOTTE et al., 2021).

Resultados de simulações do CMIP5 indicam que não apenas a precipitação, mas também a extensão do domínio e a intensidade da monção em todo o mundo apresentará um aumento, ao mesmo tempo em que a circulação se enfraquecerá, até o final do século XXI (KITOH et al., 2013). Os modelos ainda mostram que o aumento dessa precipitação será maior no HN do que no HS, provavelmente por conta da diferença de temperatura entre os hemisférios (LEE; WANG, 2014).

Segundo Wang et al. (2021), estima-se que a precipitação de monção sobre os continentes será maior do que sobre os oceanos em todos os quatro cenários-base de projeções futuras do CMIP6. Em relação ao clima presente, calcula-se que a precipitação de monção sobre os continentes aumentará em aproximadamente 3,52% no cenário SSP2-4.5 e em 5,75% no cenário SSP5-8.5 até 2099 (CHEN et al., 2020). Para o final do século, as projeções do CMIP6 mostram a precipitação sobre os continentes 50% maior em relação às projeções do CMIP5. Ademais, projeta-se para

o futuro aumento da intensidade e da frequência de eventos extremos da precipitação de monção (WANG et al., 2021).

Através da análise de 15 modelos que participaram do CMIP6 sob o cenário SSP2-4.5, Wang, Jin e Liu (2020) indicaram que a precipitação de monção sobre os continentes do HN sofrerá um aumento de 2,8% a cada incremento na temperatura de 1°C (2,8%$^{\circ}C^{-1}$) causado pelo aquecimento global. Enquanto isso, no HS ocorrerá um decréscimo de apenas 0,3% $^{\circ}C^{-1}$. As projeções dos modelos indicam um atraso no começo da estação de monção no HS, enquanto que seu fim permanece inalterado, implicando em uma abreviação da estação chuvosa de monção. Ainda no HS, os modelos presumem um aumento anual de 6,5% na amplitude da precipitação de monção sobre os continentes, marcando verões bastante úmidos e invernos mais secos. O modo principal da variabilidade interanual da precipitação aparece mais controlado pela variabilidade do ENOS. Com relação ao padrão de circulação, o conjunto de modelos prevê um enfraquecimento do vento meridional que cruza o equador, o qual é fortemente ligado com o SMAS.

Apesar de não ser possível determinar seus exatos efeitos, os GEE são capazes de afetar sistemas de monções em todo o mundo. Dessa forma, dada uma maior concentração desses gases no HN ao longo do tempo, ocorre um aquecimento maior desse hemisfério em relação ao HS. Isso faz com que a pressão ao nível do mar seja maior no HS, o que gera fluxos que cruzam o equador em direção ao norte, levando umidade. Consequentemente, ocorre o aumento de chuvas e duração da estação chuvosa da monção no HN e a diminuição de chuvas e encurtamento da estação chuvosa de monção no HS (WANG; JIN; LIU, 2020).

Para a AS, resultados de projeções futuras do CMIP5 não mostram grandes mudanças na precipitação total da monção (KITOH et al., 2013). Da mesma forma, os modelos do CMIP6 mostram que, até o final do século, o aumento da precipitação acompanhará a crescente emissão de GEE na atmosfera de acordo com os diferentes cenários, porém a variação da precipitação média anual não sofrerá grandes alterações, sendo menor que 1% $^{\circ}C^{-1}$ (MOON; HA, 2020). Estima-se, portanto, que mudanças nos padrões de precipitação futuros ocorram em escala regional e pareçam-se com anomalias causadas pelo El Niño, com aumento do máximo de precipitação de monção e com invernos mais secos (ALMAZROUI et al., 2021; WANG et al., 2021).

Com relação à duração da monção na AS, alguns estudos envolvendo modelos do CMIP5 mostram futuro atraso no início da monção (FU et al., 2013; PASCALE et al., 2016; SENA; MAGNUSDOTTIR, 2020), enquanto outros preveem um adiantamento em seu início e atraso no final (JONES; CARVALHO, 2013). MOON e HA (2020) confirmaram, através de resultados de modelos do CMIP6, as projeções de atraso no início da monção sul-americana sob o cenário SSP5-8.5.

Projeções apresentadas pelo AR6 mostram mudanças na precipitação anual da AS em um padrão de dipolo, com diminuição da precipitação nas regiões nordeste e sudoeste da AS e aumento nas regiões noroeste e sudeste da AS (RANASINGHE et al., 2021). Assim também Almazroui et al. (2021), através do estudo de 38 modelos participantes do CMIP6, estimaram que a precipitação irá diminuir a leste do norte dos Andes na região tropical da AS, na região sul dos Andes e na Amazônia. Por outro lado, projeta-se o aumento da precipitação no sudeste da AS e no norte dos Andes. Estes resultados também concordam com as projeções feitas pelo CMIP5. Os modelos também apresentam para o futuro um aumento da sazonalidade na distribuição de precipitação intra-anual e, até o final do século, estima-se que anomalias de precipitação extrema se tornem mais frequentes. Em todos os cenários futuros testados pelos autores (os quatro cenários-base do *ScenarioMIP*), as alterações na precipitação somente passam a serem significativas, em termos de magnitude, dentro dos cenários SSP3-7.0 e SSP5-8.5, ou seja, em cenários futuros onde muito pouco foi feito para reduzir as ações antrópicas que contribuem para o aquecimento global.

Utilizando um conjunto de 33 modelos participantes do CMIP6 sob o cenário SSP5-8.5 no período de 2071 a 2100, Ortega et al. (2021) verificaram que para o outono austral as projeções indicam diminuição da precipitação no leste e aumento no sudeste da AS. Ainda no outono e também durante o inverno, projeta-se a redução da precipitação em regiões como norte da AS, centro do Chile, Bacia Amazônica e Cerrado brasileiro. Durante o verão, os modelos projetam o aumento da precipitação na região do Chaco e do Cerrado brasileiro, e a diminuição da precipitação durante o inverno e a primavera nessas regiões. Contudo, assim como na avaliação da reprodução do clima presente pelos modelos, Ortega et al. (2021) (e também Almazroui et al. (2021)) utilizaram apenas uma rodada de cada modelo nas análises de projeções futuras. Essa prática favorece a presença e propagação de erros

sistemáticos e incertezas nas análises, uma vez que apenas uma configuração de condições iniciais é usada.

Outro aspecto importante na avaliação das projeções climáticas é a variabilidade interanual da precipitação na AS e sua possível relação com a TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico. Embora não haja estudos recentes que façam essas análises, envolvendo modelos que participaram dos últimos relatórios do IPCC, Grimm e Natori (2006) avaliaram, dentro do cenário A2 de altas emissões de GEE do AR4, tais projeções para o final do século XXI. Segundo as autoras, as projeções mostram a redução dos impactos do ENOS na precipitação do Sudeste da AS na primavera austral. Isso acontecerá, provavelmente, por conta da redução do gradiente latitudinal de TSM no Pacífico central, implicando em condições desfavoráveis para a propagação das ondas de Rossby em direção a SESA, enfraquecendo a teleconexão do ENOS com essa região. Por outro lado, o impacto no norte da AS é fortalecido na primavera e apresenta o centro da anomalia de precipitação deslocado para oeste em relação ao clima presente. Para o verão, as mudanças projetadas seguem o mesmo padrão da primavera, porém com menos intensidade e indicam aumento de precipitação na Amazônia.

Até o momento não foram feitos estudos com resultados do CMIP6 que mostrem a variação do SMAS com maior resolução temporal como, por exemplo, a avaliação de mudanças projetadas para a precipitação e circulação em diferentes meses dentro da estação de monção. Além disso, os modelos do CMIP6 ainda não foram avaliados quanto às simulações da variabilidade interanual de precipitação e de TSM no clima presente e em cenários futuros.

3 DADOS E MÉTODOS

3.1 DADOS

Para análises do clima presente, foram utilizadas rodadas de simulações históricas de 11 modelos participantes do CMIP6 para o período de 1979 a 2014. Os mesmos modelos foram avaliados quanto a projeções para o clima futuro dentro dos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para o período de 2065 a 2100. A TABELA 1 apresenta os modelos analisados, indicando o número de membros (rodadas) em cada experimento e também as resoluções das grades originais dos modelos. Para cada modelo, foram obtidos dados mensais de precipitação e dos componentes zonal e meridional do vento e de TSM, em cada experimento. Para os componentes do vento, os dados foram obtidos em 850 hPa e 200 hPa. As referências de cada modelo podem ser consultadas na TABELA A1 no Anexo 1.

Os modelos foram selecionados com base em resultados apresentados por estudos anteriores (e.g., WANG; JIN; LIU, 2020; DÍAZ; SAURRAL; VERA, 2021; ORTEGA et al., 2021), buscando-se utilizar modelos de diferentes instituições que apresentassem um bom desempenho ao reproduzir o clima presente, especialmente na AS. Além disso, o número de membros dos modelos em cada experimento foi um importante fator considerado para a seleção. As rodadas de um modelo diferem se houver diferenças, mesmo pequenas, em suas condições iniciais. Assim, segundo Kay et al. (2015), o resultado de somente uma rodada de um modelo climático geralmente é insuficiente para que seja feita a comparação entre saídas de modelos e dados de observações, a comparação entre rodadas históricas de modelos ou mesmo projeções futuras. Dessa forma, foram escolhidos modelos que realizaram mais de uma rodada em todos os experimentos: histórico ou em cenários futuros. A partir do conjunto de rodadas, foi feito o cálculo da média de conjunto de cada modelo (*ensemble mean*), capaz de representar melhor seu desempenho ao reduzir possíveis erros sistemáticos e tendências presentes em cada rodada.

Além da avaliação de cada modelo, também foram feitas análises para a média do conjunto de todos os modelos (*ensemble* multi-modelo), para a média do conjunto de modelos que foram capazes de representar o ENOS no clima presente e para a média do conjunto dos modelos com melhor desempenho em simular o ENOS no clima presente.

TABELA 1 – MODELOS UTILIZADOS DO CMIP6. (Continua)

Modelo	**Instituição/País**	**Membros (Histórico)**	**Membros (SSP2-4.5)**	**Membros (SSP5-8.5)**	**Resolução da grade lat x lon (atmosfera)**	**Resolução da grade lat x lon (oceano)**
ACCESS-ESM1-5	*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)*, Austrália	40	40	40	145 x 192 *	300 x 360
CanESM5	*Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CCCma)*, Canadá	25	25	25	64 x 128	291 x 360
CESM2	*National Center for Atmospheric Research (NCAR)*, EUA	11	3	3	192 x 288	384 x 320 ˣ
CNRM-CM6-1	*Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM), Centre Europeen de Recherche et de Formation Avancee en Calcul Scientifique (CERFACS)*, França	19	6	6	128 x 256	294 x 362
EC-Earth3-Veg	*EC-Earth consortium*, Conjunto de Países da Europa	7	6	6	256 x 512	292 x 362
HadGEM3-GC31-LL	*Met Office Hadley Centre (MOHC)*, Reino Unido	5	5	4	144 x 192 †	330 x 360
IPSL-CM6A-LR	*Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)*, França	32	11	6	143 x 144	332 x 362

TABELA 1 – MODELOS UTILIZADOS DO CMIP6 (Conclusão)

Modelo	**Instituição/País**	**Membros (Histórico)**	**Membros (SSP2-4.5)**	**Membros (SSP5-8.5)**	**Resolução da grade lat x lon (atmosfera)**	**Resolução da grade lat x lon (oceano)**
KACE-1-0-G	*National Institute of Meteorological Sciences/Korea Meteorological Administration (NIMS-KMA)*, República da Coreia	3	3	3	144 x 192 †	200 x 360
MIROC6	*Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)*, Japão	50	3	50	128 x 256	256 x 360
MPI-ESM1-2-HR	*Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)*, Alemanha	10	2	2	192 x 384	404 x 802
MRI-ESM2-0	*Meteorological Research Institute (MRI)*, Japão	10	5	5	160 x 320	180 x 360

FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: Resultados para precipitação e circulação atmosférica apresentam resolução de grade atmosférica, enquanto TSM apresenta resolução de grade oceânica. * Modelo com resolução da grade de 144 x 192 (lat x lon) apenas para circulação; ˣ Modelo com resolução da grade 180 x 360 (lat x lon) apenas em rodadas históricas; † Modelos com resolução da grade de 145 x 192 (lat x lon) apenas para circulação.

Para comparações entre observações e resultados de precipitação dos modelos, foram utilizados dados observados de precipitação mensal do *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC), versão 2020, com resolução 2,5° x 2,5° de longitude por latitude, os quais estão disponíveis apenas sobre os continentes (SCHNEIDER et al., 2020). Além disso, para algumas análises foram usados dados de mais de 10.000 estações pluviométricas na AS da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), em conjunto com dados de demais agências brasileiras,

dados de serviços meteorológicos de outros países da AS (disponíveis no Laboratório de Meteorologia da UFPR) e dados de Liebmann e Alured (2005).

Para análises envolvendo a circulação atmosférica, dados de reanálise do *National Centers for Environmental Prediction* / *National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) Reanálise 1, foram usados com resolução 2,5° x 2,5° de longitude por latitude (144x73) (KALNAY et al., 1996). Já para análises envolvendo a temperatura da superfície do mar (TSM), foram utilizados dados observados do *Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature* (HadISST1) (RAYNER et al., 2003).

3.2 MÉTODOS

Para realizar as análises, os dados de precipitação dos modelos e os dados de estações tiveram suas grades interpoladas (interpolação bilinear) para a mesma resolução dos dados do GPCC (2,5° x 2,5° de longitude por latitude) e os resultados dos componentes do vento, para mesma resolução dos dados do NCEP/NCAR (2,5° x 2,5° de longitude por latitude). O mesmo foi feito para resultados envolvendo médias de conjuntos de modelos. Portanto, o domínio para a variável precipitação é: (53.75S-16.25S; 83.75W-31.25W), e para os componentes do vento: (52.5S-15S; 82.5W-32.5W).

Além disso, dados observados do HadISST1 e os dados dos modelos de TSM foram interpolados (interpolação bilinear) para grades com resoluções de 5° x 5° de longitude por latitude. Essas análises foram feitas no domínio: (57.5S-57.5N; 180W-175E).

3.2.1 Cálculo de climatologias

A fim de verificar como os modelos participantes do CMIP6 reproduzem no clima presente a precipitação e a circulação de monção da AS, foram obtidas climatologias mensais e sazonais através de médias para a precipitação e para o vento em baixos (850 hPa) e altos níveis da atmosfera (200 hPa). Isso foi feito para cada modelo e para a média do conjunto de todos os modelos. Essas climatologias foram obtidas utilizando rodadas de simulações históricas de 1979 a 2014.

O cálculo de climatologias também foi realizado para dados observados de precipitação do GPCC e para dados de reanálise do NCEP/NCAR, também para o período de 1979 a 2014. Através da comparação destas climatologias com as correspondentes climatologias dos modelos no mesmo período, foi possível avaliar se os modelos são capazes de reproduzir bem a precipitação e a circulação atmosférica no clima presente. Climatologias de precipitação também foram obtidas para dados de estações meteorológicas a fim de propiciar comparações qualitativas. Assim, foram feitas análises sobre simulações de aspectos característicos da monção da América do Sul no clima presente, como o aumento da precipitação no verão e redução no inverno, a Baixa do Chaco, a Alta da Bolívia, etc.

Para a análise de projeções, também foram obtidas climatologias mensais e sazonais através de médias para a precipitação e para o vento em baixos (850 hPa) e altos níveis da atmosfera (200 hPa), novamente para cada modelo e para a média do conjunto de todos os modelos. Nessas avaliações foram utilizados resultados dentro de dois cenários futuros do CMIP6: o cenário SSP2-4.5, de emissões intermediárias de GEE, e o cenário SSP5-8.5, de altas emissões, para o período de 2065 a 2100. Assim, as climatologias de projeções futuras produzidas através dos resultados dos modelos, puderam ser comparadas com as obtidas para o clima presente, de forma a apresentar as principais mudanças climáticas estimadas para o futuro.

Mapas de diferenças entre climatologias de precipitação foram obtidos para o clima presente subtraindo-se a climatologia observada (GPCC) da climatologia dos modelos. O mesmo foi feito para a circulação em 850 hPa e 200 hPa, fazendo-se a diferença entre a climatologia dos modelos e da reanálise (NCEP/NCAR). Analogamente, subtraindo-se as climatologias de precipitação (e circulação atmosférica) produzidas pelos modelos no clima presente das projetadas para o período futuro, obteve-se mapas de diferenças entre clima futuro e presente em cenário pessimista (SSP5-8.5) e mais otimista (SSP2-4.5). Isso foi feito a fim de evidenciar as regiões em que foram produzidas maiores alterações. Para os cenários futuros, foram também produzidos mapas de diferenças sazonais entre climatologias de TSM (projeções – simulações do clima presente).

3.2.2 Análise da simulação do clima presente

Para avaliar objetivamente o desempenho dos modelos na simulação das características médias do clima presente, foram calculados três índices que relacionam os dados observados (ou de reanálise) com os resultados produzidos pelos modelos nas rodadas históricas. Para cada variável analisada, foi feita a média desses índices gerando um índice geral por variável. Por fim, foi calculada a média de todos os índices gerais por variável, a fim de obter um índice geral para a classificação dos modelos segundo seus desempenhos.

Os índices calculados foram:

I. Correlação Espacial

O coeficiente de correlação é uma medida do grau de dependência linear entre duas variáveis. No caso em que, para um determinado instante de tempo, as variáveis a serem comparadas assumem diferentes valores no espaço, a correlação entre elas é denominada espacial. Por exemplo, havendo para um mesmo instante de tempo (por ex., determinado mês ou estação do ano), dois conjuntos de dados dispostos em pontos de grade, a correlação espacial entre os dois conjuntos tem como resultado um único valor que indica a coerência na distribuição espacial destes dois conjuntos. Dessa forma, para verificar objetivamente se os modelos reproduzem bem o clima presente em termos de padrões espaciais das variáveis, foram calculados os coeficientes de correlação espacial entre climatologias mensais ou sazonais correspondentes, ou seja, entre climatologias obtidas a partir de dados observados (ou de reanálise) e as correspondentes de cada modelo e da média do conjunto de modelos.

Para os cálculos, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson mostrado na Equação (1), onde x_i corresponde aos valores da variável observada (ou da reanálise) nos pontos de grade no mês ou estação analisada e y_i, aos valores da variável simulada pelo modelo nos pontos de grade no mesmo mês ou estação. O coeficiente de correlação de Pearson pode variar entre -1 e 1. Quanto mais próximo de 1, melhor é a correlação entre os dados e, quanto mais próximo de 0, pior é a correlação. Por outro lado, o coeficiente com valor próximo de -1 indica uma correlação inversa entre os dados.

$$r(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} {x_i}^2 - n\bar{x}^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n} {y_i}^2 - n\bar{y}^2}} \quad (1)$$

Na Equação (1), n é o número total de pontos de grade de cada variável, e o cálculo é feito apenas quando ambos os valores x_i e y_i correspondentes existem.

Os valores obtidos para os coeficientes de correlação de cada modelo e da média do conjunto de modelos foram subtraídos de 1, visto que todos os resultados foram positivos. Isso foi feito para padronizar os resultados de todos os índices, possibilitando a classificação dos melhores modelos do melhor para o pior em ordem crescente de valor. Posteriormente, cada valor (*1 – r*) foi dividido pela média em cada mês ou cada estação, para a precipitação e para cada componente do vento. Ao final, foi calculada a média anual dos resultados mensais e sazonais de cada modelo em cada variável analisada.

II. Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)

Outra medida para avaliação da simulação do clima presente pelos modelos, é a Raiz do Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error*, RMSE, em inglês) entre climatologias obtidas a partir de dados observados (ou de reanálise) e as correspondentes de cada modelo e da média do conjunto de modelos. O RMSE é definido pela Equação (2), e informa quão próximo os dados dos modelos encontram-se dos dados observados (ou reanálise). Assim, os resultados dos modelos estarão mais próximos dos dados observados (ou reanálise) quanto menor for o RMSE.

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2\right]^{1/2} \quad (2)$$

Analogamente ao coeficiente de correlação, na Equação (2), n é o número total de pontos de grade e x_i e y_i referem-se a cada valor nos pontos de grade dos dados observados (ou reanálise) e dos modelos. Novamente, o cálculo é feito apenas quando ambos os valores x_i e y_i correspondentes existem. Este índice verifica objetivamente se os modelos reproduzem bem o clima presente em termos de magnitude das variáveis.

Os resultados obtidos para cada modelo e média do conjunto de modelos foram posteriormente divididos pela média do respectivo mês ou estação e, por fim,

foi calculada a média anual dos resultados mensais e sazonais de cada modelo, para cada variável analisada.

III. Bias

Além do coeficiente de correlação espacial e do RMSE, também foi calculado o *bias* (viés), ou diferença, entre as climatologias mensais ou sazonais produzidas pelos modelos (e média do conjunto de modelos), e as correspondentes climatologias obtidas de dados observados ou de reanálise. Posteriormente, foi feita a média sobre todos os pontos de grade em cada mês ou estação.

Para possibilitar o cálculo do índice, foi obtido o módulo de todos os resultados do bias, visando obter apenas a grandeza da diferença, desconsiderando o sinal. Logo após, os resultados foram divididos pela média de cada mês ou estação a fim de padronizar a ordem de grandeza das análises. Ao final dos cálculos, foram computadas médias anuais dos resultados mensais e sazonais de cada modelo em cada variável analisada.

Para cada variável, a relação entre os três índices calculados foi estabelecida através do cálculo de um índice geral por variável (IG_V) apresentado na Equação (3) abaixo, obtido para cada modelo. Logo, o IG_V é a média dos resultados de cada índice, para cada modelo (e média do conjunto de modelos) dentro da análise de cada variável.

$$IG_V = \frac{(1 - r) + RMSE + |Bias|}{3} \tag{3}$$

Como explicado anteriormente, para padronizar os valores destes índices, cada um deles foi dividido pela sua média sobre todos os modelos para cada mês ou estação do ano.

Com isso, para uma classificação geral dos modelos quanto à climatologia, foi feita a média de todos os IG_V's calculados para cada modelo, gerando um índice geral (IG), apresentado na Equação (4) abaixo.

$$IG = \frac{IG_V(precip.) + IG_V(U850) + IG_V(V850) + IG_V(U200) + IG_V(V200)}{5} \tag{4}$$

Em (4), U e V indicam os componentes zonal e meridional do vento e 850 e 200, indicam os níveis de 850 hPa e 200 hPa.

Assim, foi possível classificar os modelos e a média do conjunto de modelos quanto à simulação do clima presente na AS.

3.2.3 Análise de Componentes Principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais (ACP), também conhecida dentro das ciências atmosféricas como análise de Funções Ortogonais Empíricas (EOFs, em inglês), é uma técnica da estatística multivariada que consiste em transformar um conjunto de dados contendo um grande número de variáveis em um novo conjunto bastante reduzido, cujas variáveis são combinações lineares das variáveis originais. Tais combinações são capazes de descrever grande parte da variabilidade contida no conjunto de dados originais (WILKS, 2006).

As variáveis do novo conjunto são denominadas componentes principais (CPs), sendo definidas a partir dos autovetores da matriz de covariância ou de correlação das variáveis originais. Uma vez que essas matrizes são simétricas, os autovetores estão sujeitos à condição de serem ortogonais entre si e a variância de cada componente é dada por seu autovalor associado. Assim, o primeiro componente principal representa a maior variância no novo conjunto, o segundo componente representa a segunda maior variância e assim por diante, de forma que todos os componentes juntos descrevem a variância total do conjunto e são não correlacionados entre si.

A variância, utilizada para o cálculo dos componentes principais, depende das magnitudes das variáveis originais. Dessa forma, os CPs obtidos com base na matriz de covariância podem sofrer alterações se as magnitudes de uma ou mais variáveis do conjunto também mudarem. Para evitar que isso aconteça, é comum padronizar as variáveis em termos de desvios padrões, chegando-se na matriz de correlação (JOLLIFFE, T.; CADIMA, J., 2016). Logo, se por um lado a utilização da matriz de covariância resulta em poucos CPs explicando a maior parte da variância, por outro, o uso da matriz de correlação não exige que as variáveis sejam de mesma escala.

Adotando outra terminologia, os autovetores obtidos também podem ser chamados de Funções Ortogonais Empíricas e cada elemento dos autovetores, ou seja, cada peso dado às variáveis originais no cálculo dos componentes principais, pode ser designado por '*factor loading*'. Assim também, cada elemento dos componentes principais pode ser denominado '*factor score*'.

Na meteorologia, a ACP é frequentemente utilizada para análise de dados distribuídos no espaço como, por exemplo, séries temporais distribuídas em pontos de grade, tornando possível a avaliação de variações no espaço e no tempo do conjunto de variáveis envolvidas na análise.

Supondo um espaço com K pontos de grade, para um certo instante de tempo, a cada ponto estará associado um valor de cada variável, as quais podem ser representadas através do vetor unidimensional $\vec{x}$, de forma que $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_K]^T$. Se as variáveis evoluírem no tempo, ou seja, se a cada ponto de grade estiver associada uma série temporal, então $\vec{x}$ será descrito em função do tempo, de forma que $\vec{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_K(t)]^T$. Assim, os componentes principais também dependerão do tempo, podendo ser determinados através da relação apresentada na Equação (5) abaixo (WILKS, 2006).

$$u_m(t) = \sum_{k=1}^{K} e_{km}\, x'_k(t) \qquad , m = 1, \dots, M \tag{5}$$

Na Equação (5), u_m refere-se ao m-ésimo componente principal, e_{km} aos autovetores da matriz de covariância ou correlação e x'_k, às variáveis do conjunto de dados originais, representadas como anomalias ($x' = x - \bar{x}$).

Uma vez que cada variável de $\vec{x}$ é medida em um ponto diferente do espaço, cada elemento do autovetor (e_{km}, ou *factor loading*) pode ser plotado em um mapa no mesmo ponto que sua variável correspondente x'_k e, assim, o espaço formado por esses elementos pode ser representado através de isolinhas. Portanto, esses mapas mostram as regiões que contribuem mais fortemente aos respectivos componentes principais e representam a distribuição espacial dos modos de variabilidade não correlacionados da ACP (WILKS, 2006).

A fim de facilitar a interpretação física dos CPs, é comum realizar a rotação de um subconjunto de autovetores iniciais para um outro conjunto com novas coordenadas. Para tanto, é escolhido um subconjunto inicial associado aos maiores autovalores. Assim, os CPs resultantes passam a ser definidos como componentes principais rotacionados e, dependendo do método utilizado para a rotação dos autovetores, as condições de não-correlação entre esses componentes e de ortogonalidade dos autovetores podem ou não ser preservadas.

No presente trabalho, a ACP foi realizada para dados observados de precipitação do GPCC, para dados de estações pluviométricas e para resultados de

precipitação dos modelos do CMIP6 no período de 1979 a 2014. Ainda para esse período, o cálculo da ACP também foi feito para dados observados de TSM do HadISST1 e para resultados de TSM dos modelos. Para todos os modelos, as análises de precipitação e TSM foram também realizadas para o período futuro de 2065 a 2100, dentro dos dois cenários estudados (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

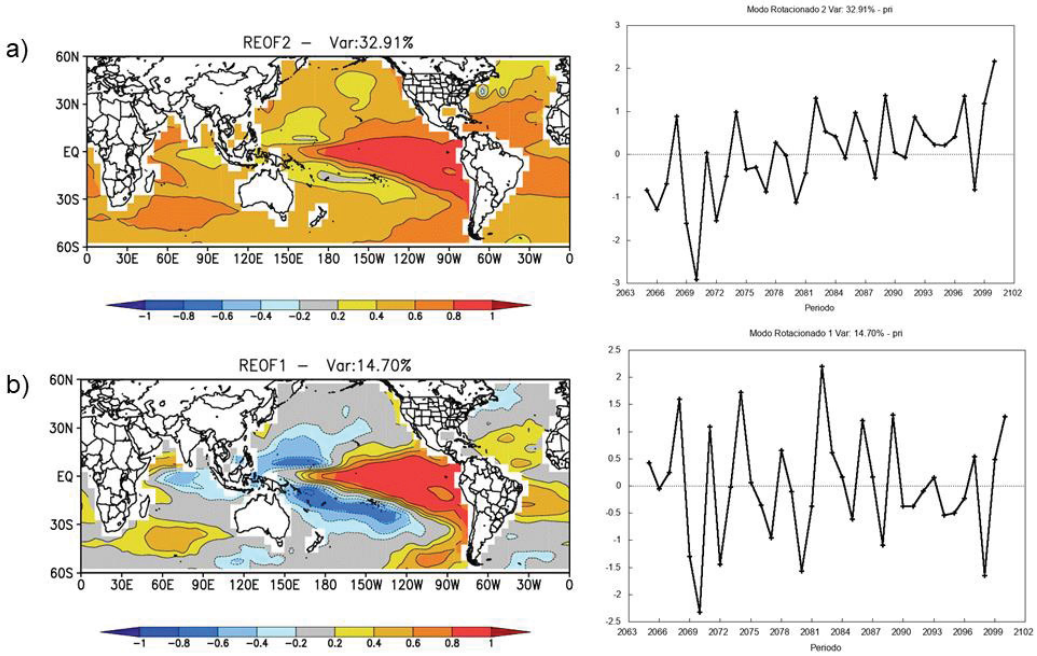
Para as avaliações, foi feita a rotação ortogonal do subconjunto de autovetores através do método Varimax, proposto por Kaiser (1958). Uma vez que os modos não rotacionados estão sujeitos à condição de ortogonalidade no espaço (além da ortogonalidade no tempo), a utilização de modos rotacionados pode aumentar a interpretabilidade dos resultados (RICHMAN, 1986).

Assim, utilizando matrizes de correlação para o cálculo da ACP, foram produzidos mapas para cada modo de variabilidade, ou Função Ortogonal Empírica Rotacionada (REOF, em inglês), mostrando os *factor loadings* (FL). Obteve-se também as séries de *factor scores* (FS) associadas aos respectivos modos, juntamente com a fração da variância explicada por cada componente principal. Essas análises foram realizadas para a primavera e o verão em todos os experimentos do CMIP6 avaliados. Para os cálculos, apenas pontos de grade com no mínimo 75% de valores presentes na série foram considerados.

É de extrema importância destacar que todos os dados utilizados na ACP (e nas análises decorrentes da ACP) tiveram sua tendência linear retirada para que sua variabilidade pudesse ser estudada isoladamente, desconsiderando sua tendência no tempo. Sem a utilização desse método, importantes modos mostrariam forte tendência ao longo dos anos, especialmente em cenários futuros, dado o aumento da TSM, o que impede a adequada identificação das fases positiva e negativa do modo ENOS em relação a uma climatologia lentamente variável e, consequentemente, dos episódios El Niño (EN) e La Niña (LN). A FIGURA 8a abaixo, por exemplo, mostra o que supostamente seria o modo ENOS na primavera no cenário mais pessimista (SSP5-8.5), resultante da ACP realizada com dados que contêm tendência do modelo MRI-ESM2-0. Já na FIGURA 8b, vê-se o modo ENOS nos dados do mesmo modelo, no mesmo cenário, porém após a retirada da tendência. Uma vez que anos em que ocorrem EN são identificados por um limiar positivo na série de *Factor Scores* e anos LN, por um limiar negativo, seria esperado que no modo obtido na FIGURA 8a, de um certo ano para trás só houvessem episódios La Niña, e de um certo ano em diante, só houvessem episódios El Niño, dada a tendência positiva da série. Além disso, ao

retirar a tendência dos dados iniciais, frequentemente o modo ENOS torna-se o mais relevante, explicando a maior variância dos modos calculados. A FIGURA 8a, por exemplo, mostra que o modo ENOS calculado com tendência é o segundo modo (REOF2), enquanto nos cálculos sem tendência (FIGURA 8b), é o primeiro modo (REOF1). Tendo em vista que a ACP se destina a detectar variabilidade, é aconselhável remover as tendências devidas à mudança climática antrópica.

FIGURA 8 – *FACTOR LOADINGS* (ESQUERDA) E RESPECTIVOS *FACTOR SCORES* (DIREITA) DO MODO ENOS CALCULADOS COM RESULTADOS DO MODELO MRI-ESM2-0 NO CENÁRIO SSP5-8.5 COM A) TENDÊNCIA NOS DADOS INICIAIS E B) SEM TENDÊNCIA NOS DADOS INICIAIS.



FONTE: A autora (2022).

Além dos resultados dos modelos para precipitação e TSM no período histórico e nos dois cenários futuros, dados observados (precipitação e TSM) também tiveram suas tendências lineares retiradas para padronização dos resultados.

3.2.4 Correlação entre séries de *Factor Scores* dos modos dipolo

Ao identificar nos resultados da ACP dos modelos e dos dados observados (GPCC e dados de estações) os modos de variabilidade de precipitação que apresentam anomalias de sinais opostos em CESA e em SESA (modos tipo dipolo), os respectivos FS desses modos (componentes principais) foram utilizados para a

análise da correlação entre a primavera e o verão. Isso foi feito com o intuito de verificar a simulação da tendência de inversão dos sinais das anomalias de precipitação que ocorre da primavera para o verão na AS (GRIMM; ZILLI, 2009).

Dessa forma, através da Equação (1), foram calculados os coeficientes de correlação entre o componente principal do modo dipolo na primavera e o componente principal do modo dipolo no verão, para cada modelo que foi capaz de simular o modo tipo dipolo nas duas estações e para os dados do GPCC e de estações pluviométricas. Um coeficiente de correlação negativo, indica a inversão das anomalias de uma estação para a outra. Por outro lado, um resultado positivo indica a persistência das anomalias entre as estações. Diferentemente do que é apresentado na Equação (1), a correlação nesse caso é feita ao longo do tempo, e não do espaço (pontos de grade).

Para verificar a reprodução da inversão de anomalias de precipitação da primavera para o verão nos dados observados, foram realizados testes envolvendo outros períodos, como 1960-2000 e 1960-2014, buscando-se alcançar resultados compatíveis com a literatura (GRIMM; ZILLI, 2009). Além disso, para esses períodos, a ACP de dados observados (GPCC e dados de estações) também foi feita para novembro e janeiro, ou seja, no início e pico da estação de monção.

Os coeficientes de correlação resultantes desse processo tiveram sua significância testada de acordo com o teste de significância baseado na distribuição T de Student. O teste T de Student é um teste de hipótese utilizado para rejeitar ou não uma hipótese nula pré-estabelecida. Neste caso, a hipótese nula (H_0) é de que não há correlação entre as variáveis analisadas. Dessa forma, a estatística t é dada de acordo com a Equação (6) abaixo.

$$t = \left| \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} \right| \tag{6}$$

Na Equação (6), r refere-se à correlação calculada entre as variáveis, N ao número de termos em cada série temporal e N-2, ao número de graus de liberdade.

Dessa forma, calculando-se o valor da distribuição T de Student é possível saber o valor da significância estatística do resultado alcançado.

3.2.5 Análise da simulação de ENOS

Os resultados das rodadas históricas dos modelos acoplados mostram episódios El Niño e La Niña em datas diferentes dos episódios observados no mesmo

período, pois estes modelos criam sua própria evolução temporal e só se podem comparar características estatísticas do clima presente observado e simulado. Contudo, é possível identificar nos produtos da ACP das rodadas históricas os modos em que a variabilidade interanual associada ao ENOS está presente. Conforme apresentado na FIGURA 8, as fases quente e fria do modo ENOS são caracterizadas por anomalia mais forte de TSM no centro-leste do Pacífico e anomalias de sinal contrário nos subtrópicos e no Pacífico oeste. Na fase quente (El Niño), essa anomalia é positiva, indicando aumento da TSM nessa região, e na fase fria (La Niña), a anomalia é negativa, indicando diminuição da TSM na mesma região. De agora em diante “modo ENOS” se referirá especificamente ao modo calculado pela ACP que apresenta as fases positiva e negativa do fenômeno.

Para determinar os modelos que melhor representam o ENOS no clima presente, foi selecionado o modo ENOS de cada modelo na primavera e no verão austral, resultantes da ACP calculada com dados de TSM sem tendência linear. Assim, foram estabelecidos quatro índices que avaliam quão próximo os resultados dos modelos encontram-se dos observados. Posteriormente, esses índices foram utilizados para a classificação geral dos modelos por dois critérios apresentados ao final desta seção.

Os índices avaliados foram:

I. Correlação espacial entre *Factor Loadings* do modo ENOS

Os *Factor Loadings* do modo ENOS obtido de cada modelo e dos dados observados do HadISST1 foram correlacionados espacialmente através do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (Equação (1)). Isso foi feito para a primavera e o verão austral, para comparar os padrões espaciais de ENOS simulados pelos modelos e os apresentados pela observação em cada estação.

A fim de uniformizar a classificação dos modelos, do mais bem avaliado para o menos bem avaliado, por ordem crescente dos índices, os coeficientes de correlação (r) foram subtraídos de 1. Assim, o modelo com o menor valor do coeficiente de correlação espacial apresentará o maior valor do índice ($1 - r$).

Obtendo-se a média desses resultados sobre todos os modelos em cada estação, cada valor de ($1 - r$) calculado para cada modelo foi dividido pela média da respectiva estação. Esse procedimento é feito para padronizar a ordem de grandeza dos resultados.

II. Raiz do erro quadrático médio (RMSE) entre *Factor Loadings* do modo ENOS

Para os mesmos *Factor Loadings* do modo ENOS utilizados na análise da correlação espacial, foram obtidas as raízes do erro quadrático médio (RMSE, em inglês) entre os resultados dos modelos e dos dados observados do HadISST1. Os cálculos foram realizados através da Equação (2), para a primavera e para o verão austral. Cada valor obtido foi então dividido pela média dos valores sobre todos os modelos para a respectiva estação.

Por um lado, a correlação entre padrões espaciais avalia a coerência da distribuição espacial entre dois conjuntos de dados, ou seja, a correlação é boa quando os conjuntos de valores variam espacialmente da mesma forma. Por outro lado, o RMSE verifica a proximidade das magnitudes dos valores dos dois conjuntos. Assim, quanto menor o RMSE, mais próximos estão os valores dos dois conjuntos.

III. Diferenças entre variâncias das séries de *Factor Scores* do modo ENOS

Foram calculadas as variâncias das séries de *Factor Scores* do modo ENOS de cada modelo e dos dados observados, para a primavera e para o verão austral. Logo após, foram obtidos os valores absolutos das diferenças entre as variâncias apresentadas por cada modelo e pelos dados observados (|variância modelo – variância observado|). Cada valor, por fim, foi dividido pela média dos resultados da respectiva estação.

IV. Análise Espectral

Sabe-se, da análise de Fourier, que qualquer função periódica pode ser descrita como a soma de senos e cossenos com diferentes fases, amplitudes e frequências (Equação (7)).

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} [a_k \cos(2\pi k f_0 t) + b_k \operatorname{sen}(2\pi k f_0 t)] \quad (7)$$

Em (7), a_k e b_k são constantes, f_0 é a frequência fundamental do sinal e k é o número do harmônico.

Contudo, funções não periódicas podem ser submetidas à transformada de Fourier para que possam ser representadas em um domínio onde apresentem

periodicidade. Assim, ao invés da função ser descrita no domínio do tempo, ela pode ser descrita no domínio da frequência.

Quando se pretende analisar sinais de tempo discreto, é usada a Transformada Discreta de Fourier (TDF). Portanto, o resultado de uma TDF é uma função periódica representada no intervalo de frequências que variam desde a frequência fundamental associada ao primeiro harmônico até a frequência fundamental associada ao último harmônico (frequência de Nyquist). A contribuição de cada frequência ao valor quadrático médio de um sinal (potência média) pode ser representada em um gráfico denominado periodograma. Dessa forma, o periodograma é um estimador da densidade espectral de um sinal, pois mostra o espectro de potências do sinal.

Neste trabalho, o método utilizado para calcular a presença de ciclos e suas respectivas frequências através da estimativa do espectro de potências, foi o método proposto por Blackman e Tukey (1958). Este método faz a estimativa da densidade espectral de potência (DEP) de um sinal através da TDF da função de autocorrelação. Por sua vez, esta função nada mais é do que a função de autocovariância normalizada pela variância.

Para a aplicação do método de Blackman-Tukey é necessário que a série temporal seja periódica. Assim, para uma série temporal x_i discreta, com N termos, sem tendência linear, é feita a aplicação de uma janela temporal cosseno que garante que a condição de periodicidade seja satisfeita (Equações (8a) e (8b)).

$$x_i' = x_i \, 0{,}5 \left[1 - cos\frac{(i-1)\pi}{0{,}1N}\right] \quad , (1 \leq i \leq 0{,}1N) \tag{8a}$$

$$x_i' = x_i \, 0{,}5 \left[1 - cos\frac{(n-i)\pi}{0{,}1N}\right] \quad , (0{,}9N \leq i \leq N) \tag{8b}$$

A função de autocovariância da série x_i é dada pela Equação (9) abaixo (MITCHELL JR et al.,1966)

$$C(l) = \frac{1}{N-l}\sum_{i=1}^{N-l}(x_i - \bar{x})(x_{i+l} - \bar{x}) \tag{9}$$

Em (9), $l = 0{,}1, \ldots, m$ são os possíveis lags, com m<N.

Dessa forma, estimativas espectrais brutas dadas pelas Equações (10) são obtidas diretamente da Equação (9).

$$\hat{s}_0 = \frac{1}{2m}(C_0 + C_m) + \frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m-1} C_l \quad (10a)$$

$$\hat{s}_k = \frac{C_0}{m} + \frac{2}{m}\sum_{l=1}^{m-1} C_l \ cos\left(\frac{\pi kl}{m}\right) + \frac{1}{m}\ C_m(-1)^k \quad (10b)$$

$$\hat{s}_m = \frac{1}{2m}\ [C_0 + (-1)^m C_m] + \frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m-1}(-1)^l C_l \quad (10c)$$

A primeira equação (10a) refere-se à estimativa espectral zero e a terceira (10c), refere-se à última estimativa espectral, correspondente ao harmônico associado à frequência de Nyquist. Já a segunda equação (10b), refere-se às estimativas intermediárias. As estimativas espectrais finais são calculadas através da suavização das estimativas espectrais brutas, resultando nas Equações (11) abaixo.

$$s_0 = \frac{1}{2}(\hat{s}_0 + \hat{s}_1) \quad (11a)$$

$$s_k = \frac{1}{4}(\hat{s}_{k-1} + 2\hat{s}_k + \hat{s}_{k+1}) \quad (11b)$$

$$s_m = \frac{1}{2}(\hat{s}_{m-1} + \hat{s}_m) \quad (11c)$$

Em (11b), $k = 1, 2, \ldots, m-1$.

Para a programação computacional do método, um lag-máximo *m* foi escolhido de forma a definir a quantidade de harmônicos a serem analisados, respeitando a condição de ser menor do que a metade da série ($m < N/2$).

Segundo testes realizados por Silva (2018), a escolha do lag-máximo deve ser feita visando um equilíbrio entre a resolução da curva de DEP e a fidelidade dos resultados. A escolha de um lag grande torna a curva de DEP mais suave, porém os valores tornam-se menos significativos. De acordo com Saboia (2010), fazer o alongamento da série temporal utilizando sequências de zeros nas extremidades torna possível a escolha de um *m* maior, enquanto a curva de DEP é suavizada. Dessa forma, para o presente trabalho as séries de *Factor Scores* do modo ENOS na primavera e no verão (dos modelos e dos dados observados de TSM), tiveram seu tamanho original alongado em 10 vezes. Através de testes utilizando m=N/2 e m=N/5, o lag máximo escolhido para as análises foi de m=N/5, uma vez que apresentou resultados mais significativos estatisticamente.

Para testar a significância da curva de DEP a nível de 5% e de 1%, foi utilizado o teste chi-quadrado, estabelecendo a hipótese nula (H_0) de ruído vermelho, que determina frequências menores com maiores energias.

Assim, por meio das curvas de DEP resultantes das séries de *Factor Scores* do modo ENOS dos modelos e dos dados observados, foram verificados os ciclos mais presentes nas simulações e se estes ciclos são mostrados nas observações.

Através do cálculo do RMSE entre as curvas de DEP dos *Factor Scores* do modo ENOS dos modelos e dos dados observados, foi possível avaliar o desempenho dos modelos ao simularem os ciclos observados na primavera e no verão. Cada valor foi então dividido pela média da respectiva estação no cálculo do índice.

Para selecionar os melhores modelos, foram estabelecidos dois critérios: um baseado na classificação dos modelos pelo cálculo de um índice geral, composto por todos os índices, e outro nas classificações dos modelos em cada índice calculado.

Para cada índice individual, os resultados dos modelos são propositalmente positivos e os desempenhos, do melhor para o pior modelo, são dados em ordem crescente de valores do índice. Quanto menor o valor, melhor é o desempenho do modelo em relação àquele índice. Todos os índices foram calculados para a primavera e para o verão separadamente. Dessa forma, para classificar o desempenho dos modelos em cada índice, é feita uma média entre as estações dos valores obtidos para cada modelo.

O primeiro critério de classificação é estimado através do índice geral, dado pela média dos resultados obtidos em cada um dos 4 índices para cada modelo (Equação (12)).

$$IG_{ENOS} = \frac{(1 - r_{FL}) + RMSE_{FL} + |Dif.Var._{FS}| + RMSE_{DEP}}{4} \quad (12)$$

Na Equação (12), 'Dif.Var.' refere-se à diferença entre as variâncias das séries de *Factor Scores* e DEP à Densidade Espectral de Potências. Como explicado anteriormente, para padronizar os valores destes índices, cada um deles foi dividido pela sua média sobre todos os modelos para cada estação.

O segundo critério de classificação define que os modelos que mais se repetem entre os melhores na classificação em cada índice são os que possuem melhor desempenho na simulação de ENOS.

De acordo com os dois critérios, os 8 modelos que mais se repetiram entre os melhores nas classificações individuais dos índices foram os 8 modelos com melhor desempenho de acordo com o índice geral. Estes mesmos modelos também mostraram ter o melhor desempenho calculando-se a média dos resultados de cada modelo apenas para o verão austral. No entanto, um desses “modelos” foi, na verdade, a média do conjunto de todos os modelos que foram capazes de simular o modo ENOS (10 modelos) e, portanto, esta não é utilizada no cálculo do conjunto de modelos que melhor simularam o ENOS.

Portanto, as análises envolvendo a média do conjunto de modelos que melhor reproduziram o modo ENOS, foram realizadas com o conjunto dos 7 melhores modelos. Frequentemente, as análises envolvem essa média de modelos, a média do conjunto dos 10 modelos que foram capazes de reproduzir o modo ENOS e também o modelo com melhor desempenho.

3.2.6 Ciclos anuais de precipitação em regiões da monção

Para avaliar como os modelos simulam a evolução da precipitação ao longo do ano, foram calculados os ciclos anuais de precipitação das principais regiões afetadas pelo SMAS. Isso foi feito para a média do conjunto de todos os modelos e para os modelos que obtiveram os melhores e os piores desempenhos no cálculo de climatologias e na simulação do ENOS.

Os ciclos anuais de precipitação foram feitos tanto para o clima presente, quanto para projeções futuras e os cálculos foram realizados para as seguintes regiões:

- Núcleo da monção: (11.25S-23.75S; 43.75W-61.25W)
- Maior variabilidade da monção: (13.75S-23.75S; 38.75W-51.25W)
- Centro-Oeste: (13.75S-21.25S; 48.75W-61.25W)
- Centro: (11.25S-16.25S; 43.75W-51.25W)
- Sul: (23.75S-31.25S; 48.75W-56.25W)
- Norte/Leste: (3.75S-6.25S; 43.75W-51.25W)
- Norte/Oeste: (3.75S-11.25S; 61.25W-66.25W)

Para determinar o ciclo anual de precipitação calcula-se a média mensal da precipitação no período e, posteriormente, obtém-se a média dos resultados em cada região específica.

3.2.7 Correlação entre precipitação e TSM

A fim de verificar a influência que o modo ENOS exerce na precipitação da AS, foi feita a correlação entre a série de *Factor Scores* (FS) de TSM desse modo e a precipitação da AS, para a primavera e o verão austral. Isso foi feito para dados observados (GPCC/HadISST1), para a média do *ensemble* de todos os modelos que simularam o modo ENOS no clima presente, para a média do *ensemble* dos modelos que melhor simularam o modo ENOS no clima presente e para o melhor modelo na simulação de ENOS. Essas análises foram realizadas para o clima presente (1979-2014) e para o clima no cenário futuro mais pessimista (SSP5-8.5). Uma vez que a correlação fornece uma resposta da relação linear entre a precipitação e a TSM em cada estação, os resultados no cenário SSP2-4.5 seriam análogos aos apresentados pelo cenário SSP5-8.5, porém menos intensos.

Os coeficientes de correlação foram calculados por meio da Equação (1), onde x_i corresponde aos termos da série de FS do modo ENOS de TSM e y_i, aos termos das séries temporais de precipitação em cada ponto de grade. Como o cálculo é feito para a primavera e para o verão, as séries de precipitação são as médias anuais da precipitação sazonal da primavera ou verão. Assim, cada série em ponto de grade de precipitação é correlacionada com a série de FS do modo ENOS de TSM e o resultado é apresentado em um mapa contendo os coeficientes calculados em cada ponto de grade.

A significância dos resultados é determinada pelo teste T de Student, que avalia se a correlação é significativamente diferente de zero através da estatística t apresentada na Equação (6). Nos mapas, são mostrados valores apenas para o nível de confiança superior a 90%.

3.2.8 Composição de Anomalias

Por meio da série de *Factor Scores* do modo ENOS gerada pela ACP da variável TSM, é possível identificar os anos em que ocorreram El Niño e anos em que

ocorreram La Niña, tanto nos dados observados quanto nos modelos. Assim, anos em que ocorreram El Niño são considerados aqueles em que o CP excede em 0,75 vezes o desvio padrão da série (0,75σ). Por outro lado, anos em que ocorreram La Niña são considerados aqueles nos quais o CP é menor do que -0,75 vezes o desvio padrão (-0,75σ). Portanto, anos em que o CP está entre -0,75 σ e 0,75 σ caracterizam anos de fase neutra do ENOS.

Foram determinados os anos EN e LN para a primavera e para o verão separadamente e mantidos como episódios EN e LN apenas os anos em que os eventos ocorreram nas duas estações. Por exemplo, se um determinado modelo apresenta episódios EN em 1982, 1983 e 1987 na primavera e 1982 e 1983, no verão, então, como resultado, o modelo tem episódios EN em 1982 e 1983, pois foram os anos em que ocorreram nas duas estações.

Para fazer uma composição de anomalias, inicialmente calculam-se, em cada ponto de grade, anomalias, ou seja, diferenças entre o valor que uma variável assume em um determinado mês (ou estação) (por exemplo, em novembro de certo ano) e a média climatológica da variável em todos os mesmos meses (ou estações) ao longo do período analisado (todos os novembros deste período). Então podem-se calcular médias de anomalias para situações especiais, como novembros de EN, por exemplo, o que seria uma composição de anomalias para esta situação.

Para avaliar como os modelos simulam anomalias de precipitação em anos de EN e LN, foram escolhidos quatro períodos no ano para avaliação: primavera (pri), verão (ver), janeiro (jan) e novembro (nov). Dessa forma, para cada um desses períodos, foi calculada a anomalia de precipitação nos anos EN ou LN identificados, com relação à climatologia do período em todos os anos. Em seguida, foi feita a média destas anomalias (composição de anomalias). O resultado da composição de anomalias em cada ponto de grade é plotado em um mapa de isolinhas. Essas análises foram feitas para dados observados, para resultados de rodadas históricas (clima presente) e para resultados nos dois cenários futuros (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). Assim como na correlação, os cálculos foram obtidos para dados observados (GPCC), para a média do *ensemble* de todos os modelos que simularam o modo ENOS no clima presente, para a média do *ensemble* dos modelos que melhor simularam o modo ENOS no clima presente e para o melhor modelo na simulação de ENOS.

A fim de avaliar a consistência dos resultados, a significância de cada valor foi submetida ao teste T de Student, e mostrada no mapa apenas se excedesse 90%

de confiança. Esse cálculo compara as séries contendo apenas os períodos (pri, ver, nov, jan) em anos EN ou LN (série x) com as séries contendo os períodos em todos os anos (série y). A estatística t utilizada para o teste é apresentada na Equação (13) abaixo, onde N_x e N_y são os números de termos em cada série. Vale ressaltar que os cálculos são feitos apenas se houver um número mínimo de 5 eventos EN e 5 eventos LN.

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{N_x} + \frac{\sigma_y^2}{N_y}}} \tag{13}$$

4 DESEMPENHO DOS MODELOS NA SIMULAÇÃO DO CLIMA PRESENTE

Para verificar como os modelos do CMIP6 reproduzem o clima presente da AS, foram obtidas climatologias mensais e sazonais de precipitação e circulação atmosférica em altos (200 hPa) e baixos níveis (850 hPa), através de médias para o período presente (1979-2014). Isso foi feito para os modelos, para a média do conjunto de modelos (*ensemble* multi-modelo), para dados de reanálise e dados observados do GPCC e de estações pluviométricas.

O desempenho dos modelos ao tentarem reproduzir o clima presente foi avaliado com base em cálculos da correlação espacial, da raiz do erro quadrático médio e do viés, entre resultados das rodadas históricas dos modelos e dados observados do GPCC (ou dados de reanálise).

Além da avaliação de climatologias, este capítulo apresenta avaliação da simulação dos modos de variabilidade no clima presente, especificamente o modo ENOS.

4.1 PRECIPITAÇÃO

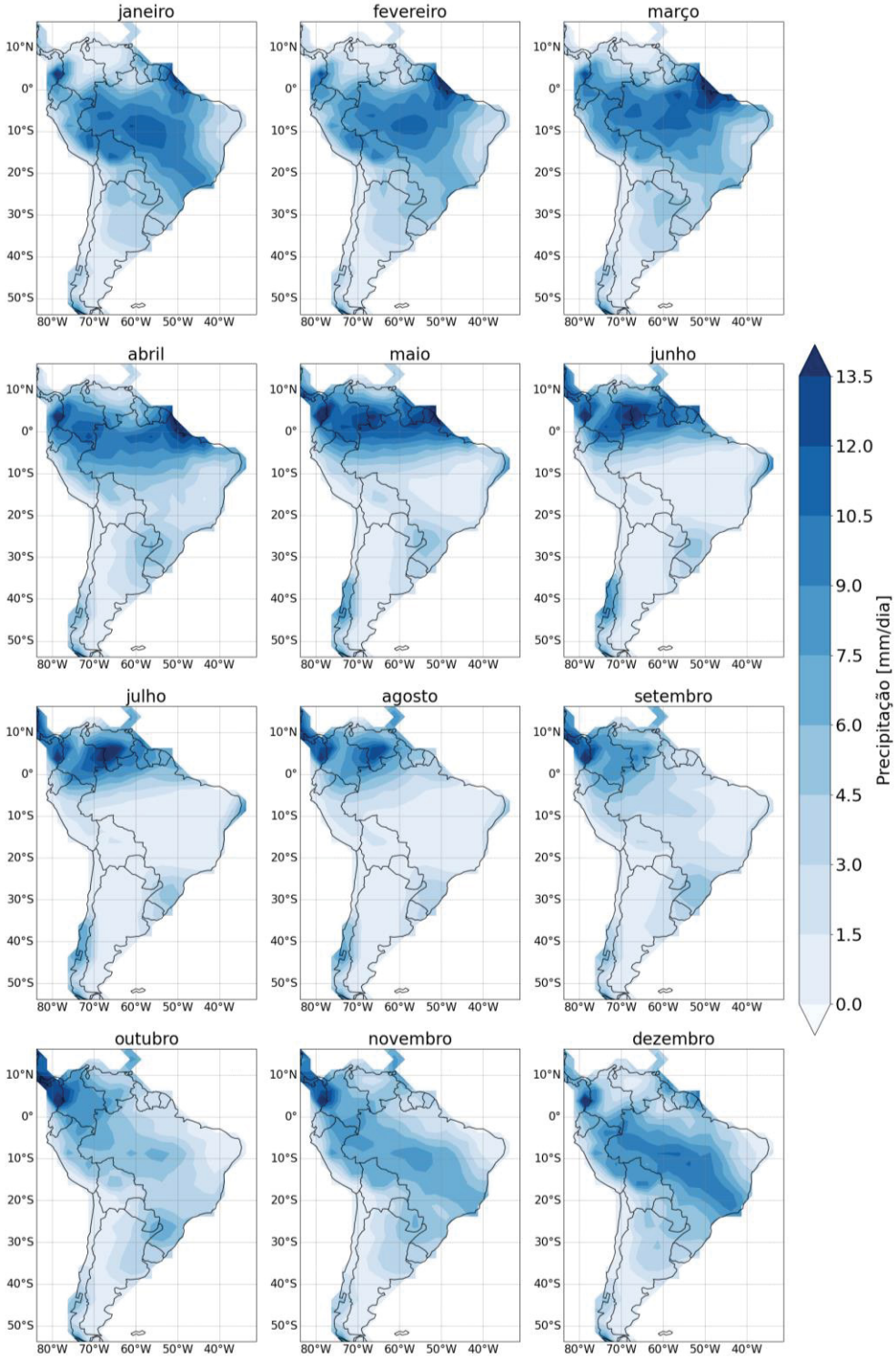
A fim de obter informações sobre a climatologia da precipitação observada na AS, foram utilizados dados mensais do GPCC para o período de 1979 a 2014. A FIGURA 9 mostra as médias para a precipitação durante esse período, em cada mês.

Da mesma forma, a FIGURA 10 mostra a climatologia para as diferentes estações do ano. Para as climatologias sazonais, DJF indica os meses dezembro, janeiro e fevereiro; MAM indica os meses março, abril e maio; JJA, os meses junho, julho e agosto e SON, os meses setembro, outubro e novembro.

Padrões semelhantes são mostrados nas climatologias de precipitação obtidas para dados de estações pluviométricas (FIGURA 11 e FIGURA 12). No Brasil, na climatologia mensal aparecem pequenas diferenças em relação aos dados do GPCC, principalmente na estação da monção, com áreas de maior precipitação um pouco mais extensas para dados de estações (FIGURA 9 e FIGURA 11). As climatologias sazonais são muito semelhantes (FIGURA 10 e FIGURA 12). Quanto maior é a suavização temporal e espacial, maior é a semelhança entre os resultados. Portanto, para fins comparativos entre resultados de modelos e dados observados

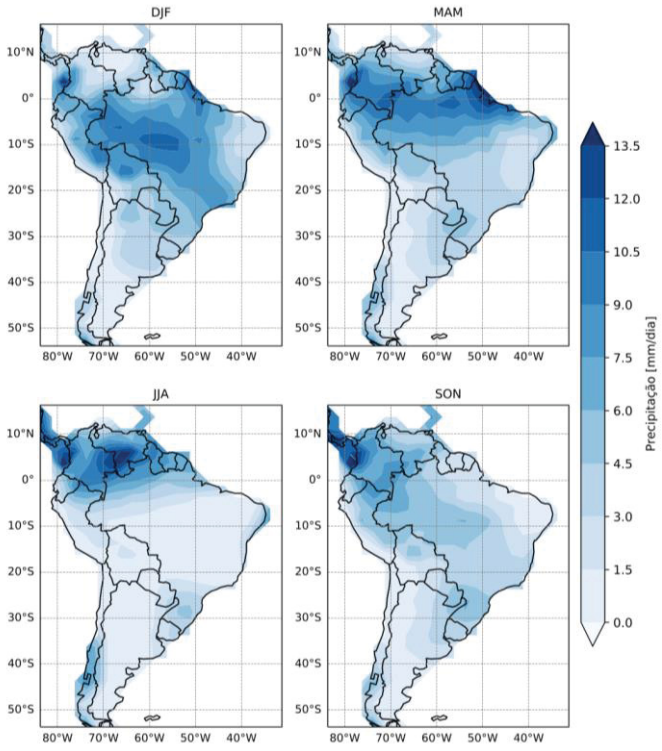
serão utilizadas as climatologias obtidas com dados do GPCC, pois não há dados faltantes.

FIGURA 9 – CLIMATOLOGIA MENSAL DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO DADOS DO GPCC (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 10 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO DADOS DO GPCC (1979-2014).

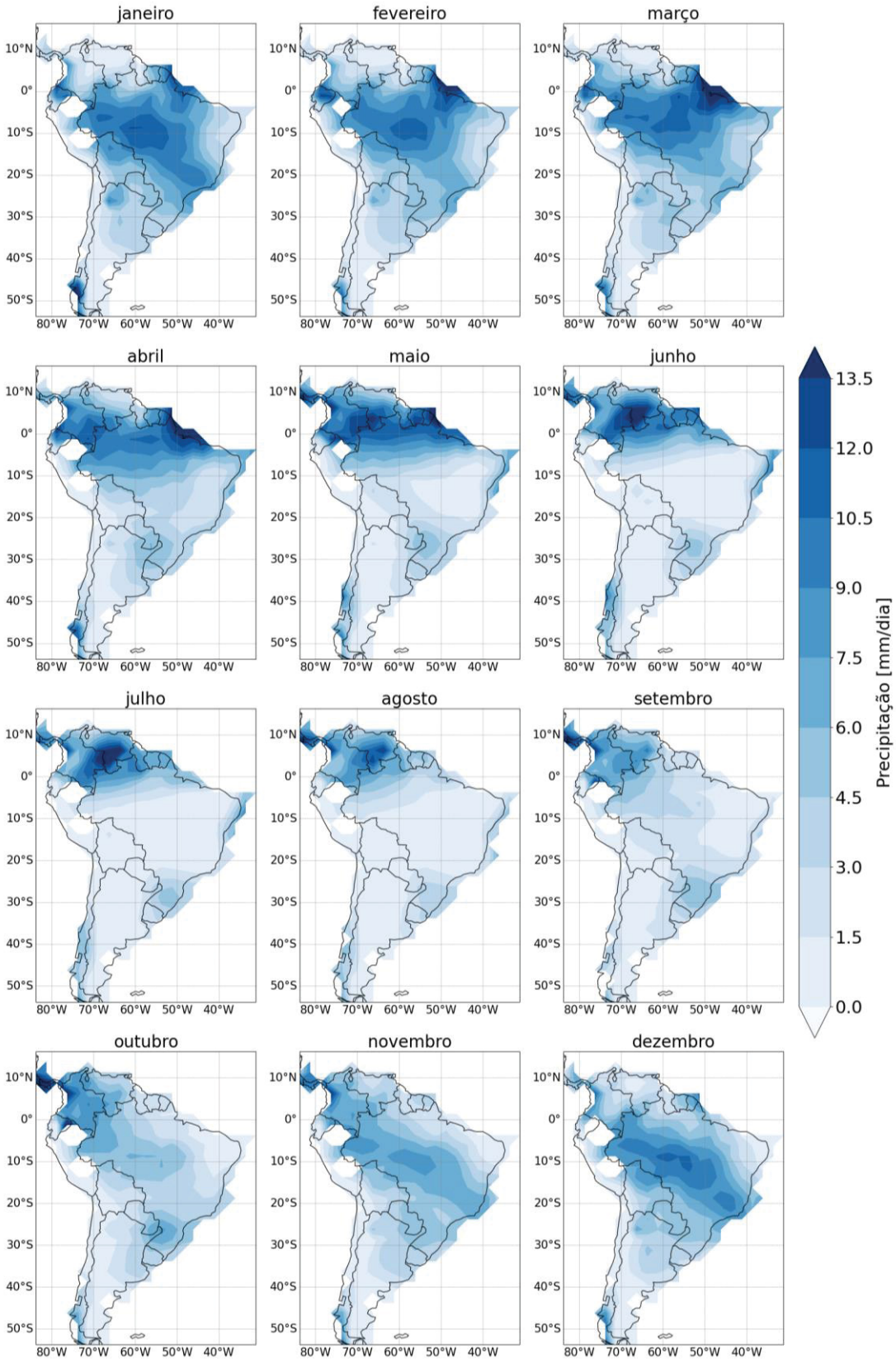


FONTE: A autora (2022).

Todos os mapas de climatologias de precipitação observada mostram, de forma geral, que a precipitação aumenta no centro do Brasil em outubro, no início da estação de monção, atingindo um pico nos meses do verão austral, entre dezembro e fevereiro, e diminuindo no final de março. Nesse período, há aumento da precipitação numa faixa que se estende do Sudeste do Brasil ao noroeste da AS (ZCAS), com maior concentração na região Amazônica. Com o fim do verão no HS, a precipitação mais intensa se desloca para o norte da AS, próximo do equador. Embora regiões como o Sul do Brasil e do Chile ainda apresentem certa quantidade de precipitação, grande parte da AS passa por um período seco durante o inverno austral, entre junho e agosto. Na primavera austral, a precipitação volta a aumentar no centro da AS.

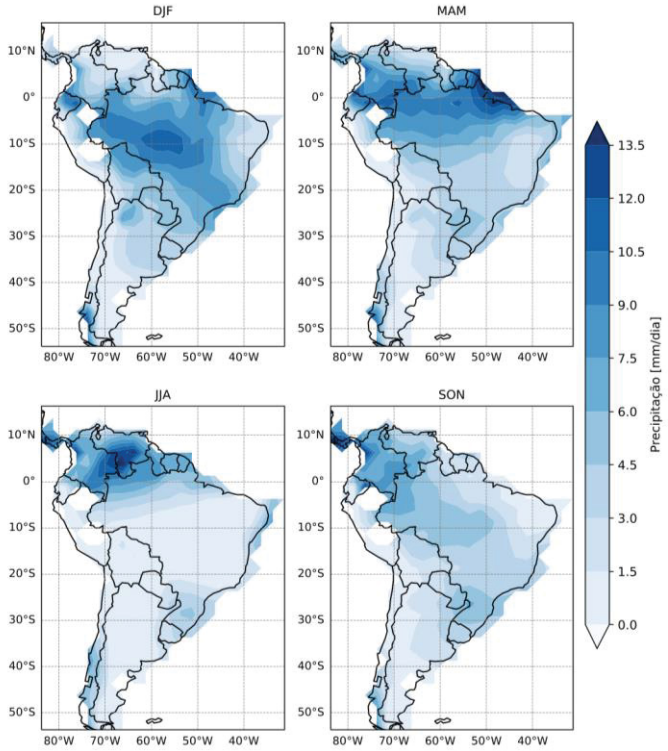
Através do cálculo da média das rodadas de cada modelo do CMIP6 selecionado para avaliação (TABELA 1), climatologias de precipitação foram determinadas para os diferentes modelos e a média do conjunto de modelos, no período de 1979 a 2014, a nível mensal e sazonal, da mesma forma como foi feito para os dados observados. Isso foi feito para possibilitar a comparação da precipitação simulada pelos modelos com resultados observados e verificar se os modelos reproduzem aspectos do SMAS.

FIGURA 11 – CLIMATOLOGIA MENSAL DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO DADOS DE ESTAÇÕES (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 12 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO DADOS DE ESTAÇÕES (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).

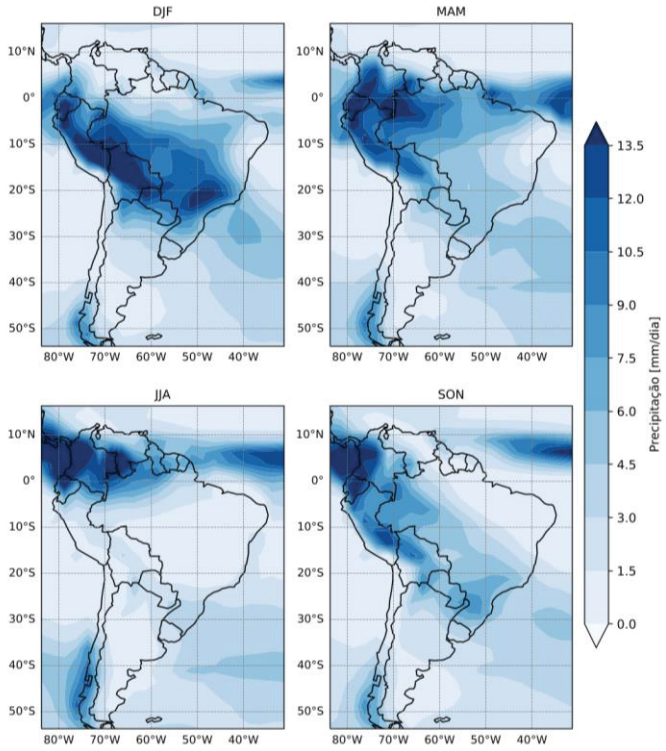
A análise das climatologias mensais e sazonais dos 11 modelos e da média do conjunto de modelos mostra que, de maneira geral, todos os modelos são capazes de reproduzir o aumento da precipitação na AS a partir de novembro, atingindo valores máximos no verão austral e decaindo até o inverno austral, quando a precipitação total na AS atinge um valor mínimo, especialmente na parte tropical situada no HS. Ainda no inverno austral, todos os modelos reproduzem o deslocamento da precipitação mais intensa para próximo do equador e ao norte dele. Contudo, em comparação com a climatologia observada (FIGURAS 9 e 10), os modelos mostram deslocamento da região de precipitação máxima nos meses do verão austral e frequentemente superestimam sua intensidade. Além disto, quase todos superestimam a precipitação de verão nos Andes, entre 10°S e 20°S e subestimam a precipitação de inverno no Sul do Brasil.

A seguir, serão brevemente comentadas características particulares da climatologia da precipitação sazonal de cada modelo.

O modelo ACCESS-ESM1-5 (FIGURA 13) mostra a precipitação máxima de verão sobre o oeste da AS e o Sudeste do Brasil, enquanto o maior núcleo da máxima

precipitação de verão observada está no centro da AS, e superestima a intensidade da máxima precipitação em todas as estações do ano (FIGURA 10). A superestimação da máxima precipitação em todas as estações também ocorre no modelo MRI-ESM2-0 (FIGURA 14), especialmente durante o verão. A localização destes máximos é bem representada, embora no verão se estenda muito para o Nordeste.

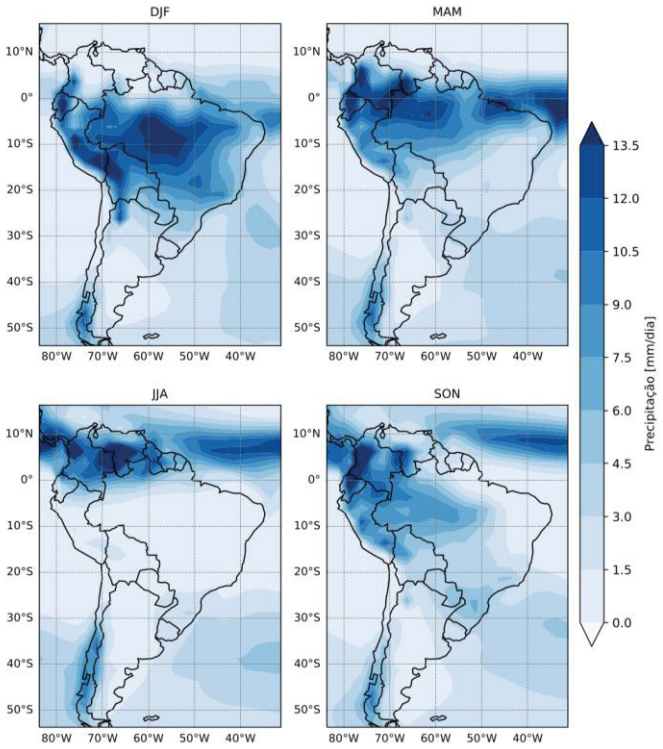
FIGURA 13 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO ACCESS-ESM1-5 NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).

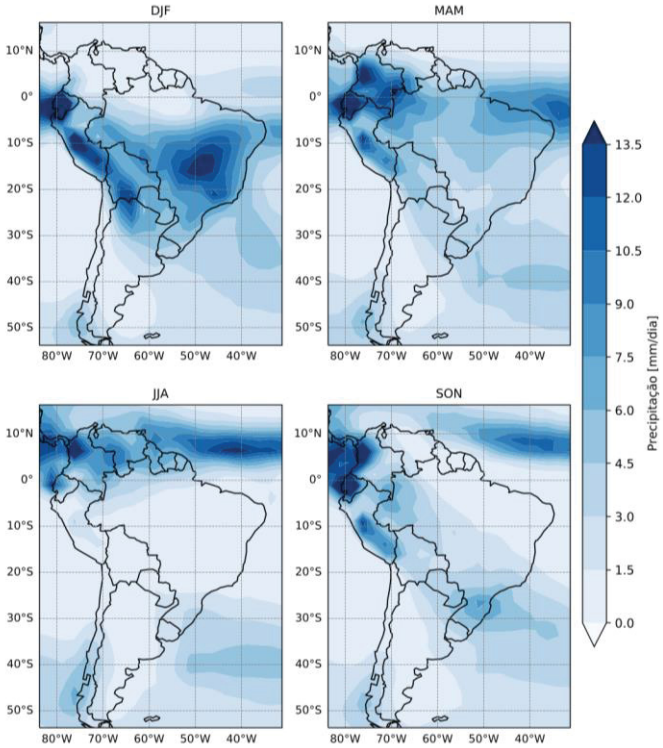
O modelo CanESM5 (FIGURA 15) desloca o máximo da precipitação de verão para o centro-leste do Brasil, além de estender a precipitação de verão para o Nordeste. Por outro lado, apresenta forte deficiência de chuva na Amazônia, no verão e outono. Outro modelo que desloca a máxima precipitação de verão em direção ao centro-leste do Brasil, principalmente o Sudeste, também estendendo a precipitação de verão para o Nordeste, é o KACE-1-0-G (FIGURA 16). Este modelo é dos que apresentam maior precipitação no inverno e primavera no Sul do Brasil, de forma mais coerente com as observações. O modelo CESM2 (FIGURA 17) mostra a máxima precipitação de verão concentrada na Região Norte do Brasil, com deslocamento do núcleo mais intenso para o nordeste. O modelo superestima a precipitação máxima no verão e simula um inverno bem seco, especialmente na Região Sul.

FIGURA 14 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MRI-ESM2-0 NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).



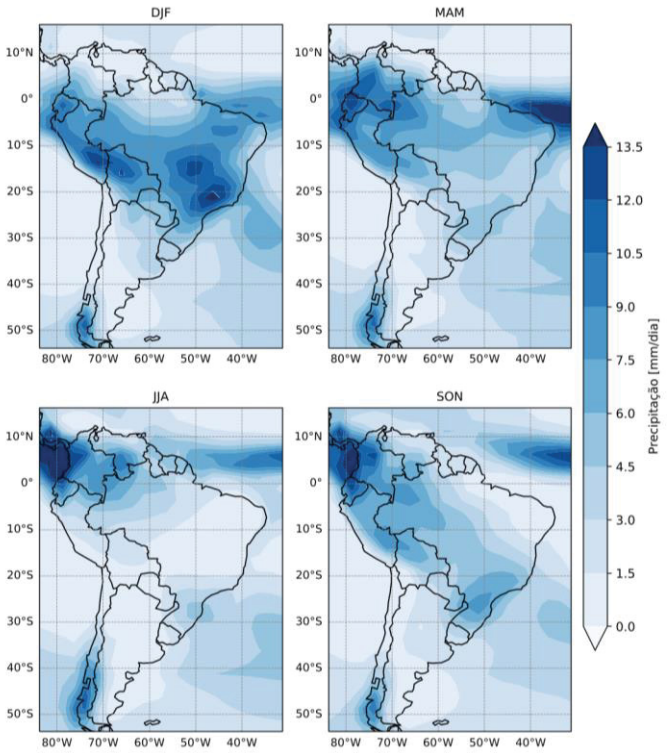
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 15 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CANESM5 NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).



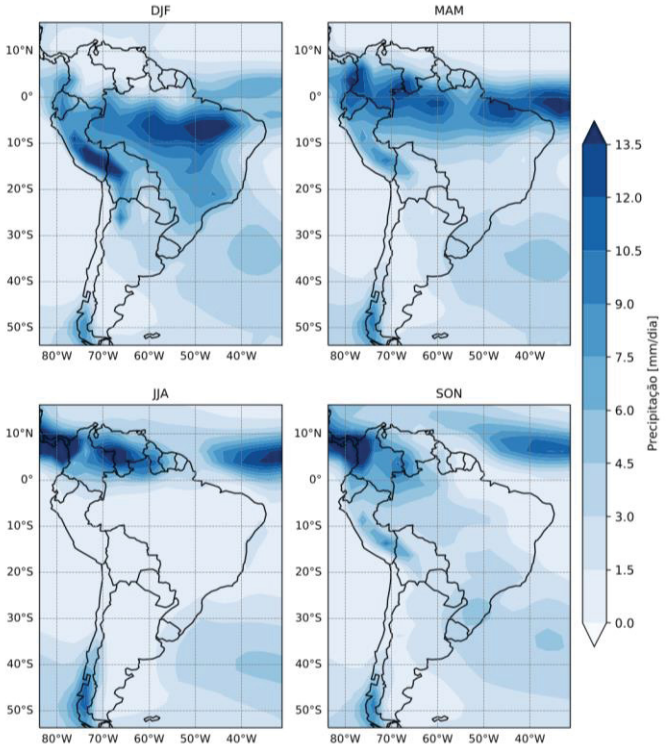
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 16 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO KACE-1-0-G NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).

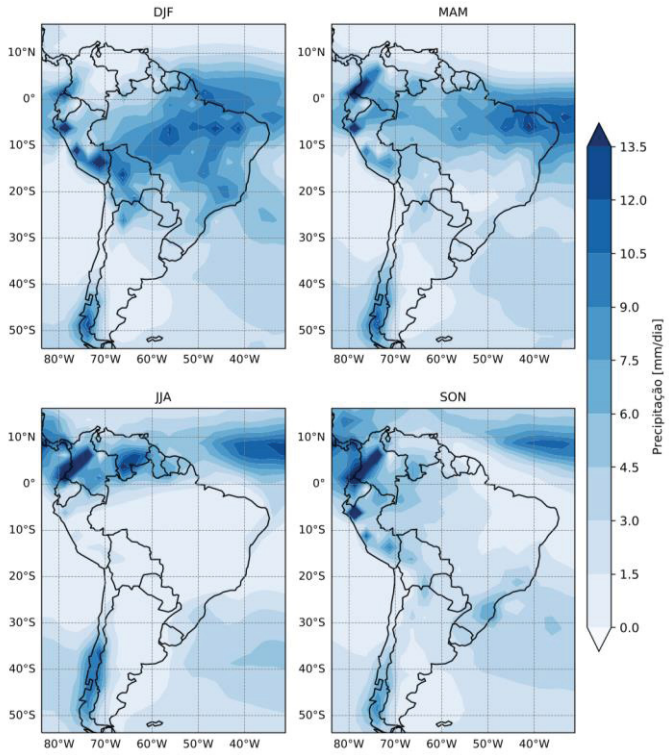
FIGURA 17 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).

Os modelos CNRM-CM6-1 (FIGURA 18) e IPSL-CM6A-LR (FIGURA 19) simulam a precipitação de verão também a nordeste do máximo observado, ocupando boa parte do Nordeste do Brasil, onde a precipitação é superestimada no verão e outono, principalmente no caso do IPSL-CM6A-LR. Os valores do CNRM-CM6-1 não são tão superestimados no verão e ele simula um inverno bastante seco sobre o continente, com a precipitação concentrada no norte da AS.

FIGURA 18 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CNRM-CM6-1 NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).



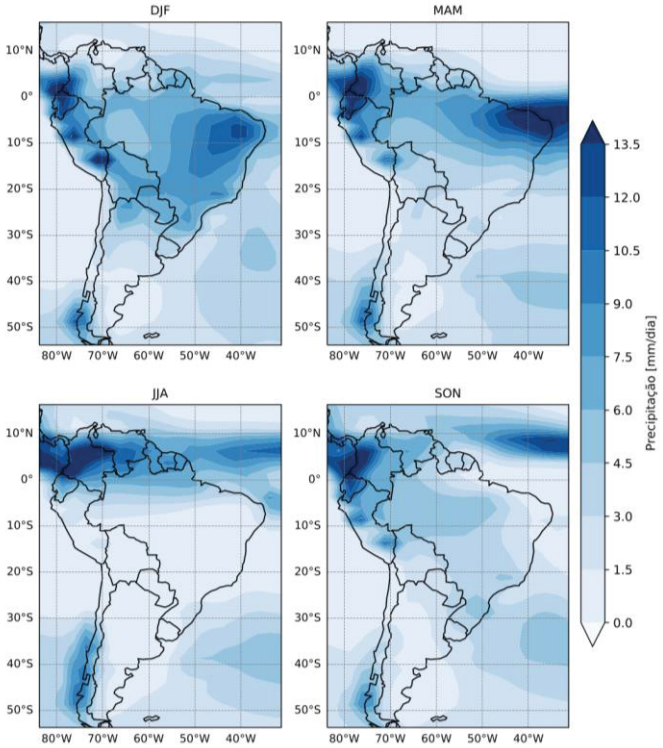
FONTE: A autora (2022).

O modelo HadGEM3-GC31-LL (FIGURA 20), apresenta a máxima precipitação de verão deslocada para sudeste do máximo observado e superestima a intensidade da máxima precipitação em comparação com a climatologia observada. No outono, a precipitação mais intensa sobre o Nordeste do Brasil é deslocada para leste e superestimada. Enquanto a precipitação de inverno é razoavelmente simulada, a de primavera, é excessiva de precipitação no Sul do Brasil e na região Amazônica.

Alguns modelos, como o anterior (HadGEM3-GC31-LL), deslocam o máximo da precipitação de verão para sudeste da posição observada, como os modelos MIROC6 (FIGURA 21), MPI-ESM1-2-HR (FIGURA 22) e EC-Earth3-Veg (FIGURA 23). Isto ocorre de forma mais intensa no primeiro (MIROC6), que também

superestima muito a intensidade da precipitação máxima de verão e simula o inverno austral bastante seco. Os outros dois tem climatologia mais realista nestes aspectos.

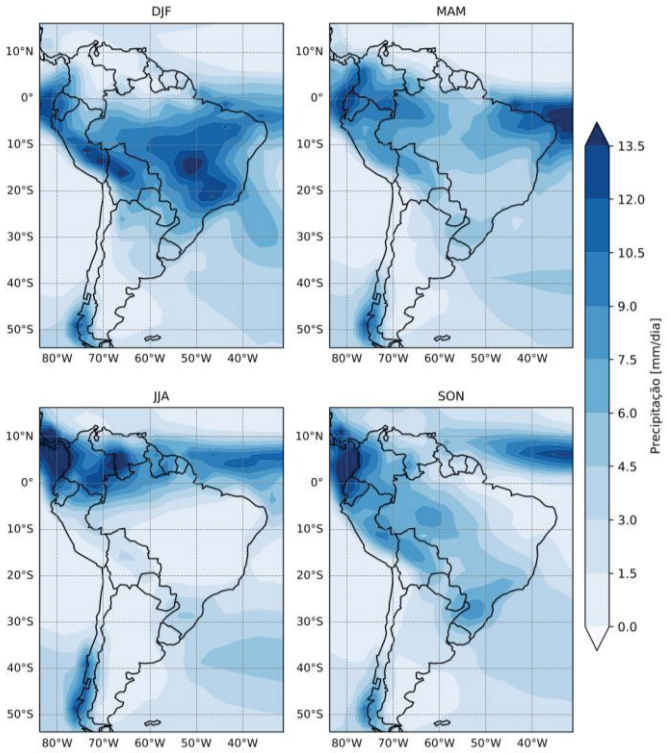
FIGURA 19 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).

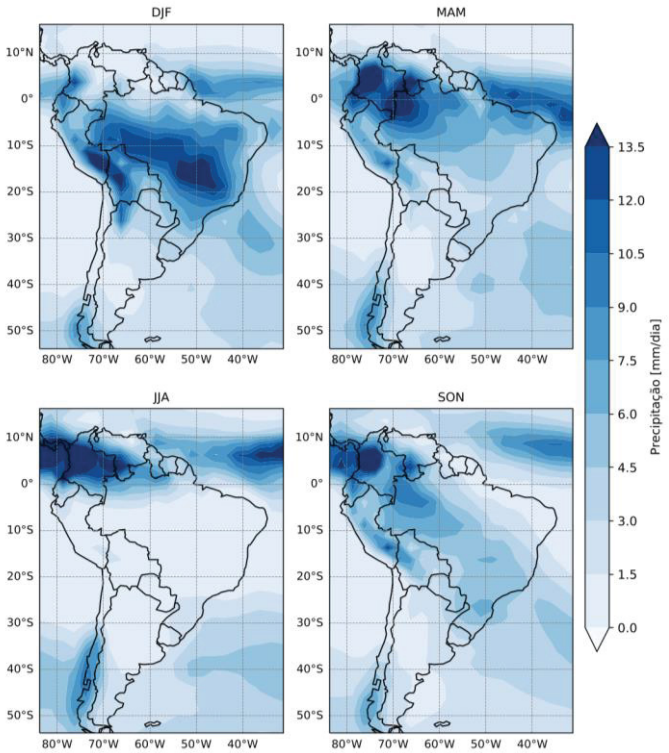
A média de conjunto de todos os modelos apresenta a máxima precipitação de verão um pouco deslocada para sudeste do observado e excessiva no Nordeste (FIGURA 24). A máxima intensidade é comparável com a observada no centro da AS. No outono, a máxima precipitação é deslocada para leste, superestimando a intensidade no Nordeste. No inverno, a intensidade é um pouco menor no HS. Na primavera, há menos chuva que o observado no centro-leste do continente e um pouco mais no Sul do Brasil. Há superestimação de chuva no Andes, entre 10°S e 20°S. Comparando as FIGURAS 10 e 24, pode-se concluir que na média dos modelos escolhidos para análise há boa simulação da climatologia observada.

FIGURA 20 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).



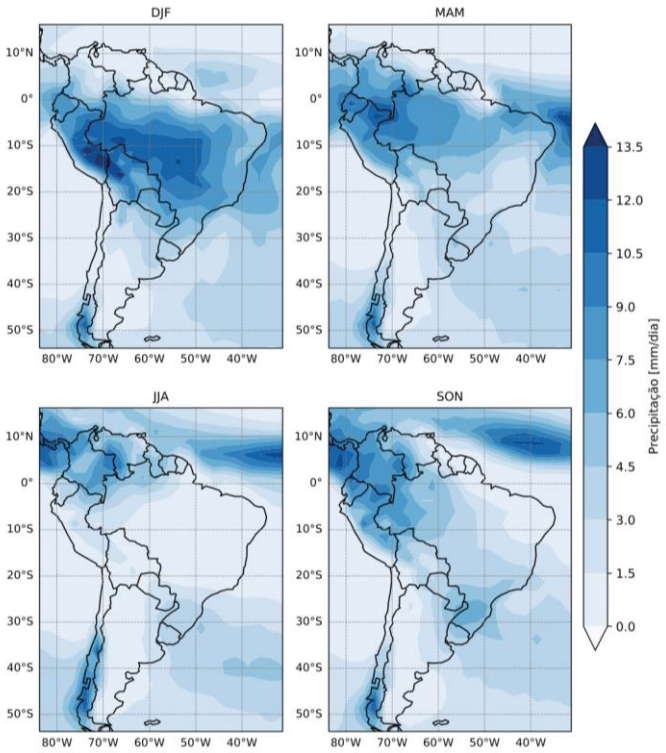
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 21 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MIROC6 NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).



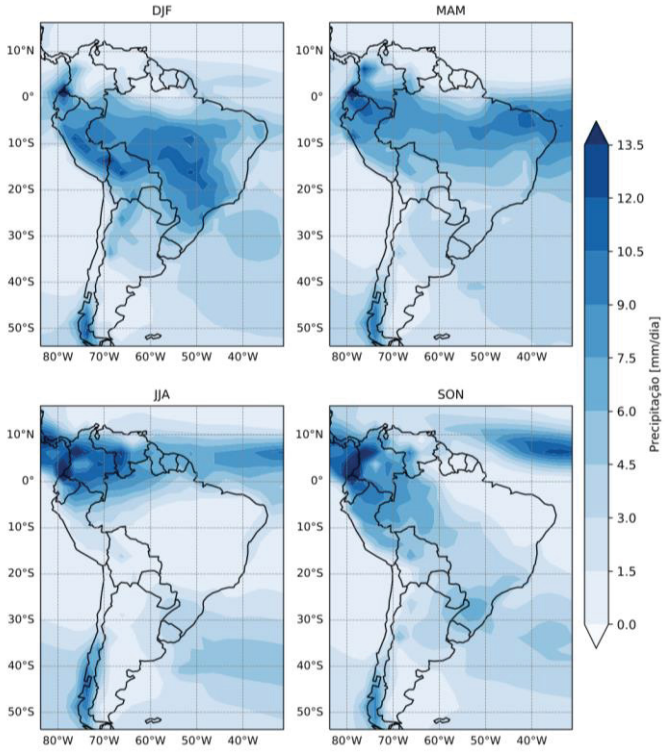
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 22 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MPI-ESM1-2-HR NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).



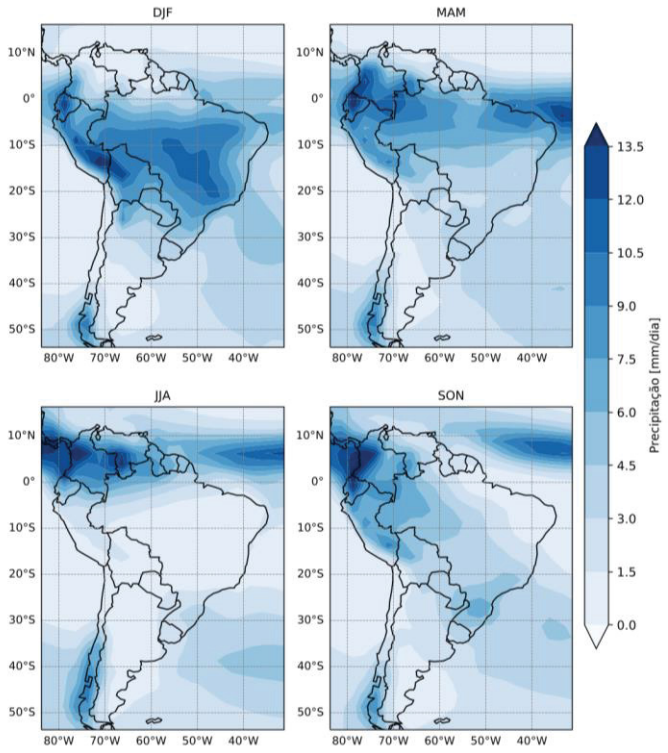
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 23 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 24 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS MODELOS NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).

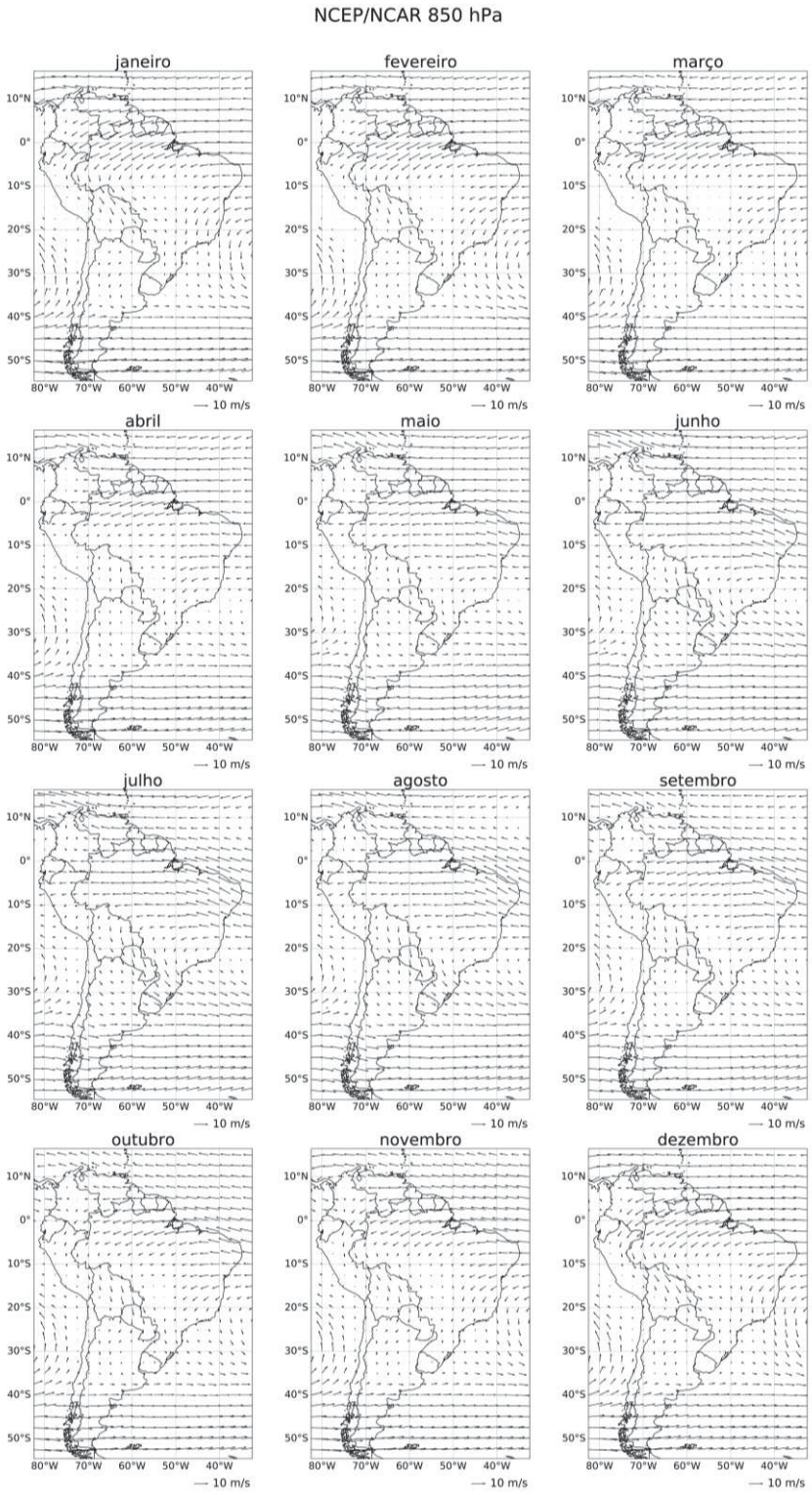
De maneira geral, os modelos (e a média do conjunto) mostram excesso de precipitação no verão austral, especialmente em regiões próximas ao centro, centro-leste e Nordeste do Brasil. No outono, a precipitação mais forte concentra-se na região equatorial, deslocada para leste e superestimada no Nordeste. No inverno, ocorre grande redução da precipitação média observada na AS e os modelos geralmente superestimam estas condições secas. Na primavera, simulam o aumento da precipitação na faixa que se estende do sudeste do Brasil em direção ao noroeste da AS (ZCAS), e mostram precipitação mais intensa no Sul do Brasil e na região Amazônica, mas a subestimam no centro-leste do Brasil.

4.2 CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA

Com o intuito de analisar como os modelos reproduzem a circulação atmosférica da AS em baixos níveis (850 hPa) e em altos níveis (200 hPa), foram calculadas as climatologias mensais e sazonais para o vento no período de 1979 a 2014. As FIGURAS 25 e 26 mostram, respectivamente, as climatologias de circulação

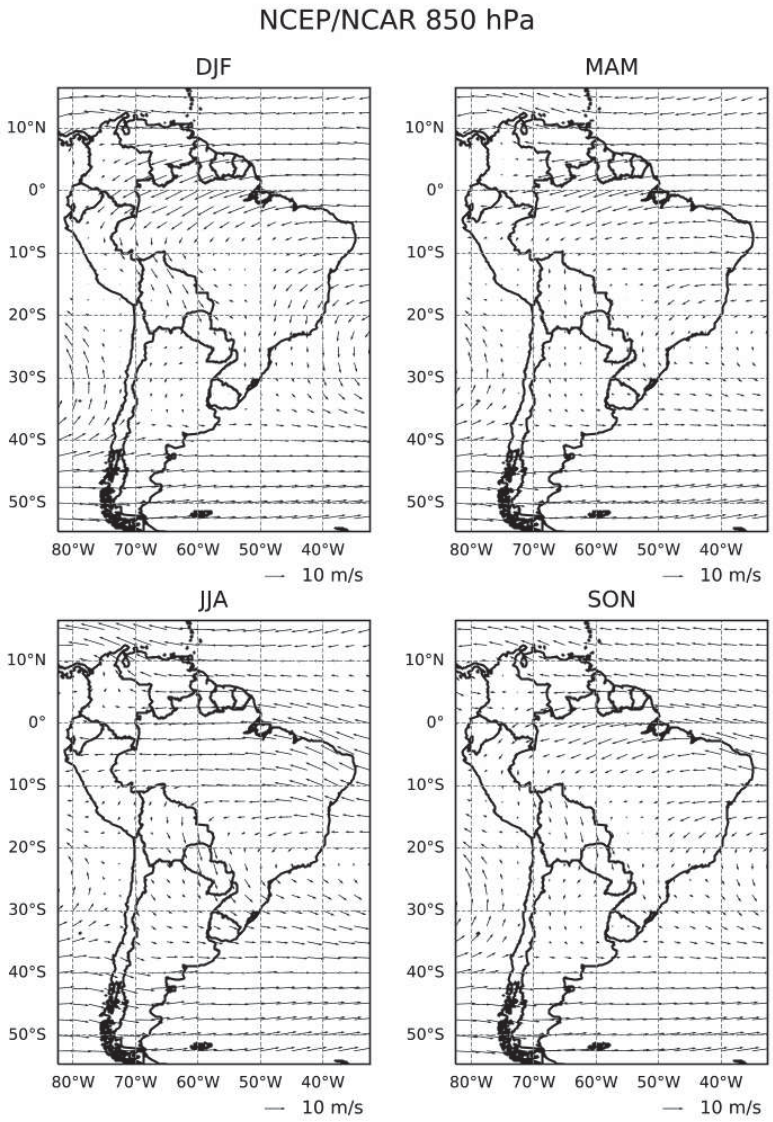
mensal e sazonal em baixos níveis, enquanto as FIGURAS 27 e 28 as mostram em altos níveis, obtidas a partir de dados de reanálise do NCEP/NCAR.

FIGURA 25 – CLIMATOLOGIA MENSAL DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS (850 hPa) PARA DADOS DO NCEP/NCAR.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 26 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS (850 hPa) PARA DADOS DO NCEP/NCAR.

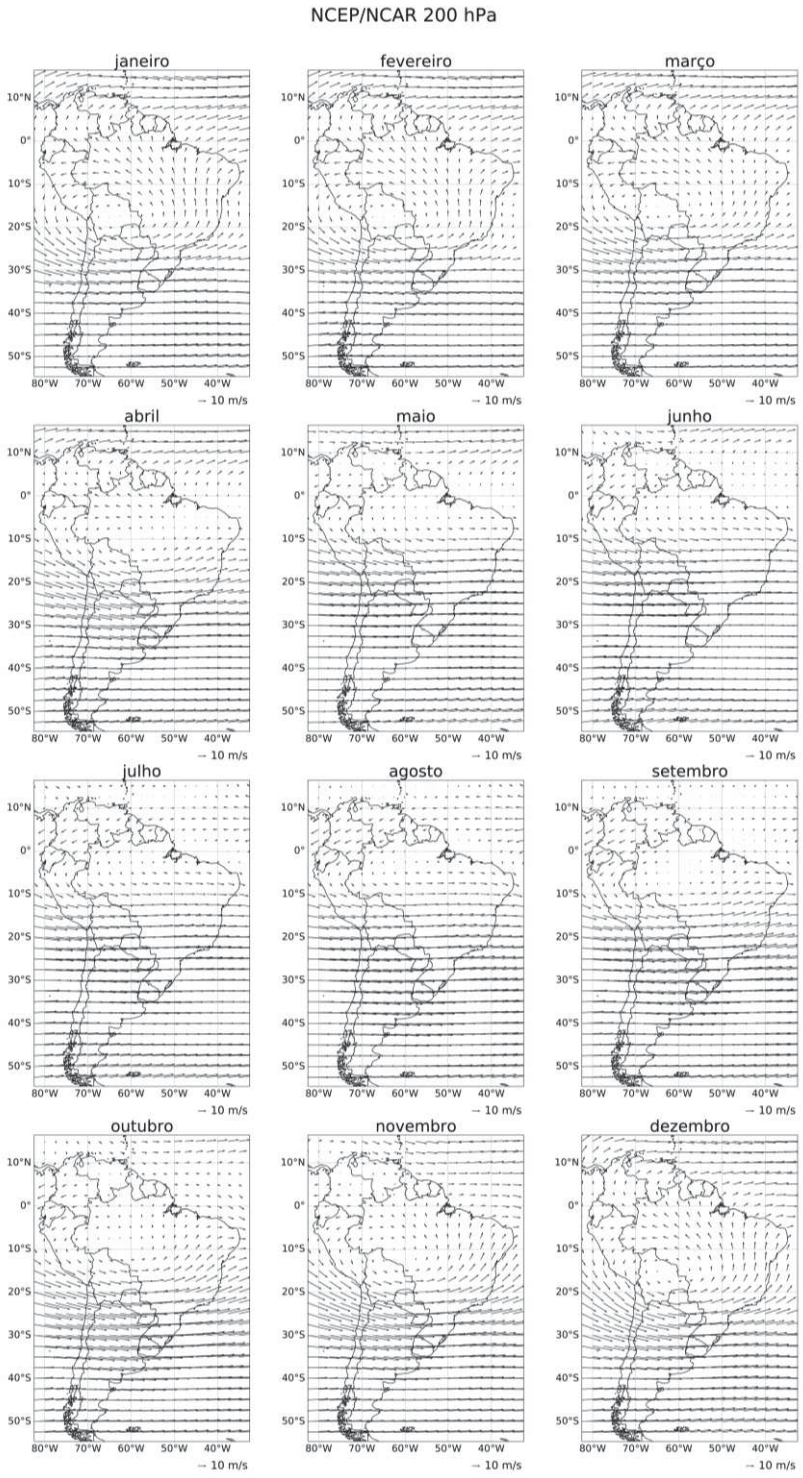


FONTE: A autora (2022).

De acordo com a climatologia mensal em baixos níveis (FIGURA 25), os ventos alísios que incidem no continente próximo ao equador tornam-se de nordeste em outubro, intensificando-se nesta direção durante o verão austral. Ao atingirem a região dos Andes, os ventos de nordeste são desviados e adquirem direção de noroeste, indo para o Sul do Brasil, convergindo na região do Chaco, que é o centro da baixa pressão continental no SMAS, em torno do qual a circulação torna-se ciclônica. Há também uma região de convergência no centro do continente, dos ventos que cruzam o equador e dos que penetram o continente de leste, do Atlântico Sul. No outono austral, o vento nordeste equatorial se enfraquece e torna-se vento leste no

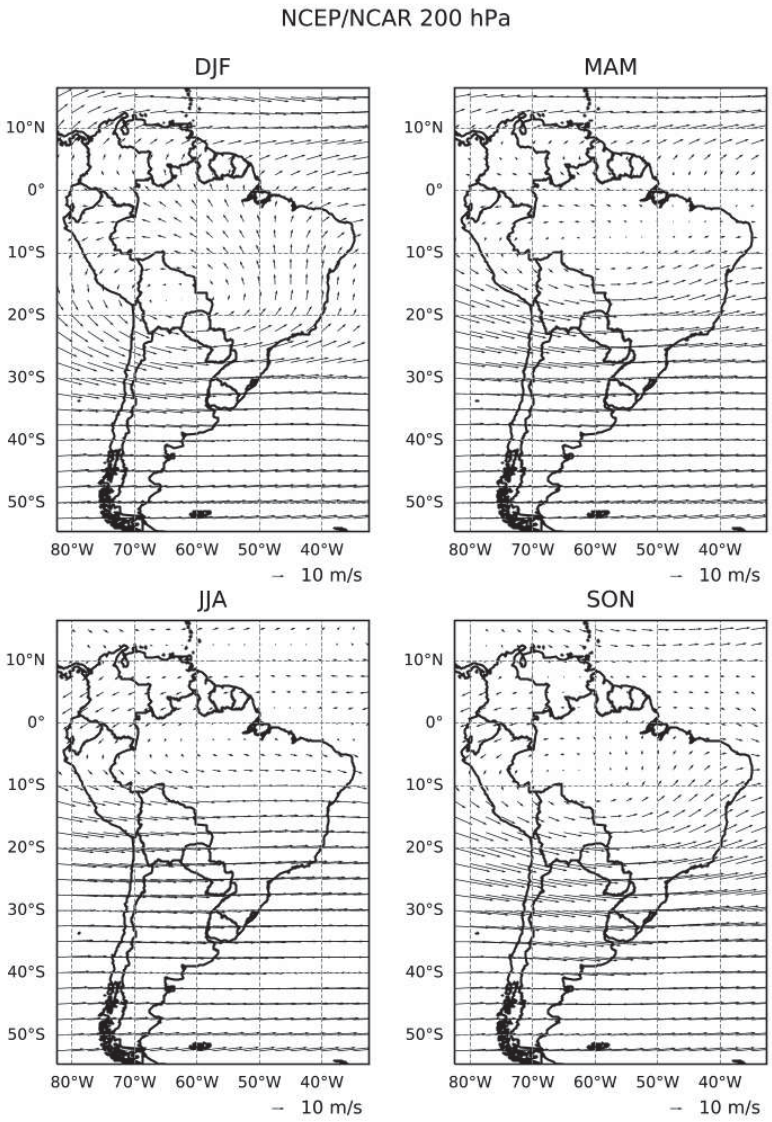
inverno, coerente com o avanço da alta pressão subtropical do Atlântico Sul sobre o continente.

FIGURA 27 – CLIMATOLOGIA MENSAL DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS (200 hPa) PARA DADOS DO NCEP/NCAR.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 28 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS (200 hPa) PARA DADOS DO NCEP/NCAR.



FONTE: A autora (2022).

Já em altos níveis, um sistema de alta pressão (circulação anticiclônica) se fortalece sobre a Amazônia em outubro (FIGURA 27) e se desloca na direção sul durante a primavera austral. Este sistema, situado a sudoeste do centro de maior precipitação de verão (FIGURA 9), está dinamicamente relacionado ao fortalecimento da convecção na região central do continente. No verão, esse sistema permanece sobre a Bolívia (Alta da Bolívia) (FIGURA 28). Com o final do verão austral, entre março e abril, a alta da Bolívia desloca-se para norte e se enfraquece.

As climatologias do vento em altos e baixos níveis foram obtidas também para os 11 modelos participantes do CMIP6 e para a média do conjunto desses modelos (*ensemble* multi-modelo). Para essa análise foram produzidos ao todo 384 mapas,

mas nesta seção são mostrados apenas aqueles referentes a resultados mais específicos. No Anexo 2 estão contidas as climatologias sazonais do vento em 850 hPa e 200 hPa de cada modelo.

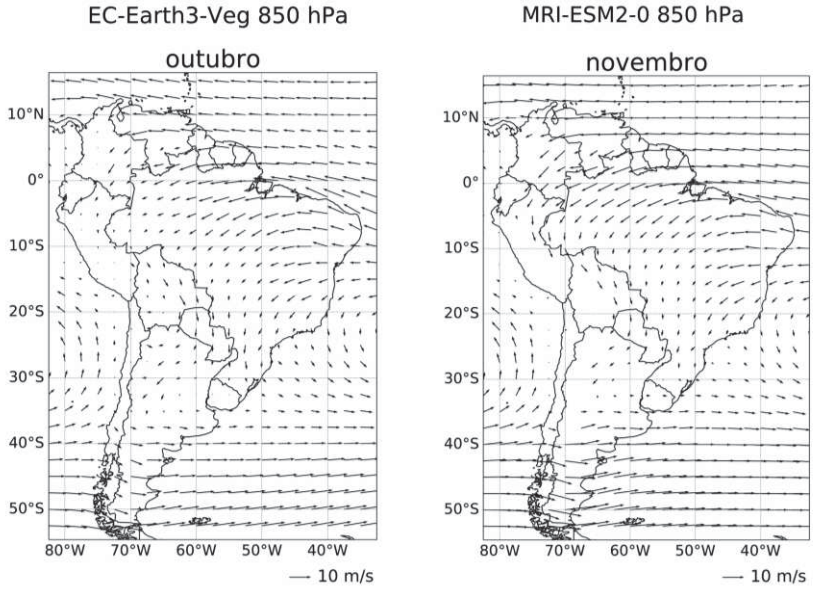
Em geral, para baixos níveis, todos os modelos analisados são capazes de reproduzir a mudança na direção do vento equatorial de sudeste/leste no inverno para nordeste no verão austral, quando cruza o equador e se torna de noroeste ao ser desviado pelos Andes, entrando no centro do continente. No entanto, os modelos diferem quanto ao mês em que ocorre a mudança na direção do vento equatorial para vento de nordeste, podendo ocorrer na metade ou final da primavera austral. Apesar disso, todos os modelos reproduzem a intensificação desses ventos e o fortalecimento da circulação ciclônica em torno da baixa do Chaco no verão austral. No outono do HS, todos os modelos também mostram o enfraquecimento do vento equatorial de nordeste.

A FIGURA 29 dá exemplos de dois modelos nos quais o mês da mudança da direção do vento em baixos níveis (850 hPa) para vento nordeste ao longo do equador (em torno de 60°W) foi climatologicamente diferente: outubro ou novembro. Nas observações, isto ocorre claramente em outubro (FIGURA 25). Frequentemente os modelos mostram mudanças na velocidade do vento e sua convergência em comparação com a reanálise (FIGURA 26). Durante o verão austral, por exemplo, os modelos ACCESS-ESM1-5, CanESM5, HadGEM3-GC31-LL, KACE-1-0-G e MIROC6 superestimam a velocidade do vento em 850 hPa no centro do continente e deslocam a sua máxima convergência para sudeste da observada (FIGURA 30). Por outro lado, o modelo CNRM-CM6-1 subestima o fortalecimento da baixa do Chaco que ocorre no verão e posiciona a máxima convergência mais ao norte (FIGURA 30). Estas diferenças estão coerentes com as diferenças observadas na máxima precipitação de verão, que nos primeiros modelos está deslocada para sudeste em relação à observada, enquanto para o modelo CNRM-CM6-1 está mais ao norte, mais próxima à observada, sendo a chuva subestimada na região do Chaco.

Para altos níveis da atmosfera, em geral todos os modelos reproduzem uma circulação anticiclônica com centro sobre a Bolívia em DJF, a chamada Alta da Bolívia no verão austral. Este padrão de circulação está associado com a máxima precipitação de monção. Com a convecção acentuada e liberação de calor latente na coluna atmosférica acentua-se o movimento ascendente e a divergência em altos níveis, próximo à tropopausa, produzindo a circulação anticiclônica a sudoeste do

máximo de precipitação. Com o final do verão, os modelos também representam o deslocamento desse sistema de alta pressão para Norte e seu enfraquecimento entre março e abril.

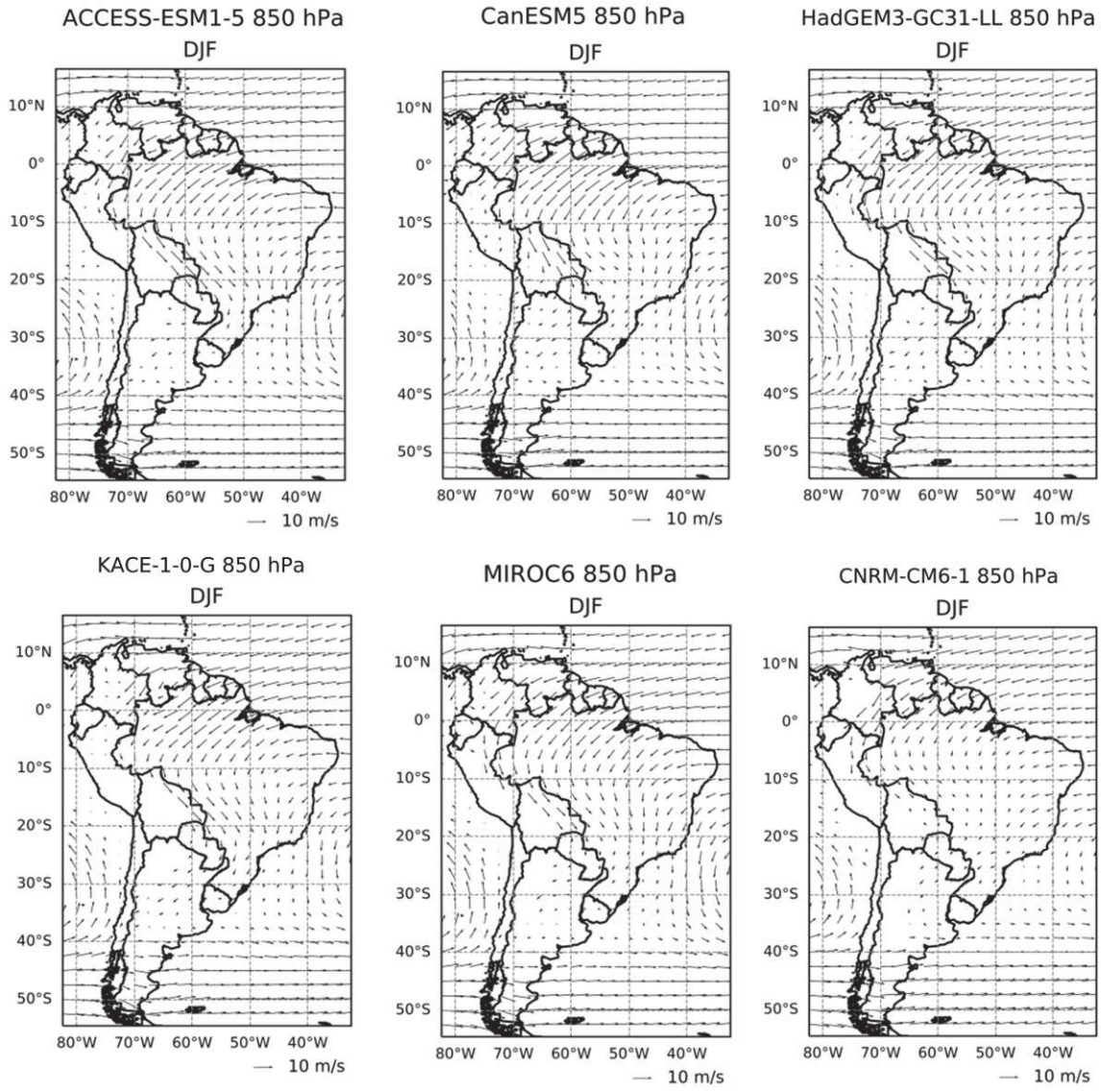
FIGURA 29 – CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS DE MODELOS QUE SIMULAM EM OUTUBRO (EC-EARTH3-VEG) E NOVEMBRO (MRI-ESM2-0) A ALTERAÇÃO NA DIREÇÃO DO VENTO EQUATORIAL QUE INCIDE NO CONTINENTE.



FONTE: A autora (2022).

Como os modelos simulam a máxima precipitação de monção (DJF) em diferentes posições (ver FIGURAS 13 a 23), há algumas diferenças nesta circulação anticiclônica de altos níveis, embora todos a simulem centrada sobre a Bolívia. Na FIGURA 31 são dados três exemplos. O modelo KACE-1-0-G (FIGURA 16) simula a máxima precipitação a sudeste da posição observada (FIGURA 10), enquanto o modelo MRI-ESM2-0 (FIGURA 14) a simula deslocada para noroeste. É possível ver que a circulação anticiclônica se estende para sudeste no primeiro caso em relação ao segundo. Em outro exemplo, pode-se comparar o modelo MRI-ESM2-0 (FIGURA 14), que produz forte precipitação, com o modelo CNRM-CM6-1 (FIGURA 18), cuja precipitação é menos intensa, embora esteja aproximadamente na mesma posição. A circulação anticiclônica produzida no primeiro caso é mais intensa do que no segundo (FIGURA 31).

FIGURA 30 – CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS DE MODELOS QUE MOSTRAM ALTERAÇÕES MAIS EVIDENTES NA VELOCIDADE DO VENTO NO VERÃO AUSTRAL.

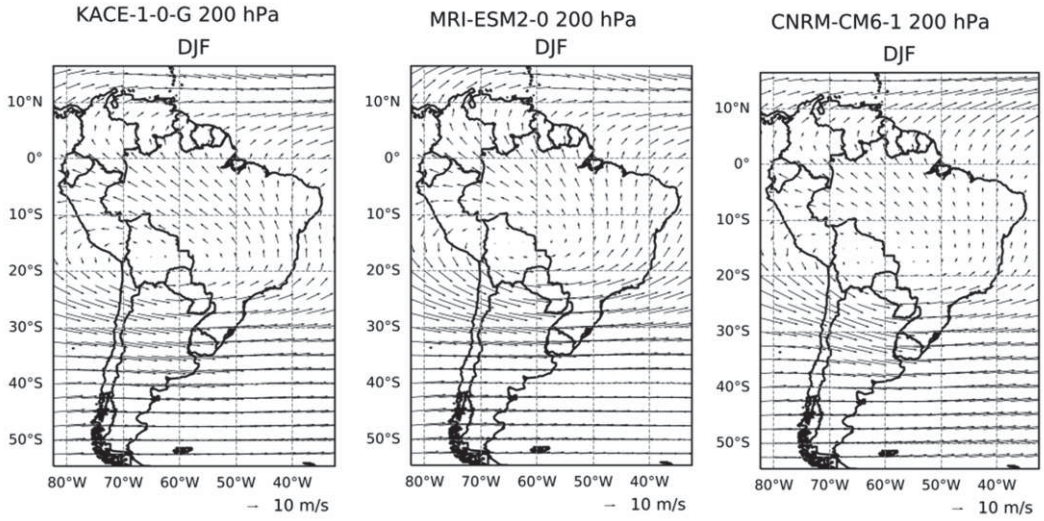


FONTE: A autora (2022).

Durante o verão austral, os ventos de nordeste em baixos níveis transportam umidade do oceano para o continente, transformam-se em ventos de noroeste perto dos Andes e seguem para o sudeste da AS, descrevendo circulação ciclônica em torno da Baixa do Chaco. A interação entre esses ventos e os ventos que atingem o leste do continente, associados com a Alta do Atlântico Sul, forma a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (FIGURA 26) e uma banda de nebulosidade noroeste-sudeste, que faz com que a precipitação aumente nesse período principalmente na Amazônia, no centro e sudeste do Brasil (FIGURA 10). Nesta última região, o aumento da precipitação nesse período também está relacionado com a ativação da ZCAS. Uma vez que os modelos, de modo geral, foram capazes de reproduzir os principais

aspectos da circulação no clima presente, esse comportamento da precipitação da primavera para o verão pôde ser verificado nas simulações dos modelos apresentadas na seção anterior (Seção 4.1). Contudo, embora os modelos reproduzam os aspectos básicos da circulação de monção, eles as deslocam um pouco em relação às observações, o que explica os deslocamentos nos padrões de precipitação simulados.

FIGURA 31 – EXEMPLOS DE CAMPOS DE VENTO EM ALTOS NÍVEIS DE MODELOS QUE MOSTRAM ALTERAÇÕES NA CIRCULAÇÃO ANTICILÔNICA NO VERÃO AUSTRAL, NO CLIMA PRESENTE (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).

4.3 AVALIAÇÃO DE CLIMATOLOGIAS

O desempenho dos modelos ao simularem a precipitação e a circulação na AS no clima presente foi analisado com base no cálculo de três índices que avaliam a relação entre as climatologias obtidas de dados observados (ou de reanálise) e as correspondentes de cada um dos modelos e da média do conjunto de modelos. As climatologias de precipitação dos modelos foram comparadas com as climatologias de precipitação do GPCC. Analogamente, as climatologias de cada componente do vento (zonal $\vec{u}$ ou meridional $\vec{v}$) foram comparadas com as climatologias de cada componente do vento do NCEP/NCAR.

O primeiro índice avaliado envolveu o cálculo dos coeficientes de correlação espacial entre climatologias observadas e simuladas de precipitação e climatologias observadas e simuladas dos componentes do vento. Para o cálculo do índice, o coeficiente de correlação espacial foi subtraído de 1 e dividido pela média desses

resultados (1-r) no mês ou estação correspondentes. As TABELAS 2, 3, 4, 5 e 6 a seguir apresentam os valores mensais calculados para esse índice, já padronizados pelas médias dos valores mensais de (1-r) sobre todos os modelos, as quais são mostradas nas últimas linhas das tabelas. Assim, para obter o valor real do coeficiente de correlação calculado, basta multiplicar o valor apresentado na tabela pela média da coluna correspondente e subtrair o resultado de 1. Pretende-se que o índice seja tanto menor quanto melhor for o desempenho do modelo e a divisão pela média de todos os modelos destina-se a padronizar os valores em termos de unidades da média para cada mês. Isto é aconselhável, tendo em vista que para compor o cálculo do índice geral por variável (IG_V), foi computada a média anual de cada modelo, para cada variável.

TABELA 2 – ÍNDICES (1-r) OBTIDOS DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ESPACIAL (r) ENTRE PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA (GPCC) E SIMULADA PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014, APÓS SEREM PADRONIZADOS PELA MÉDIA DE (1-r) PARA CADA MÊS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**jan**	**fev**	**mar**	**abr**	**mai**	**jun**	**jul**	**ago**	**set**	**out**	**nov**	**dez**
ACCESS-ESM1-5	1,05	0,92	0,86	0,93	0,96	0,91	0,90	1,04	1,01	1,20	1,29	1,09
CanESM5	1,74	1,68	1,48	1,04	0,86	1,17	1,16	1,32	1,55	1,54	1,79	1,69
CESM2	0,76	0,74	0,65	0,52	0,57	0,92	0,99	0,76	0,69	0,68	0,70	0,78
CNRM-CM6-1	1,05	1,02	1,26	1,37	1,02	1,07	1,32	1,56	1,69	1,53	1,51	1,42
EC-Earth3-Veg	0,81	1,12	1,39	1,50	1,62	0,93	0,73	0,82	0,84	0,94	0,93	0,76
HadGEM3-GC31-LL	0,99	1,09	1,14	1,19	1,09	0,77	0,70	0,85	0,91	0,94	0,81	0,86
IPSL-CM6A-LR	1,26	1,05	1,08	1,24	1,37	1,09	0,96	0,89	0,95	0,93	0,94	1,32
KACE-1-0-G	1,09	1,14	1,05	1,08	1,17	1,20	1,26	1,26	0,89	0,76	0,70	0,81
MIROC6	0,77	0,72	0,71	0,67	0,80	1,19	1,24	1,17	1,12	1,00	0,81	0,78
MPI-ESM1-2-HR	0,83	0,89	0,88	0,99	1,11	1,25	1,27	0,90	0,75	0,74	0,78	0,80
MRI-ESM2-0	0,88	0,80	0,69	0,70	0,75	0,89	0,81	0,75	0,87	1,00	1,02	0,97
Ensemble Multi-modelo	0,78	0,84	0,81	0,76	0,68	0,62	0,66	0,67	0,72	0,74	0,72	0,72
Médias Mensais	0,33	0,40	0,39	0,36	0,25	0,17	0,20	0,22	0,25	0,28	0,32	0,31

FONTE: A autora (2022).

TABELA 3 – ÍNDICES (1-r) OBTIDOS DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ESPACIAL (r) ENTRE O COMPONENTE ZONAL DO VENTO EM 850 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014, APÓS SEREM PADRONIZADOS PELA MÉDIA DE (1-r) PARA CADA MÊS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**jan**	**fev**	**mar**	**abr**	**mai**	**jun**	**jul**	**ago**	**set**	**out**	**nov**	**dez**
ACCESS-ESM1-5	0,82	0,75	0,78	0,78	0,96	0,84	0,77	0,87	0,96	0,85	1,10	0,89
CanESM5	0,86	1,03	0,70	0,76	0,90	1,29	1,04	0,76	0,76	0,90	1,11	0,88
CESM2	0,74	0,65	0,70	0,68	0,95	1,62	1,47	1,40	1,05	0,89	0,83	0,90
CNRM-CM6-1	2,04	1,79	2,06	1,87	1,35	1,19	1,24	1,60	1,68	1,86	1,48	1,83
EC-Earth3-Veg	0,93	1,33	1,76	1,78	1,93	0,95	0,88	1,03	1,07	1,00	0,96	0,85
HadGEM3-GC31-LL	1,07	1,29	1,00	1,00	0,90	0,70	0,77	0,75	0,66	0,73	0,88	1,08
IPSL-CM6A-LR	0,80	0,79	0,95	1,07	1,00	0,84	0,80	0,76	0,78	0,74	0,66	0,75
KACE-1-0-G	1,02	0,88	0,68	0,65	0,58	0,87	1,03	1,17	1,24	1,10	1,13	1,14
MIROC6	0,93	0,90	0,95	0,82	0,80	1,35	1,53	1,42	1,57	1,51	1,41	1,14
MPI-ESM1-2-HR	1,21	1,33	1,28	1,26	1,12	1,04	1,09	0,92	0,83	1,02	1,06	1,10
MRI-ESM2-0	1,02	0,60	0,52	0,69	0,80	0,78	0,94	0,86	0,89	0,83	0,77	0,83
Ensemble Multi-modelo	0,57	0,66	0,62	0,64	0,71	0,55	0,45	0,46	0,51	0,57	0,62	0,62
Médias Mensais	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

FONTE: A autora (2022).

TABELA 4 – ÍNDICES (1-r) OBTIDOS DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ESPACIAL (r) ENTRE O COMPONENTE ZONAL DO VENTO EM 200 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014, APÓS SEREM PADRONIZADOS PELA MÉDIA DE (1-r) PARA CADA MÊS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**jan**	**fev**	**mar**	**abr**	**mai**	**jun**	**jul**	**ago**	**set**	**out**	**nov**	**dez**
ACCESS-ESM1-5	0,63	0,75	1,09	0,68	0,65	0,92	0,59	0,63	1,49	2,59	2,56	1,17
CanESM5	0,89	1,25	1,01	0,89	0,74	0,95	1,03	1,08	1,43	1,20	1,46	1,29
CESM2	0,99	1,05	1,61	0,74	0,44	0,79	0,66	0,48	0,75	0,83	0,59	1,43
CNRM-CM6-1	1,12	1,22	1,63	1,95	1,47	0,90	0,53	0,91	0,96	1,07	1,20	1,06
EC-Earth3-Veg	2,98	1,56	1,43	1,32	2,47	1,56	0,69	0,80	0,78	1,07	1,79	2,46
HadGEM3-GC31-LL	0,46	0,92	0,82	1,22	1,48	0,74	1,08	1,18	0,74	0,47	0,79	0,54
IPSL-CM6A-LR	0,68	0,99	0,92	0,67	0,73	1,37	1,34	1,67	0,99	0,92	0,30	0,22
KACE-1-0-G	0,37	0,46	0,33	0,87	1,31	1,02	0,80	0,54	0,72	0,80	0,94	0,62
MIROC6	0,47	0,73	0,83	0,74	0,29	1,24	1,59	1,90	1,19	0,88	0,39	0,57
MPI-ESM1-2-HR	0,80	0,80	0,90	1,48	1,20	1,22	1,90	0,93	1,36	0,97	0,97	0,88
MRI-ESM2-0	2,37	1,84	1,12	0,88	0,56	0,94	1,27	1,41	1,09	0,81	0,53	1,44
Ensemble Multi-modelo	0,24	0,44	0,30	0,57	0,66	0,37	0,51	0,47	0,49	0,39	0,48	0,31
Médias Mensais	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02

FONTE: A autora (2022).

TABELA 5 – ÍNDICES (1-r) OBTIDOS DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ESPACIAL (r) ENTRE O COMPONENTE MERIDIONAL DO VENTO EM 850 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014, APÓS SEREM PADRONIZADOS PELA MÉDIA DE (1-r) PARA CADA MÊS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**jan**	**fev**	**mar**	**abr**	**mai**	**jun**	**jul**	**ago**	**set**	**out**	**nov**	**dez**
ACCESS-ESM1-5	0,70	0,63	0,69	0,77	0,86	1,01	0,99	0,90	0,97	0,98	1,03	0,64
CanESM5	0,98	0,93	0,77	0,80	0,88	0,93	0,79	0,62	0,75	0,90	0,92	0,81
CESM2	0,81	0,69	0,80	0,80	0,95	1,16	1,02	0,98	1,09	0,80	0,69	0,82
CNRM-CM6-1	1,48	1,83	1,66	1,39	1,11	1,05	0,98	0,87	0,75	0,92	1,10	1,41
EC-Earth3-Veg	0,94	1,06	1,27	1,24	1,05	0,79	0,70	0,72	0,75	0,93	1,05	0,95
HadGEM3-GC31-LL	0,74	0,80	0,75	0,72	0,68	0,66	0,70	0,72	0,71	0,71	0,84	0,83
IPSL-CM6A-LR	1,19	1,06	1,21	1,62	1,77	1,66	1,71	1,91	1,65	1,65	1,74	1,52
KACE-1-0-G	1,09	0,90	0,70	0,52	0,58	0,72	1,02	1,26	1,15	1,04	0,96	1,01
MIROC6	0,73	0,81	0,89	1,12	1,45	1,56	1,49	1,34	1,17	1,15	0,78	0,69
MPI-ESM1-2-HR	1,31	1,41	1,51	1,24	0,85	0,68	0,83	0,92	1,14	1,25	1,25	1,31
MRI-ESM2-0	1,37	1,23	1,07	1,05	1,05	1,04	1,04	1,09	1,16	1,04	1,01	1,34
Ensemble Multi-modelo	0,66	0,67	0,68	0,73	0,77	0,74	0,72	0,68	0,71	0,63	0,63	0,68
Médias Mensais	0,08	0,11	0,16	0,23	0,26	0,19	0,17	0,15	0,17	0,13	0,11	0,09

FONTE: A autora (2022).

TABELA 6 – ÍNDICES (1-r) OBTIDOS DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ESPACIAL (r) ENTRE O COMPONENTE MERIDIONAL DO VENTO EM 200 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014, APÓS SEREM PADRONIZADOS PELA MÉDIA DE (1-r) PARA CADA MÊS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**jan**	**fev**	**mar**	**abr**	**mai**	**jun**	**jul**	**ago**	**set**	**out**	**nov**	**dez**
ACCESS-ESM1-5	1,16	1,00	1,47	1,61	1,40	1,33	0,94	0,80	0,81	1,14	1,52	1,22
CanESM5	1,36	1,33	1,23	0,69	0,74	1,09	1,73	1,30	1,28	1,70	1,60	1,55
CESM2	0,67	0,67	0,50	0,59	0,83	1,17	0,78	0,60	1,19	1,11	0,72	0,94
CNRM-CM6-1	1,72	1,61	1,72	1,62	0,96	0,92	0,65	0,92	0,68	0,93	1,57	1,43
EC-Earth3-Veg	0,83	1,08	1,45	1,31	1,22	0,62	0,60	0,79	0,50	0,99	1,03	0,77
HadGEM3-GC31-LL	0,96	1,01	0,81	1,17	1,11	0,57	0,76	0,75	0,78	0,62	0,85	1,01
IPSL-CM6A-LR	1,09	1,43	1,19	0,69	0,94	1,13	1,00	1,30	0,82	1,17	0,66	0,80
KACE-1-0-G	0,88	0,72	0,67	0,85	1,36	1,07	0,72	0,72	0,78	0,74	1,04	1,08
MIROC6	0,72	0,67	0,66	0,95	0,84	1,17	1,16	1,08	1,09	0,62	0,89	0,94
MPI-ESM1-2-HR	1,31	1,23	1,18	1,25	1,05	1,49	1,86	1,47	1,69	1,10	0,81	1,05
MRI-ESM2-0	0,79	0,68	0,68	0,78	0,84	0,89	1,14	1,71	1,72	1,36	0,66	0,62
Ensemble Multi-modelo	0,51	0,56	0,43	0,49	0,71	0,56	0,67	0,55	0,65	0,52	0,65	0,58
Médias Mensais	0,09	0,15	0,15	0,20	0,33	0,26	0,36	0,28	0,26	0,10	0,08	0,07

FONTE: A autora (2022).

O segundo índice calculado foi a raiz do erro quadrático médio (RMSE, em inglês) entre climatologia observada do GPCC, ou da reanálise (NCEP/NCAR), e a correspondente climatologia de cada um dos modelos e da média do conjunto de modelos. Resultados mensais para a precipitação e para os componentes zonais e meridionais do vento em altos e baixos níveis são apresentados nas TABELAS 7, 8, 9, 10 e 11. Nas tabelas, cada valor obtido já foi padronizado pela média dos resultados para todos os modelos em cada mês, a qual é mostrada nas últimas linhas.

TABELA 7 – RMSE PADRONIZADO ENTRE PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA (GPCC) E SIMULADA PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**jan**	**fev**	**mar**	**abr**	**mai**	**jun**	**jul**	**ago**	**set**	**out**	**nov**	**dez**
ACCESS-ESM1-5	1,21	1,13	1,06	1,06	1,05	1,11	1,09	1,21	1,19	1,18	1,31	1,29
CanESM5	1,45	1,40	1,28	1,13	0,99	1,05	0,99	1,02	1,21	1,35	1,37	1,37
CESM2	0,87	0,88	0,84	0,77	0,84	1,01	1,03	0,95	0,95	0,84	0,79	0,83
CNRM-CM6-1	0,95	1,00	1,14	1,11	0,97	0,99	1,11	1,20	1,26	1,28	1,12	1,03
EC-Earth3-Veg	0,82	0,93	1,11	1,18	1,18	0,93	0,84	0,87	0,88	0,96	0,96	0,82
HadGEM3-GC31-LL	1,03	1,07	1,04	1,01	1,02	0,93	0,93	1,00	1,01	0,98	0,96	0,98
IPSL-CM6A-LR	1,01	0,95	1,01	1,16	1,21	1,06	0,99	0,90	0,88	0,88	0,87	0,99
KACE-1-0-G	0,96	0,96	0,94	0,94	0,98	0,97	1,00	1,03	0,91	0,82	0,83	0,88
MIROC6	0,90	0,88	0,87	0,91	1,04	1,18	1,20	1,21	1,16	1,02	0,97	0,97
MPI-ESM1-2-HR	0,88	0,90	0,89	0,89	0,96	0,98	1,02	0,85	0,78	0,80	0,82	0,85
MRI-ESM2-0	1,10	1,04	0,98	1,03	0,98	1,08	1,06	0,99	0,98	1,09	1,22	1,19
Ensemble Multi-modelo	0,82	0,85	0,84	0,81	0,78	0,73	0,76	0,76	0,79	0,79	0,77	0,78
Médias Mensais	3,19	3,60	3,46	3,26	2,91	2,51	2,44	2,26	2,33	2,50	2,73	2,92

FONTE: A autora (2022).

TABELA 8 – RMSE PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE ZONAL DO VENTO EM 850 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**jan**	**fev**	**mar**	**abr**	**mai**	**jun**	**jul**	**ago**	**set**	**out**	**nov**	**dez**
ACCESS-ESM1-5	0,85	0,83	0,88	0,92	0,93	0,94	0,83	0,89	0,95	0,87	0,98	0,91
CanESM5	0,84	0,97	0,81	0,87	0,99	1,08	0,98	0,89	1,03	0,99	1,06	0,91
CESM2	0,86	0,80	0,90	0,85	1,02	1,26	1,22	1,24	1,11	1,01	0,92	0,99
CNRM-CM6-1	1,43	1,39	1,49	1,41	1,24	1,21	1,33	1,44	1,37	1,44	1,29	1,37
EC-Earth3-Veg	0,95	1,13	1,29	1,34	1,32	0,97	0,88	0,94	0,94	0,97	0,95	0,91
HadGEM3-GC31-LL	1,05	1,12	0,99	0,99	0,90	0,83	0,94	0,95	0,89	0,96	0,95	1,03
IPSL-CM6A-LR	0,87	0,88	0,96	1,02	1,06	0,93	0,98	0,92	0,93	0,91	0,88	0,86
KACE-1-0-G	1,03	0,97	0,86	0,84	0,73	0,93	0,99	1,07	1,12	1,06	1,04	1,06
MIROC6	1,04	0,97	1,00	0,92	0,87	1,12	1,19	1,11	1,14	1,25	1,20	1,10
MPI-ESM1-2-HR	1,25	1,25	1,20	1,14	1,07	1,04	1,06	0,94	0,85	0,93	1,00	1,09
MRI-ESM2-0	1,07	0,89	0,82	0,92	1,07	0,94	0,97	1,00	1,03	0,89	0,99	1,02
Ensemble Multi-modelo	0,76	0,80	0,78	0,78	0,81	0,74	0,63	0,62	0,65	0,71	0,74	0,76
Médias Mensais	1,44	1,68	1,69	1,64	1,61	1,45	1,52	1,55	1,41	1,34	1,35	1,44

FONTE: A autora (2022).

TABELA 9 – RMSE PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE ZONAL DO VENTO EM 200 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**jan**	**fev**	**mar**	**abr**	**mai**	**jun**	**jul**	**ago**	**set**	**out**	**nov**	**dez**
ACCESS-ESM1-5	1,09	0,97	0,94	0,74	0,73	0,86	0,96	1,04	1,31	1,62	1,68	1,28
CanESM5	1,09	1,19	1,19	1,18	1,18	1,20	1,10	1,13	1,25	1,35	1,47	1,29
CESM2	0,90	0,99	1,25	1,19	0,98	1,04	1,06	1,01	0,99	1,16	0,85	0,94
CNRM-CM6-1	0,80	0,89	1,07	1,16	1,01	0,80	0,54	0,63	0,65	0,73	0,88	0,78
EC-Earth3-Veg	1,42	1,17	1,22	1,19	1,34	0,95	0,85	0,98	0,96	0,96	1,12	1,19
HadGEM3-GC31-LL	0,88	1,10	1,00	1,01	1,15	0,98	1,16	1,16	1,09	0,79	0,83	0,92
IPSL-CM6A-LR	0,85	1,08	1,10	0,94	0,89	1,03	1,06	1,08	0,93	0,97	0,67	0,50
KACE-1-0-G	0,85	0,74	0,64	0,90	1,07	1,16	1,20	1,12	1,07	0,81	1,08	1,16
MIROC6	1,05	1,02	0,97	0,70	0,57	0,90	0,98	1,01	0,81	0,74	0,60	1,05
MPI-ESM1-2-HR	0,87	0,83	0,80	1,07	1,08	1,06	1,08	0,83	0,92	0,93	0,95	0,87
MRI-ESM2-0	1,56	1,30	1,28	1,26	1,19	1,24	1,13	1,15	1,14	1,12	1,13	1,39
Ensemble Multi-modelo	0,64	0,71	0,55	0,68	0,80	0,80	0,87	0,85	0,88	0,83	0,75	0,63
Médias Mensais	3,21	3,62	3,07	3,37	3,86	3,57	4,90	5,17	5,41	4,55	3,89	3,17

FONTE: A autora (2022).

TABELA 10 – RMSE PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE MERIDIONAL DO VENTO EM 850 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**jan**	**fev**	**mar**	**abr**	**mai**	**jun**	**jul**	**ago**	**set**	**out**	**nov**	**dez**
ACCESS-ESM1-5	1,00	0,95	0,90	0,86	0,86	0,94	0,94	0,89	0,93	0,97	1,06	0,95
CanESM5	1,05	1,05	0,89	0,87	0,95	1,02	0,92	0,78	0,90	0,98	1,00	0,96
CESM2	0,90	0,88	0,97	0,92	1,04	1,18	1,16	1,23	1,30	0,99	0,81	0,85
CNRM-CM6-1	0,97	1,14	1,18	1,12	1,02	1,05	1,12	1,03	0,83	0,91	0,97	0,97
EC-Earth3-Veg	0,96	0,98	1,08	1,09	1,03	0,90	0,87	0,82	0,80	0,90	0,97	0,95
HadGEM3-GC31-LL	1,08	1,05	0,96	0,99	0,93	0,82	0,83	0,84	0,84	0,85	0,97	1,08
IPSL-CM6A-LR	0,99	0,97	1,13	1,39	1,37	1,21	1,20	1,30	1,28	1,42	1,36	1,15
KACE-1-0-G	1,10	0,99	0,88	0,85	0,77	0,83	0,92	1,08	1,10	1,07	1,06	1,08
MIROC6	1,14	1,14	1,14	1,03	1,20	1,30	1,27	1,18	1,09	1,10	1,07	1,15
MPI-ESM1-2-HR	0,96	1,02	1,09	1,08	1,00	0,93	0,98	1,03	1,12	1,09	1,04	1,02
MRI-ESM2-0	1,04	1,02	0,98	1,01	1,01	1,00	1,00	1,05	1,01	0,96	0,93	1,03
Ensemble Multi-modelo	0,81	0,81	0,79	0,81	0,82	0,81	0,80	0,78	0,80	0,76	0,77	0,81
Médias Mensais	1,19	1,24	1,17	1,20	1,26	1,24	1,28	1,16	1,14	1,00	1,06	1,19

FONTE: A autora (2022).

TABELA 11 – RMSE PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE MERIDIONAL DO VENTO EM 200 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**jan**	**fev**	**mar**	**abr**	**mai**	**jun**	**jul**	**ago**	**set**	**out**	**nov**	**dez**
ACCESS-ESM1-5	1,46	1,39	1,57	1,45	1,33	1,19	1,05	0,99	0,97	1,31	1,65	1,41
CanESM5	0,94	0,96	0,91	0,77	0,72	0,88	1,12	0,96	1,07	1,22	1,01	1,04
CESM2	1,18	1,06	1,15	1,05	1,08	1,11	0,87	0,84	1,28	1,10	1,12	1,31
CNRM-CM6-1	1,15	1,22	1,30	1,25	0,99	0,98	0,88	0,95	0,85	0,93	1,02	1,01
EC-Earth3-Veg	0,83	0,87	1,00	1,04	1,06	0,80	0,77	0,96	0,75	0,96	0,91	0,84
HadGEM3-GC31-LL	0,89	0,93	0,81	1,03	1,11	0,87	0,97	0,98	0,94	0,86	0,91	0,92
IPSL-CM6A-LR	0,91	1,11	1,09	0,81	0,91	1,02	0,93	1,05	0,88	1,07	0,74	0,78
KACE-1-0-G	0,81	0,73	0,68	0,86	1,09	1,10	1,01	1,00	1,01	0,89	0,95	0,91
MIROC6	1,17	1,17	1,14	1,12	1,02	1,14	1,12	1,03	0,99	0,86	1,37	1,32
MPI-ESM1-2-HR	0,95	0,94	0,92	1,00	0,86	1,20	1,33	1,15	1,24	0,98	0,73	0,87
MRI-ESM2-0	1,01	0,90	0,83	0,96	1,06	1,02	1,15	1,35	1,22	1,10	0,81	0,86
Ensemble Multi-modelo	0,69	0,71	0,59	0,66	0,77	0,70	0,79	0,74	0,80	0,73	0,79	0,73
Médias Mensais	1,96	2,20	1,90	1,87	1,95	1,67	1,81	1,69	1,78	1,60	1,94	1,86

FONTE: A autora (2022).

O terceiro índice calculado foi o *bias*, ou diferença, entre a climatologia de cada modelo (e da média do conjunto de modelos) e a correspondente climatologia obtida de observações ou reanálise (computando: modelo - observado). Para o cálculo desse índice, foram tomados os módulos dos valores resultantes, evitando a interferência do sinal nos cálculos das médias mensais ou sazonais. As TABELAS 12, 13, 14, 15 e 16 apresentam os *bias* mensais obtidos para cada modelo especificado. Os resultados para cada mês foram padronizados pelas médias mensais mostradas nas últimas linhas das tabelas. Os valores destacados em amarelo correspondem aos *bias* cujos valores originais (sem padronizar) são negativos. Isso indica situações nas quais a climatologia apresentada pelo modelo subestimou o valor observado na média sobre todo o domínio.

TABELA 12 – BIAS PADRONIZADO ENTRE PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA (GPCC) E SIMULADA PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. VALORES DESTACADOS EM AMARELO REFEREM-SE A VALOR NEGATIVO DO BIAS REAL. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
ACCESS-ESM1-5	2,21	1,73	2,41	2,13	0,46	1,76	1,08	1,72	2,17	1,20	1,15	1,35
CanESM5	0,36	0,54	0,50	0,05	1,43	1,27	1,75	1,99	1,15	2,09	0,79	0,20
CESM2	0,29	0,69	0,08	0,54	1,72	1,77	2,04	1,85	1,18	1,27	0,32	0,53
CNRM-CM6-1	0,02	0,64	0,90	1,38	1,82	0,89	1,57	2,14	1,46	1,17	0,13	0,46
EC-Earth3-Veg	0,11	0,26	1,08	0,71	0,88	0,95	0,35	0,08	0,20	0,01	0,76	0,64
HadGEM3-GC31-LL	2,53	1,52	1,09	0,89	0,31	2,14	1,52	1,62	2,15	2,04	1,83	1,97
IPSL-CM6A-LR	1,59	1,42	1,28	1,16	0,21	0,13	0,16	0,03	0,43	0,31	0,84	1,00
KACE-1-0-G	0,24	0,65	0,16	0,76	0,80	0,46	0,14	0,24	1,21	0,89	1,27	1,13
MIROC6	1,08	1,35	1,87	1,85	0,40	0,36	0,86	0,58	0,45	1,24	1,51	1,16
MPI-ESM1-2-HR	0,36	0,72	0,25	0,90	2,09	1,93	1,96	1,00	0,12	0,08	0,96	0,88
MRI-ESM2-0	2,25	1,48	1,86	1,11	1,01	0,25	0,07	0,44	1,12	1,47	1,58	1,71
Ensemble Multi-modelo	0,98	1,00	0,53	0,52	0,87	0,09	0,50	0,32	0,35	0,24	0,87	0,97
Médias Mensais	0,31	0,69	0,29	0,28	0,28	0,30	0,38	0,31	0,34	0,31	0,60	0,56

FONTE: A autora (2022).

TABELA 13 – BIAS PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE ZONAL DO VENTO EM 850 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. VALORES DESTACADOS EM AMARELO REFEREM-SE A VALOR NEGATIVO DO BIAS REAL. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
ACCESS-ESM1-5	0,49	0,13	0,96	0,75	0,50	0,61	0,05	0,74	0,94	0,70	0,40	0,38
CanESM5	0,17	0,67	0,09	0,40	0,34	1,14	0,79	0,16	0,34	0,73	1,00	0,71
CESM2	1,94	0,91	2,19	1,67	0,70	1,11	0,79	0,52	0,70	1,66	1,53	2,22
CNRM-CM6-1	2,46	2,38	2,69	3,08	2,28	2,44	3,27	2,69	2,21	1,21	1,29	1,90
EC-Earth3-Veg	0,45	0,17	0,81	0,39	1,59	1,04	0,06	0,50	0,92	1,01	1,13	1,36
HadGEM3-GC31-LL	0,18	0,94	0,22	0,05	0,38	0,48	1,87	2,09	2,11	1,60	1,03	0,65
IPSL-CM6A-LR	0,02	0,79	0,30	0,08	0,40	0,34	0,84	0,89	0,82	1,55	1,84	0,84
KACE-1-0-G	0,19	0,31	0,18	0,11	0,04	0,45	0,95	1,40	1,65	1,26	0,56	0,15
MIROC6	0,53	0,72	0,64	0,67	0,87	0,46	1,01	0,30	0,01	0,73	0,90	0,63
MPI-ESM1-2-HR	2,61	2,15	1,98	2,47	2,00	1,38	1,68	1,05	1,10	0,68	1,30	1,42
MRI-ESM2-0	2,54	2,02	1,64	1,80	1,92	1,76	0,35	1,44	0,80	0,30	0,63	1,58
Ensemble Multi-modelo	0,42	0,82	0,30	0,52	0,98	0,77	0,33	0,23	0,40	0,58	0,40	0,15
Médias Mensais	0,23	0,36	0,30	0,23	0,35	0,35	0,33	0,37	0,33	0,37	0,30	0,25

FONTE: A autora (2022).

TABELA 14 – BIAS PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE ZONAL DO VENTO EM 200 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. VALORES DESTACADOS EM AMARELO REFEREM-SE A VALOR NEGATIVO DO BIAS REAL. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
ACCESS-ESM1-5	1,34	1,16	0,81	0,12	0,52	0,85	1,06	1,14	1,35	1,70	1,78	1,28
CanESM5	2,06	1,49	1,71	2,02	1,85	1,33	1,15	1,26	1,38	1,60	2,24	2,38
CESM2	1,54	2,21	2,07	2,31	1,80	1,24	1,22	1,21	1,06	1,15	1,22	0,92
CNRM-CM6-1	0,02	0,62	0,76	0,69	0,01	0,49	0,43	0,34	0,43	0,27	0,16	0,44
EC-Earth3-Veg	0,35	1,29	1,89	1,90	0,25	0,67	0,89	1,02	0,94	0,89	0,85	0,82
HadGEM3-GC31-LL	0,28	0,49	0,01	0,64	1,29	1,07	1,15	1,11	1,04	0,83	0,66	0,01
IPSL-CM6A-LR	0,62	0,36	0,59	0,22	0,65	0,98	1,07	1,00	0,93	1,01	1,04	0,92
KACE-1-0-G	0,35	0,61	0,67	0,78	1,08	1,24	1,26	1,20	1,12	0,76	0,43	0,41
MIROC6	1,94	1,64	0,99	0,27	0,77	0,68	0,66	0,66	0,67	0,55	0,14	1,48
MPI-ESM1-2-HR	1,16	0,23	0,18	0,41	0,97	1,12	0,95	0,81	0,80	0,93	0,92	1,16
MRI-ESM2-0	1,68	1,64	2,03	2,10	1,86	1,34	1,16	1,25	1,28	1,31	1,60	1,56
Ensemble Multi-modelo	0,67	0,27	0,29	0,53	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,61
Médias Mensais	0,97	0,98	1,17	1,23	1,63	2,46	3,66	3,78	4,02	3,21	1,98	1,26

FONTE: A autora (2022).

TABELA 15 – BIAS PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE MERIDIONAL DO VENTO EM 850 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. VALORES DESTACADOS EM AMARELO REFEREM-SE A VALOR NEGATIVO DO BIAS REAL. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
ACCESS-ESM1-5	1,30	1,26	1,22	1,05	0,61	0,71	1,49	1,46	1,52	1,39	1,35	1,33
CanESM5	1,15	1,19	0,94	0,35	1,22	1,15	0,45	0,52	1,39	1,32	1,20	1,04
CESM2	0,73	0,78	0,75	0,58	0,55	0,99	0,49	0,25	1,50	1,20	0,56	0,61
CNRM-CM6-1	0,36	0,50	0,59	0,74	0,21	0,58	2,55	2,72	0,39	0,57	0,15	0,15
EC-Earth3-Veg	1,08	0,99	0,98	1,27	2,01	0,97	0,92	0,14	0,35	0,56	0,98	1,02
HadGEM3-GC31-LL	1,51	1,41	1,30	1,50	1,81	1,48	1,49	1,11	1,03	0,89	1,27	1,48
IPSL-CM6A-LR	0,58	0,67	0,77	1,04	0,91	0,39	0,74	1,21	0,03	0,05	0,55	0,63
KACE-1-0-G	1,20	1,12	1,17	1,51	2,20	2,47	2,29	3,08	2,05	1,76	1,52	1,39
MIROC6	1,50	1,50	1,70	1,18	0,60	0,83	0,35	0,14	1,19	1,50	1,70	1,65
MPI-ESM1-2-HR	0,80	0,75	0,71	0,88	1,24	0,88	0,28	0,57	1,03	1,22	1,06	0,98
MRI-ESM2-0	0,86	0,90	0,95	1,00	0,05	1,38	0,91	0,74	0,71	0,75	0,76	0,79
Ensemble Multi-modelo	0,94	0,93	0,92	0,92	0,60	0,17	0,05	0,05	0,82	0,78	0,90	0,93
Médias Mensais	0,56	0,58	0,43	0,39	0,17	0,18	0,18	0,15	0,25	0,21	0,37	0,53

FONTE: A autora (2022).

TABELA 16 – BIAS PADRONIZADO ENTRE O COMPONENTE MERIDIONAL DO VENTO EM 200 hPa DE DADOS DO NCEP/NCAR E SIMULADOS PELOS MODELOS ESPECIFICADOS PARA O PERÍODO 1979-2014. VALORES DESTACADOS EM AMARELO REFEREM-SE A VALOR NEGATIVO DO BIAS REAL. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
ACCESS-ESM1-5	2,40	2,06	2,71	2,85	1,88	0,87	0,98	1,13	1,30	2,17	2,51	2,48
CanESM5	0,12	0,39	0,00	0,32	0,15	0,09	0,39	0,72	0,95	1,27	0,70	0,18
CESM2	1,70	1,54	1,62	1,27	0,04	0,14	0,57	0,35	0,24	0,22	1,12	1,78
CNRM-CM6-1	0,79	1,53	1,08	0,40	1,12	1,61	1,00	0,70	0,53	0,15	0,07	0,05
EC-Earth3-Veg	0,38	0,00	0,07	1,13	1,32	1,07	0,83	1,15	1,15	0,70	0,87	0,96
HadGEM3-GC31-LL	1,06	1,05	1,09	1,09	1,60	1,60	1,63	1,50	1,57	1,28	1,09	1,15
IPSL-CM6A-LR	0,16	0,41	0,65	0,98	0,56	1,24	0,95	0,88	0,74	0,84	0,38	0,15
KACE-1-0-G	0,73	0,58	0,50	1,06	1,94	1,69	1,99	1,74	1,76	1,27	0,81	0,73
MIROC6	2,09	1,92	1,60	0,36	0,81	0,25	0,08	0,19	0,58	1,38	2,04	2,27
MPI-ESM1-2-HR	0,61	0,74	1,31	0,70	0,87	1,89	1,57	1,38	1,27	0,75	0,39	0,35
MRI-ESM2-0	1,05	0,90	0,71	1,13	0,84	0,62	1,02	1,26	0,96	1,00	1,04	0,99
Ensemble Multi-modelo	0,90	0,88	0,66	0,72	0,87	0,93	0,99	1,00	0,96	0,97	0,99	0,92
Médias Mensais	0,50	0,59	0,40	0,35	0,39	0,46	0,59	0,68	0,53	0,46	0,64	0,53

FONTE: A autora (2022).

Para cada índice, foram calculadas médias anuais para cada modelo, de cada variável analisada. Por exemplo, para a precipitação, médias anuais de cada modelo foram obtidas para cada um dos três índices. Fazendo-se a média desses três índices para cada modelo, chegou-se ao valor de um índice geral por variável (IG_V), apresentado na TABELA 17, onde U refere-se ao componente zonal e V ao componente meridional do vento. Após o cálculo do índice geral de cada variável, foi computado o Índice Geral (IG) através da média dos IG_V's de cada modelo (última coluna da TABELA 17). Por meio do IG foi possível classificar os modelos de acordo com seus desempenhos ao simularem o clima presente da AS.

TABELA 17 – ÍNDICE GERAL POR VARIÁVEL PARA CADA MODELO E MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS. AS MÉDIAS NA ÚLTIMA COLUNA SÃO OS ÍNDICES GERAIS (IG).

Modelos	IG_V $prec.$	IG_V **U 850hPa**	IG_V **U 200hPa**	IG_V **V 850hPa**	IG_V **V 200hPa**	**Médias (IG)**
ACCESS-ESM1-5	1,26	0,77	1,11	1,00	1,49	1,13
CanESM5	1,21	0,80	1,34	0,93	0,90	1,04
CESM2	0,88	1,11	1,13	0,88	0,93	0,99
CNRM-CM6-1	1,15	1,79	0,79	1,01	1,01	1,15
EC-Earth3-Veg	0,83	1,01	1,22	0,95	0,88	0,98
HadGEM3-GC31-LL	1,19	0,95	0,86	1,01	1,04	1,01
IPSL-CM6A-LR	0,93	0,83	0,87	1,14	0,87	0,93
KACE-1-0-G	0,88	0,85	0,85	1,23	1,01	0,96
MIROC6	1,00	0,96	0,88	1,13	1,05	1,01
MPI-ESM1-2-HR	0,92	1,27	0,95	1,01	1,10	1,05
MRI-ESM2-0	1,03	1,05	1,33	0,98	0,99	1,08
Ensemble Multi-modelo	0,71	0,60	0,65	0,72	0,73	0,68

FONTE: A autora (2022).

Portanto, de acordo com o IG obtido das climatologias mensais, os modelos são classificados do melhor para o pior desempenho da seguinte maneira (TABELA 18):

TABELA 18 – CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS MODELOS NA REPRESENTAÇÃO DO CLIMA PRESENTE.

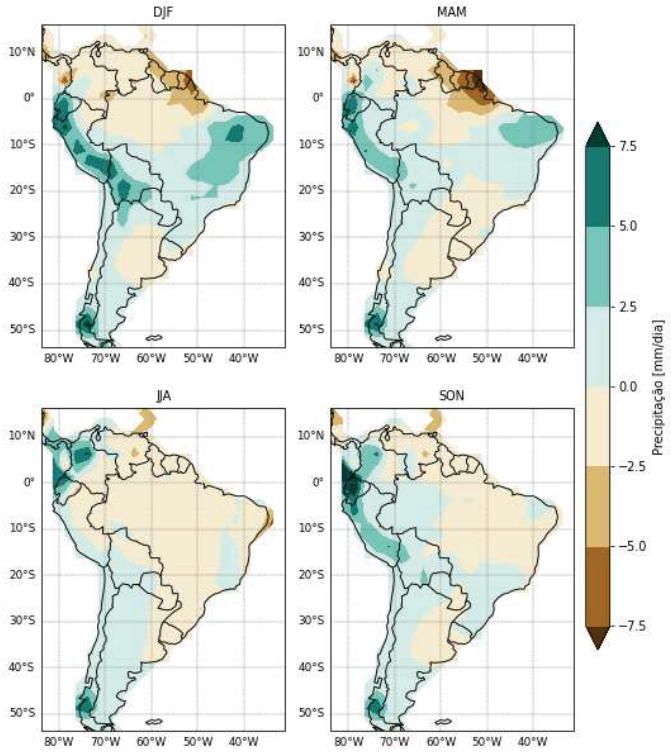
Classificação	Modelo
1°	Ensemble Multi-modelo
2°	IPSL-CM6A-LR
3°	KACE-1-0-G
4°	EC-Earth3-Veg
5°	CESM2
6°	MIROC6
7°	HadGEM3-GC31-LL
8°	CanESM5
9°	MPI-ESM1-2-HR
10°	MRI-ESM2-0
11°	ACCESS-ESM1-5
12°	CNRM-CM6-1

FONTE: A autora (2022).

O IG obtido a partir das climatologias sazonais forneceu um resultado semelhante e, por esse motivo, não será mostrado aqui. As únicas diferenças foram trocas de posição entre os modelos KACE-1-0-G e EC-Earth3-Veg, e os modelos MPI-ESM1-2-HR e MRI-ESM2-0 na classificação geral.

A FIGURA 32 mostra as diferenças entre a climatologia de precipitação obtida pela média do conjunto de todos os modelos (*Ensemble* multi-modelo) e a climatologia do GPCC em cada estação. É possível notar que a média dos modelos superestima a precipitação no Nordeste do Brasil e nos Andes no verão e outono austral, bem como no Sul do Chile em todas as estações. Por outro lado, também para o verão e outono austral, o ensemble subestima a precipitação no norte da AS. Contudo, mostra resultados muito próximos do observado de maneira geral.

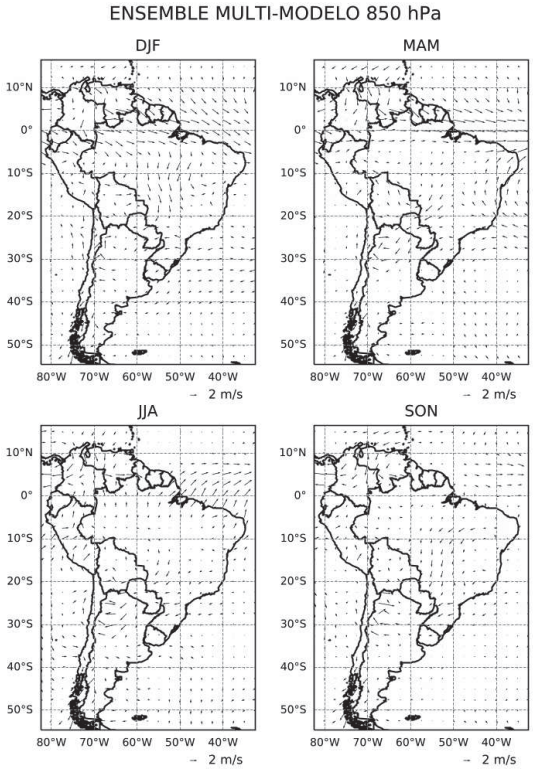
FIGURA 32 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO DA MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS E DE DADOS OBSERVADOS (GPCC).



FONTE: A autora (2022).

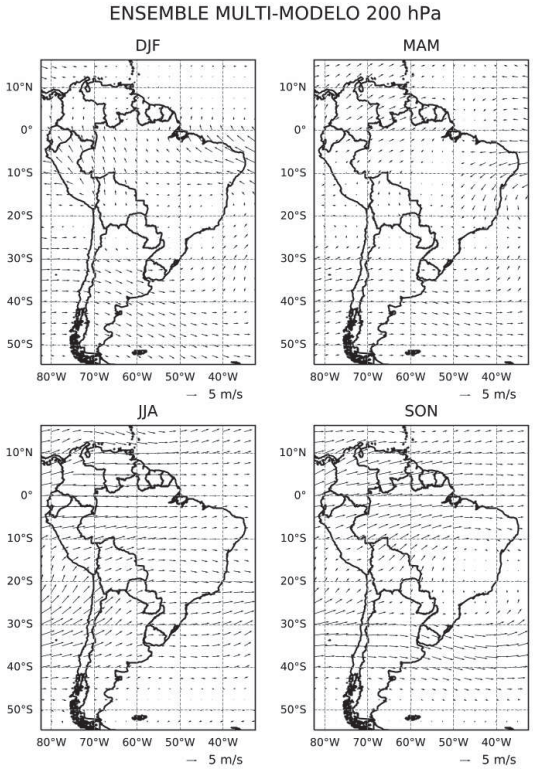
As FIGURAS 33 e 34 mostram as diferenças entre as climatologias da circulação da média do conjunto de modelos e da reanálise em 850 hPa e 200 hPa, respectivamente. Embora a velocidade do vento simulada seja próxima à observada da reanálise (especialmente durante o inverno em baixos níveis), há diferenças que são coerentes com diferenças observadas na precipitação. Por exemplo, na FIGURA 33, para DJF, a circulação em 850 hPa do conjunto dos modelos tem um componente maior de noroeste para o centro-leste da AS, ocasionando convergência no centro-leste, o que é consistente com mais chuva nesta região nos modelos (FIGURA 32). A convergência maior na Zona de Convergência Intertropical junto ao Nordeste do Brasil em DJF e MAM também é coerente com maior chuva nesta região.

FIGURA 33 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM 850 hPa DA MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS E DE DADOS DA REANÁLISE.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 34 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM 200 hPa DA MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS E DE DADOS DA REANÁLISE.

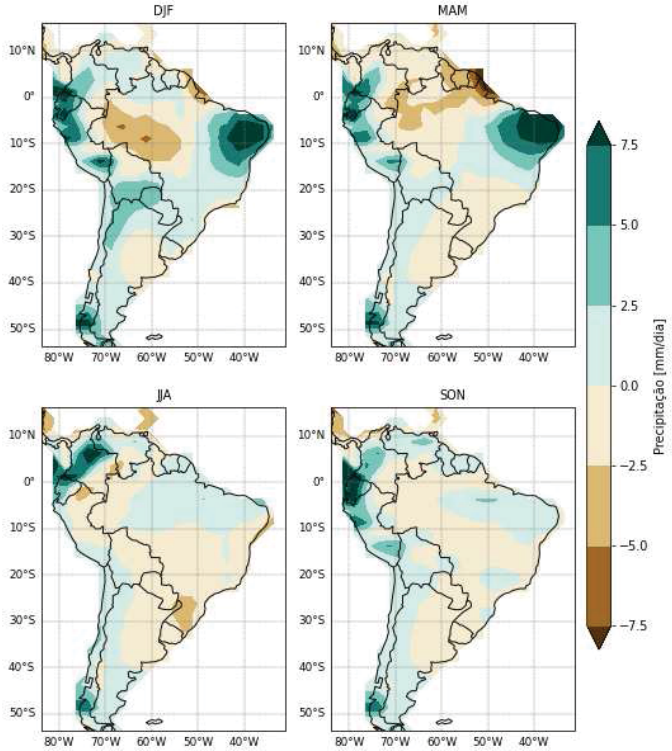


FONTE: A autora (2022).

Após a média do conjunto de modelos, o modelo que apresentou o melhor desempenho na simulação do clima presente foi o IPSL-CM6A-LR, especialmente na reprodução da circulação em altos níveis (TABELA 17). Por isso, as diferenças entre as climatologias desse modelo e as climatologias observadas e de reanálise são apresentadas nas FIGURAS 35, 36 e 37.

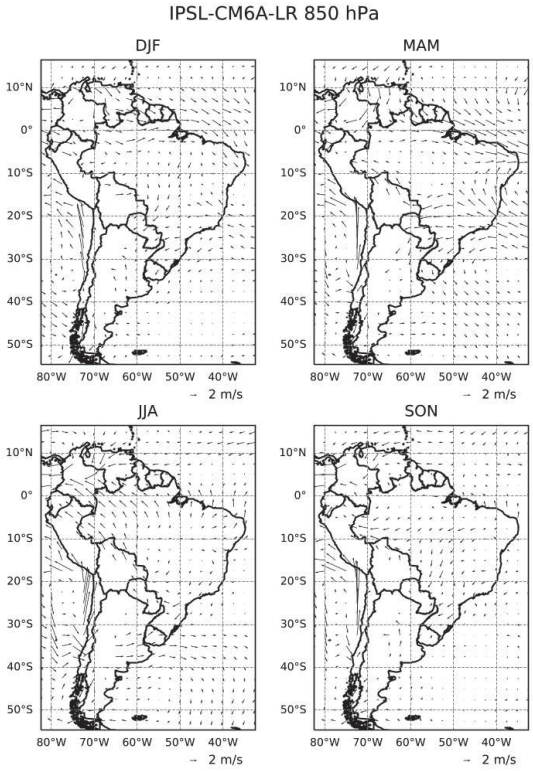
Verifica-se que o IPSL-CM6A-LR, além de superestimar a precipitação nos Andes, a aumenta no Nordeste do Brasil no verão e outono austral e a subestima na região Amazônica. As diferenças nos ventos em baixos níveis, especialmente a maior divergência na Amazônia e a maior convergência do vento no Nordeste em DJF e MAM, ajudam a explicar as diferenças na precipitação. No entanto, para a circulação em baixos níveis, as maiores diferenças na velocidade do vento ocorrem durante o inverno na região Amazônica, enquanto que para altos níveis, as maiores diferenças aparecem no inverno e na primavera, sendo essas da ordem de 5 m/s.

FIGURA 35 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO DO MODELO IPSL-CM6A-LR E DE DADOS OBSERVADOS (GPCC).



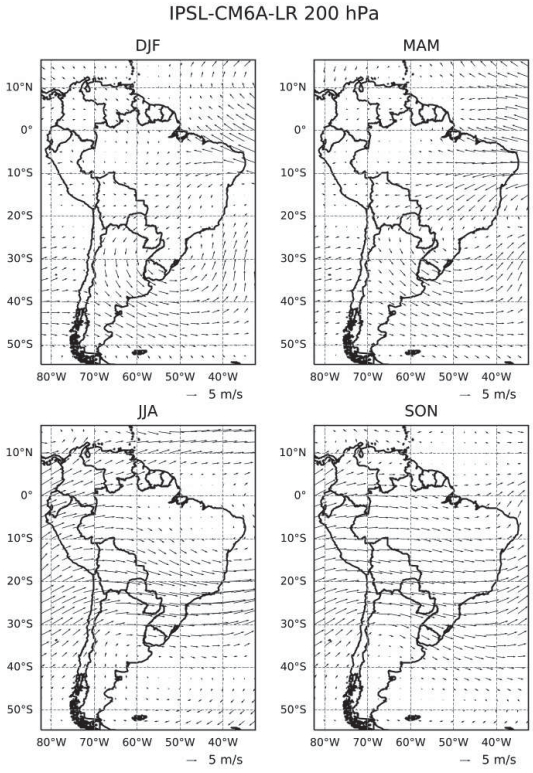
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 36 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM 850 hPa DO MODELO IPSL-CM6A-LR E DE DADOS DA REANÁLISE.



FONTE: A autora (2022).

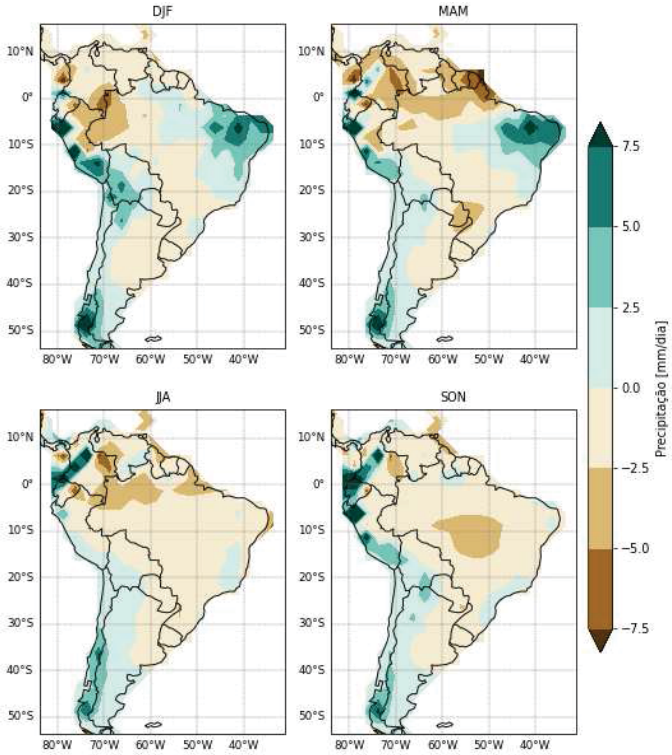
FIGURA 37 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM 200 hPa DO MODELO IPSL-CM6A-LR E DE DADOS DA REANÁLISE.



FONTE: A autora (2022).

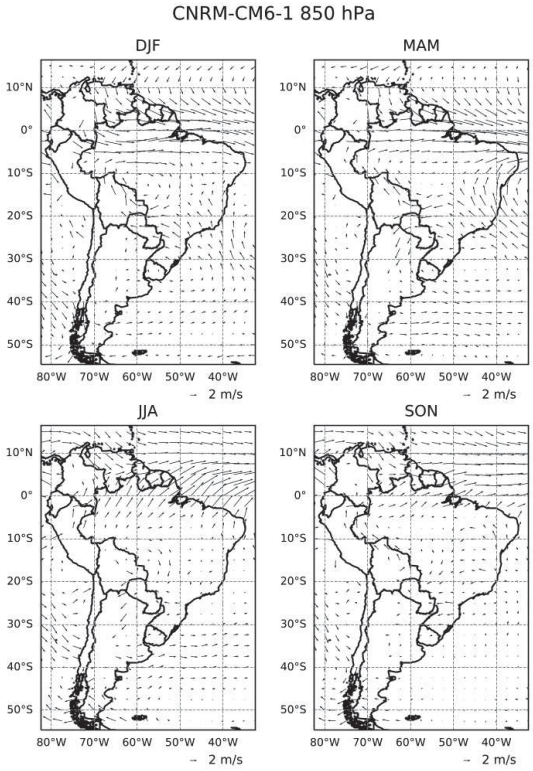
O modelo CNRM-CM6-1 foi o que apresentou o pior desempenho, entre o conjunto analisado, na simulação do clima presente. Por esse motivo, as diferenças entre suas climatologias e aquelas apresentadas por dados observados e de reanálise são mostradas nas FIGURAS 38, 39 e 40. Nota-se que, além dos Andes, o modelo superestima a precipitação no Nordeste do Brasil durante o verão e o outono austral. Além disso, também a superestima no sul do Chile em todas as estações. O modelo subestima a precipitação no norte da AS (no outono e no inverno) e no centro do Brasil na primavera austral. Ao mesmo tempo, o CNRM-CM6-1 possui baixo desempenho ao simular a velocidade do vento em todas as estações, principalmente na região tropical, e especialmente o componente zonal em baixos níveis (TABELA 17). De maneira geral, subestima os ventos alíseos, o que explica a subestimação da chuva na faixa equatorial, com exceção do Nordeste, onde, devido ao aumento da convergência na Zona de Convergência Intertropical, superestima a precipitação.

FIGURA 38 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO DO MODELO CNRM-CM6-1 E DOS DADOS OBSERVADOS (GPCC).



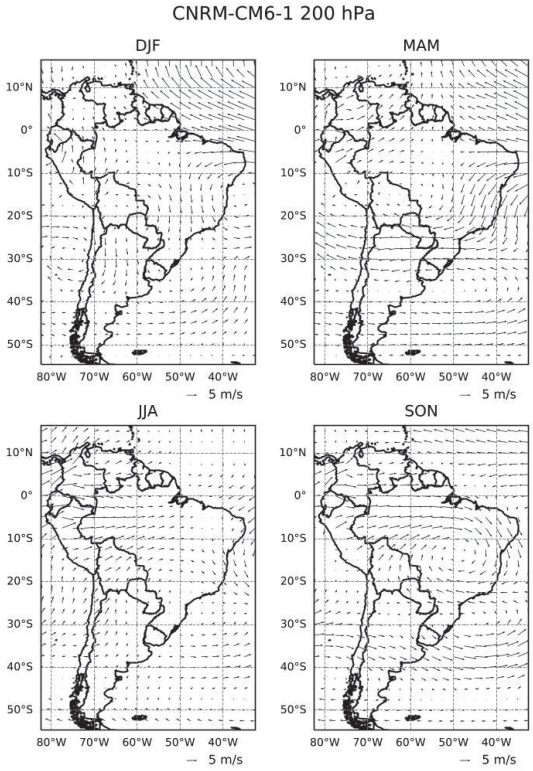
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 39 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM 850 hPa DO MODELO CNRM-CM6-1 E DE DADOS DA REANÁLISE.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 40 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM 200 hPa DO MODELO CNRM-CM6-1 E DE DADOS DA REANÁLISE.



FONTE: A autora (2022).

Os desempenhos dos modelos ao simularem a precipitação no clima presente foram avaliados com base na comparação entre as climatologias produzidas por eles e as resultantes dos dados observados do GPCC. Contudo, para esse trabalho, dados de estações pluviométricas foram utilizados tanto no cálculo de climatologias, quanto na análise da simulação dos modos de variabilidade de precipitação. Dessa forma, a fim de verificar o quão próximos são os dados do GPCC e os dados de estações, os 3 índices utilizados na avaliação de desempenho dos modelos foram calculados também entre esses dois conjuntos de dados, porém sem serem padronizados. As TABELAS 19 e 20 apresentam esses resultados a nível mensal e sazonal, respectivamente.

TABELA 19 – ÍNDICES MENSAIS OBTIDOS DA COMPARAÇÃO DE DADOS DO GPCC COM DADOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS. O CÁLCULO DO BIAS É FEITO COMO (DADOS DE ESTAÇÕES - GPCC).

Índice	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Médias
Correl. Esp.	0,90	0,93	0,94	0,94	0,96	0,96	0,95	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,94
RMSE	1,60	1,26	1,25	1,17	1,10	1,04	1,08	0,89	0,81	1,10	1,04	1,24	1,13
Bias	-0,07	-0,14	-0,16	-0,06	-0,15	-0,22	-0,22	-0,17	-0,15	-0,07	-0,17	-0,19	-0,15

FONTE: A autora (2022).

TABELA 20 – ÍNDICES SAZONAIS OBTIDOS DA COMPARAÇÃO DE DADOS DO GPCC COM DADOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS.

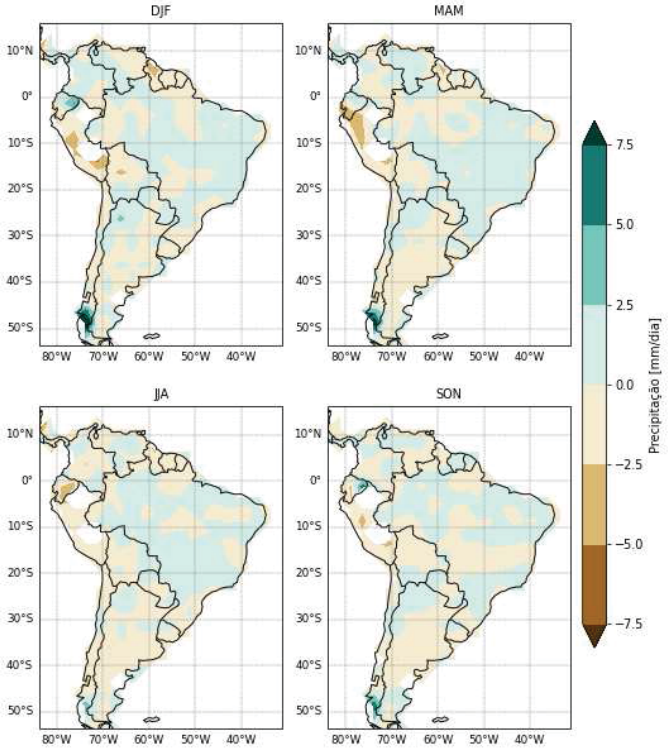
Índice	DJF	MAM	JJA	SON	Médias
Correl. Esp.	0,92	0,94	0,96	0,94	0,94
RMSE	1,33	1,08	0,95	0,94	1,07
Bias	-0,13	-0,13	-0,21	-0,12	-0,15

FONTE: A autora (2022).

A partir das médias anuais apresentadas nas TABELAS 19 e 20, é possível verificar que os dados do GPCC e os dados de estações são fortemente correlacionados. Além disso, mesmo o maior valor do RMSE apresentado (1,6 em janeiro) está abaixo do menor valor calculado entre os modelos e os dados do GPCC. Através do *bias*, é possível verificar que em todos os meses e estações os dados do GPCC superestimam os dados de estações.

As poucas diferenças existentes entre as climatologias dos dois conjuntos de dados são mostradas na FIGURA 41.

FIGURA 41 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO USANDO DADOS DE ESTAÇÕES E DADOS DO GPCC.



FONTE: A autora (2022).

4.4 MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO

Modos de variabilidade de precipitação da AS foram calculados para o período de 1979 a 2014 para os dados observados do GPCC e de estações, e também para cada modelo. Isso foi feito a fim de determinar os principais modos de variabilidade interanual que ocorrem na precipitação de monção.

Segundo Grimm e Zilli (2009), os principais modos de variabilidade da primavera e do verão austral são modos tipo dipolo com anomalias inversas entre o centro-leste da AS (CESA) e sudeste da AS (SESA). A polaridade dessas anomalias tende a se inverter da primavera para o verão por conta de mudanças de circulação em baixos níveis que surgem em CESA (que inclui o Sudeste do Brasil) devido às anomalias de chuva na primavera. A inversão de anomalias de uma estação para a outra acontece especialmente em anos El Niño (GRIMM 2003), mas também pode ocorrer em outros anos em que há fortes anomalias de primavera em CESA, por conta

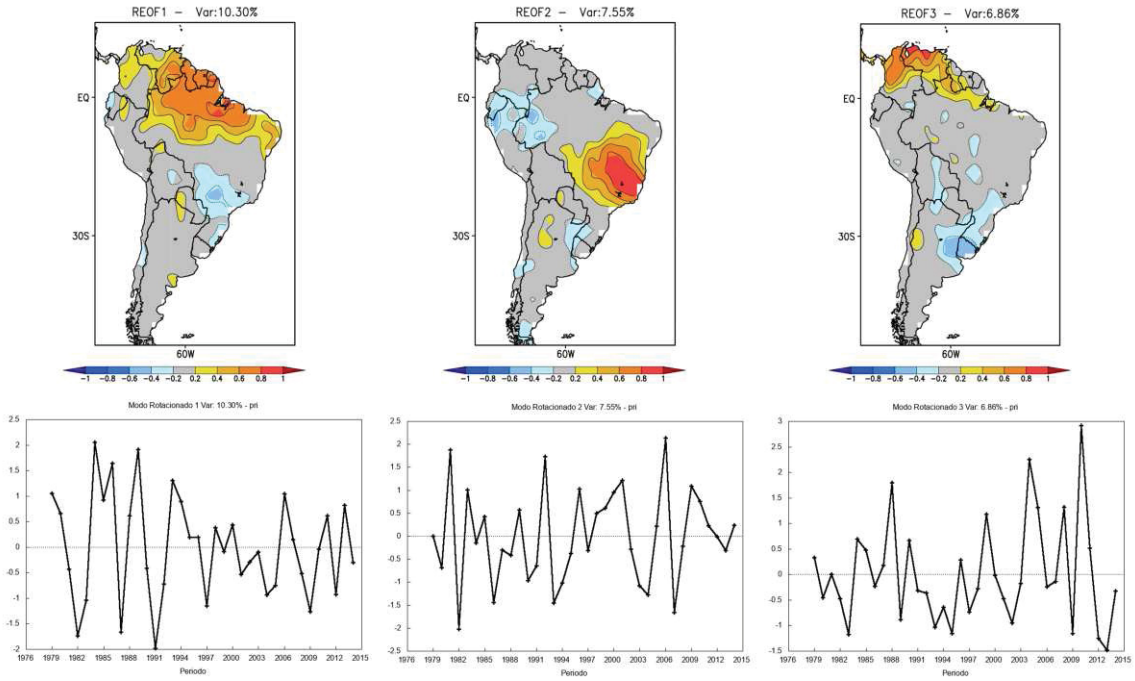
de influências regionais ligadas à topografia, à umidade do solo e temperatura junto à superfície (GRIMM et al., 2007). Para verificar a evolução destas anomalias da primavera para o verão, foram obtidos modos de variabilidade da primavera e do verão austral.

A presente seção possui como foco a análise da simulação dos modos tipo dipolo pelos modelos e a verificação da correlação inversa entre os modos dipolo da primavera e do verão. Para dados observados, os modos também foram calculados para os meses de início (novembro) e pico (janeiro) da estação chuvosa de monção, pois são os meses mais representativos das características da primavera e verão, respectivamente. Contudo, a relação da precipitação com a TSM e, portanto, com ENOS no clima presente, é apresentada no Capítulo 7.

As FIGURAS 42 e 43 mostram a distribuição espacial (*Factor Loadings*) e a evolução temporal (*Factor Scores*) dos 3 primeiros modos da primavera e do verão, respectivamente, utilizando os dados do GPCC sem tendência linear. Para a interpretação dos resultados, a distribuição espacial deve ser olhada juntamente com o FS associado. Assim, regiões com FL positivos indicam anomalias de precipitação positivas nos anos em que os FS são maiores que zero. Da mesma forma, regiões com FL negativos indicam anomalias positivas nos anos em que os FS são negativos. Por outro lado, anomalias de precipitação negativas acontecem em regiões com FS e FL de sinais opostos.

O primeiro modo rotacionado do GPCC da primavera mostra anomalias opostas no nordeste da AS e sudeste do Brasil. Já no primeiro modo do verão, essas anomalias aparecem deslocadas mais para o norte e sudeste da AS, respectivamente. Embora mostre um terceiro polo sobre o Noroeste da AS, o segundo modo rotacionado (REOF2) da primavera e do verão exibe anomalias opostas no centro-leste da AS (CESA) e sudeste da AS (SESA), formando um padrão tipo dipolo, apesar de apresentar o sinal da anomalia bem fraco em SESA. A anomalia em CESA se estende até o Nordeste do Brasil durante o verão. Já o terceiro modo da primavera e do verão não mostram padrões semelhantes.

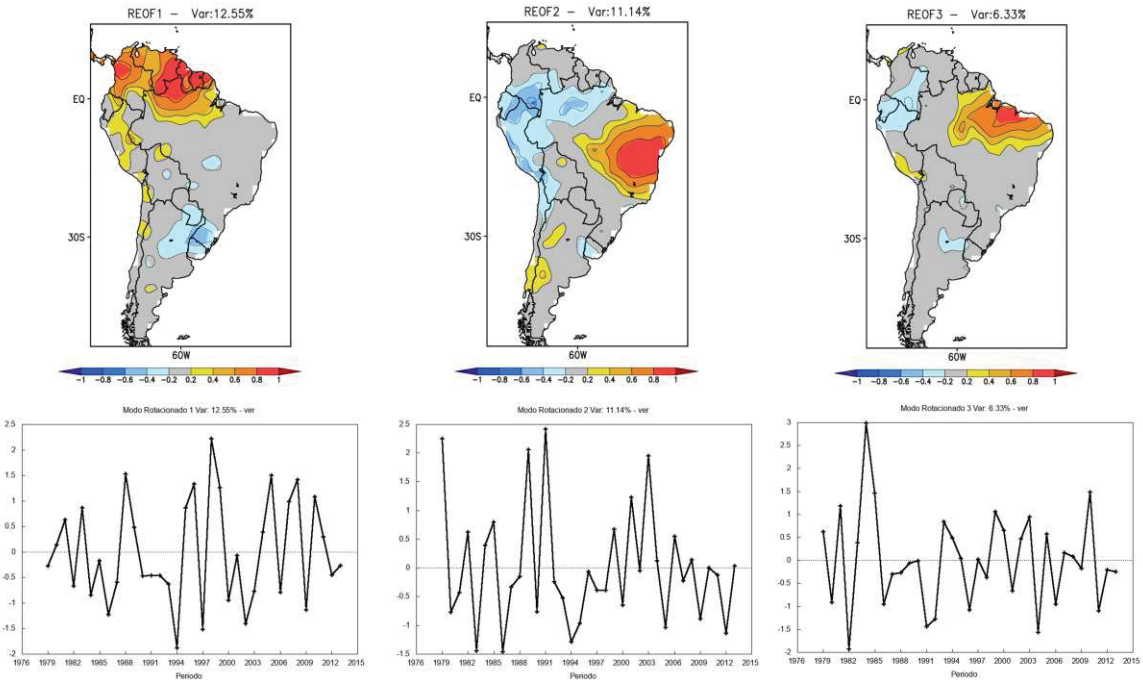
FIGURA 42 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NA PRIMAVERA AUSTRAL PARA DADOS DO GPCC (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 43 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NO VERÃO AUSTRAL PARA DADOS DO GPCC (1979-2014).

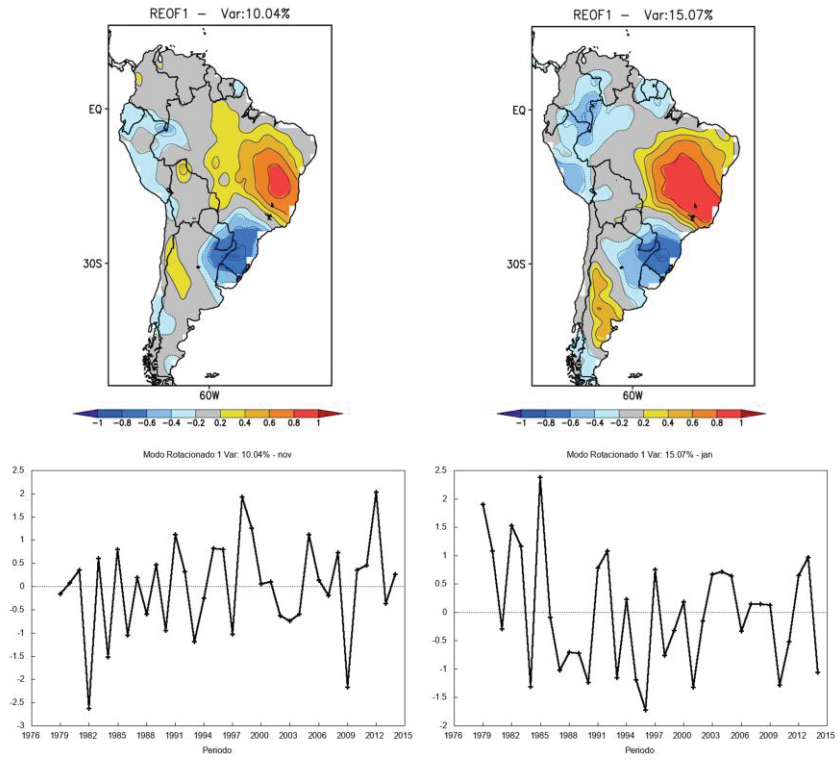


FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

Para os meses novembro e janeiro, os modos tipo dipolo resultantes dos dados do GPCC são os primeiros modos rotacionados (REOF1), exibindo um sinal bem mais forte das anomalias em SESA (FIGURA 44).

FIGURA 44 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS MODOS DIPOLO DE NOVEMBRO E JANEIRO PARA DADOS DO GPCC (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).

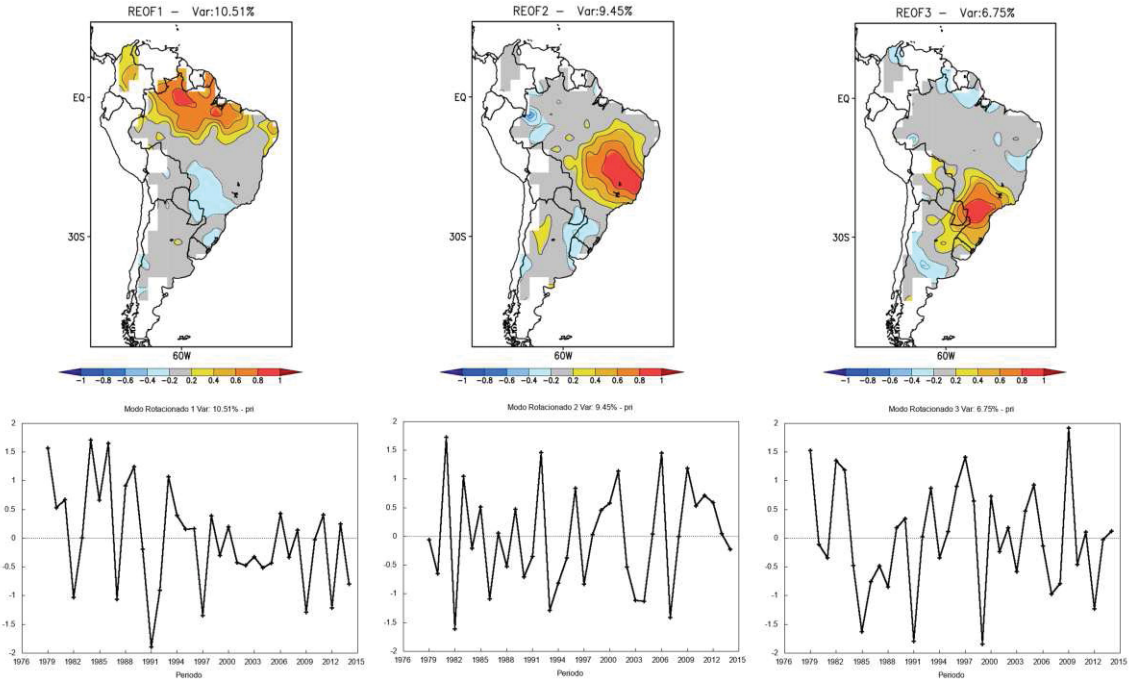
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

A correlação entre os componentes principais do modo dipolo da primavera (REOF2) e do verão (REOF2), assim como de novembro e janeiro, é apresentada na TABELA 21.

Os coeficientes de correlação calculados entre a primavera e o verão, e também entre novembro e janeiro para o período 1979-2014, não apresentam valores estatisticamente significativos (significância menor ou igual a 5%). Além disso, mesmo entre novembro e janeiro, quando os sinais das anomalias são mais evidentes, a correlação entre os modos é muito pequena. Contudo, o coeficiente de correlação negativo entre os modos de novembro e janeiro mostram a tendência à inversão de anomalias do início para o pico da estação de monção, mesmo que essa inversão não fosse significativa entre a primavera e o verão.

Uma análise análoga foi realizada para os dados observados de estações pluviométricas para o período 1979-2014. As FIGURAS 45 e 46 apresentam os 3 primeiros modos de variabilidade da primavera e do verão, respectivamente, utilizando os dados de estações sem tendência linear.

FIGURA 45 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NA PRIMAVERA PARA DADOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS (1979-2014).

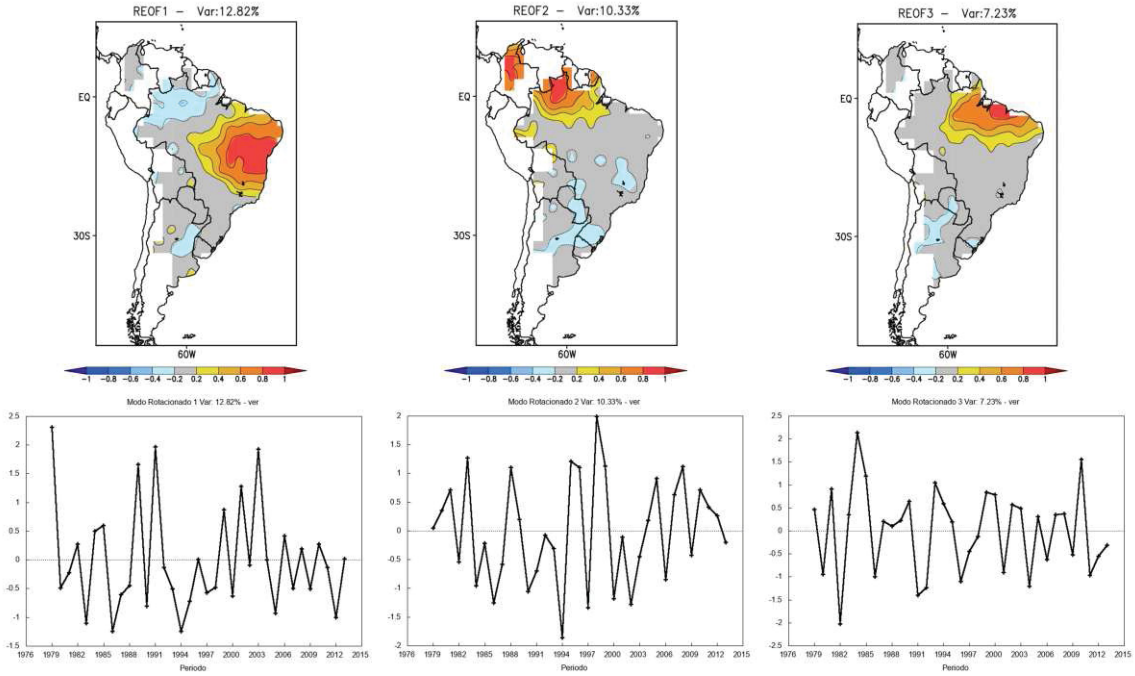


FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0. FL em pontos de grade contendo menos que 75% dos dados não são mostrados.

Os dois primeiros modos da primavera obtidos dos dados de estações são bastante semelhantes aos dois primeiros modos da primavera apresentados pelos dados do GPCC, embora nada possa ser dito sobre regiões em que há dados faltantes. Contudo, a anomalia em SESA do modo dipolo (REOF2) da primavera, atinge uma área maior para os dados de estações. Já o terceiro modo da primavera, se assemelha apenas ao quinto modo rotacionado dos dados do GPCC (não mostrado). Para o verão, o modo tipo dipolo dos dados de estações é o primeiro modo rotacionado (REOF1), apesar de mostrar uma anomalia muito fraca em SESA. Por sua vez, o segundo modo do verão (REOF2) possui o padrão próximo ao REOF1 do verão para os dados do GPCC, enquanto o terceiro modo (REOF3) se assemelha ao REOF3 do verão para o GPCC.

FIGURA 46 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NO VERÃO PARA DADOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS (1979-2014).



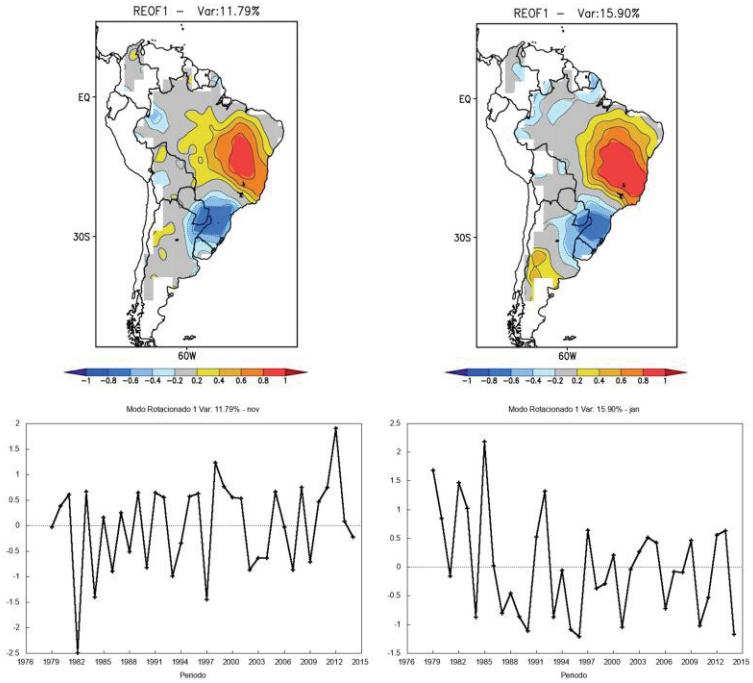
FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0. FL em pontos de grade contendo menos que 75% dos dados não são mostrados.

A FIGURA 47 apresenta os modos tipo dipolo obtidos dos dados de estações para os meses de novembro e janeiro. Assim como para o GPCC, esses modos apresentam sinais de anomalias mais fortes em SESA.

Os coeficientes de correlação calculados entre os modos dipolo da primavera e do verão, e entre os modos dipolo de novembro e janeiro (TABELA 21) para os dados observados de estações do período 1979-2014, mostram que as correlações entre os modos são muito pequenas e não significativas. Assim como no caso do GPCC, os sinais dos coeficientes indicam não haver inversões de anomalias entre a primavera e o verão, mas sim entre novembro e janeiro.

FIGURA 47 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS MODOS DIPOLO DE NOVEMBRO E JANEIRO PARA DADOS DE ESTAÇÕES (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0. FL em pontos de grade contendo menos que 75% dos dados não são mostrados.

A fim de verificar a relação da inversão de anomalias da primavera para o verão e/ou de novembro para janeiro com o período de estudo, as análises envolvendo os modos tipo dipolo foram feitas também para outros dois períodos: 1960-2000 e 1960-2014.

As FIGURAS 48 e 49 apresentam os modos tipo dipolo da primavera, do verão, de novembro e de janeiro para dados observados do GPCC e para os dados de estações, respectivamente, para o período de 1960-2000. Para os dados do GPCC, os modos dipolo da primavera e do verão são o segundo modo rotacionado (FIGURA 48). No entanto, assim como para Grimm e Zilli (2009), para os dados de estações os modos dipolo da primavera e do verão são os primeiros modos rotacionados, bem como em novembro e janeiro (FIGURA 49).

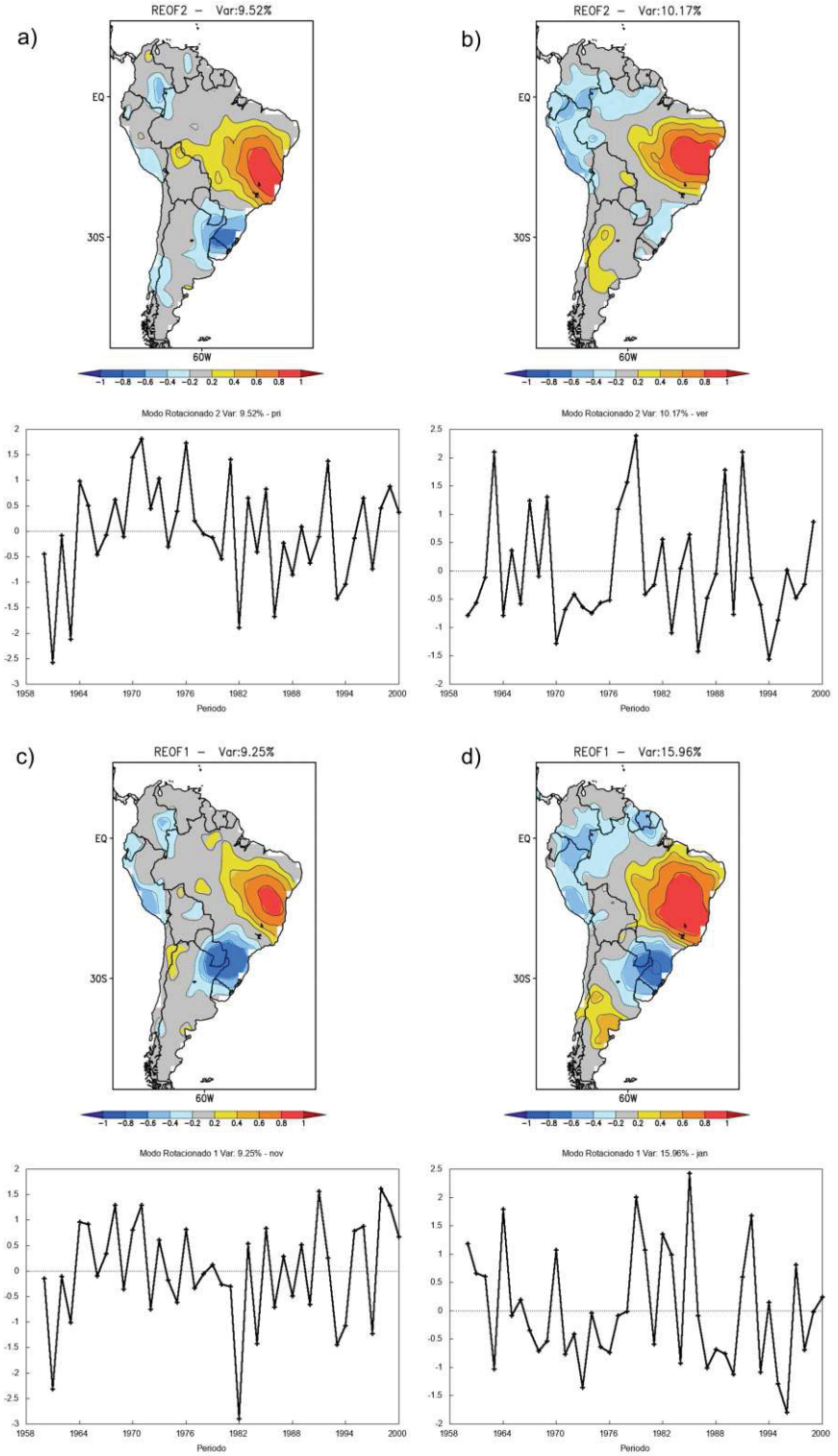
Os coeficientes de correlação apresentados na TABELA 21 mostram que, para 1960-2000, o modo dipolo da primavera é inversamente correlacionado com o modo do verão, tanto para os dados de estações como para os dados do GPCC, embora não de forma significativa. Por outro lado, neste período o modo dipolo de novembro é inversamente correlacionado com o modo de janeiro em ambos os

conjuntos de dados, com nível de significância de 6% para dados de estação e 13% para dados do GPCC. No entanto, diferentemente de Grimm e Zilli (2009), as correlações entre os modos de primavera e verão não são estatisticamente significativas. Em uma análise anterior feita com dados de estações sem retirar a tendência linear, o coeficiente de correlação entre os modos dipolo de novembro e janeiro foi -0,30, com significância de -0,04. Esse valor encontra-se próximo ao alcançado pelas autoras (-0,33). Apesar disso, para a primavera e o verão, o valor calculado em dados com tendência não foi significativo. Uma possível explicação para as diferenças apresentadas é a presença de quantidade maior de dados de estações faltantes nas séries aqui utilizadas.

As FIGURAS 50 e 51 apresentam os modos dipolo da primavera, do verão, de novembro e de janeiro para dados observados do GPCC e para os dados de estações, respectivamente, para o período de 1960-2014. Para os dados do GPCC, os modos dipolo da primavera e do verão são os segundos modos rotacionados (REOF2), enquanto para os dados de estações, são os primeiros modos (REOF1). Para novembro e janeiro, os dados de estações mostram os modos dipolo como os primeiros modos rotacionados (REOF1). Já para os dados do GPCC, o modo dipolo de novembro é o REOF2.

De acordo com os coeficientes de correlação calculados (TABELA 21), os padrões de anomalias se invertem entre a primavera e o verão e entre novembro e janeiro para dados do GPCC e para os dados de estações. Contudo, apenas a correlação entre os modos de novembro e janeiro de dados de estações é significativa ao nível de 5% de significância, enquanto para os dados do GPCC o nível de significância é 8%, confirmando a inversão de anomalias em CESA e em SESA do início para o auge da estação chuvosa de monção.

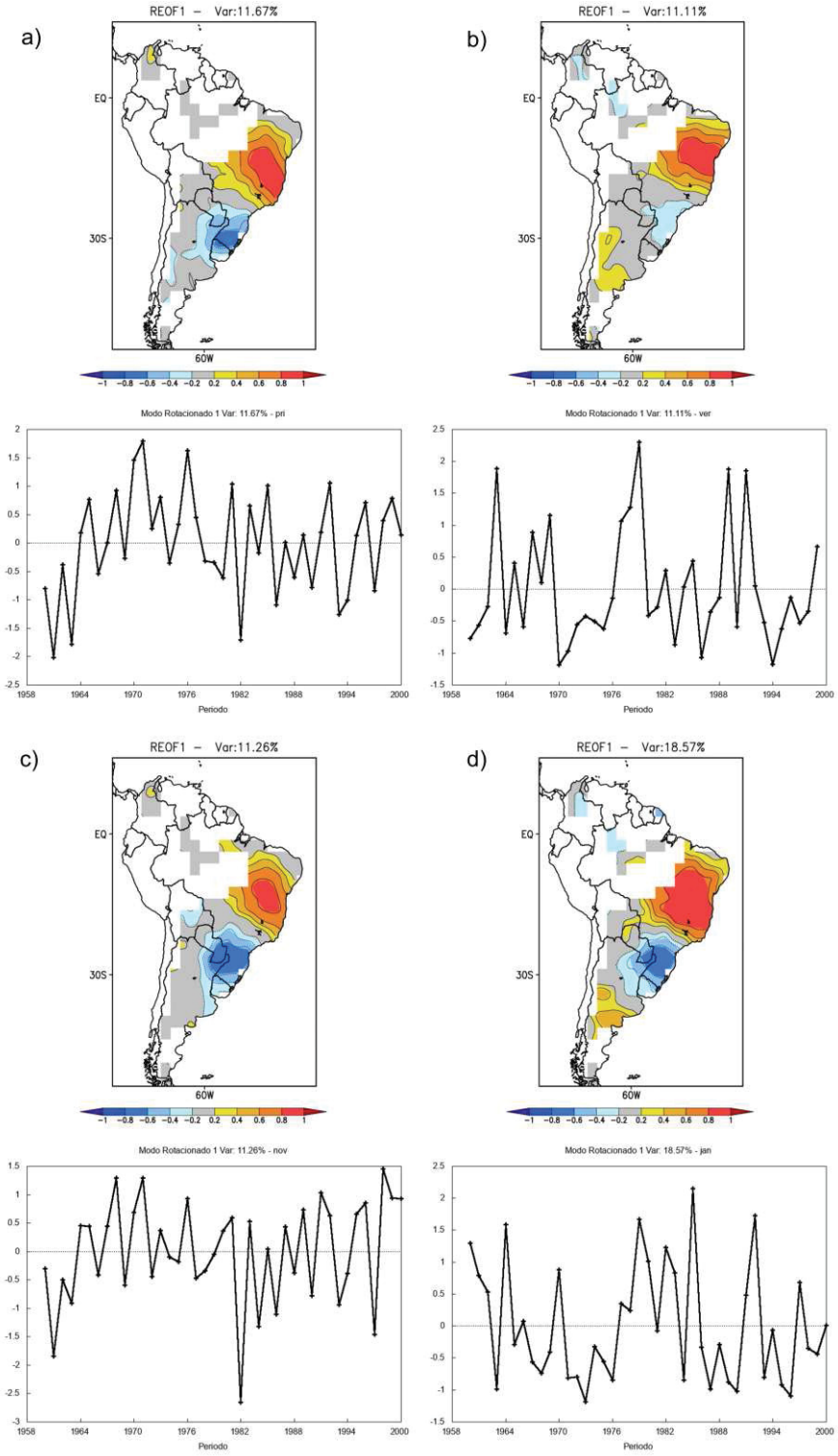
FIGURA 48 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS MODOS DIPOLO DA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO, D) JANEIRO, DE DADOS DO GPCC DE 1960 A 2000.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

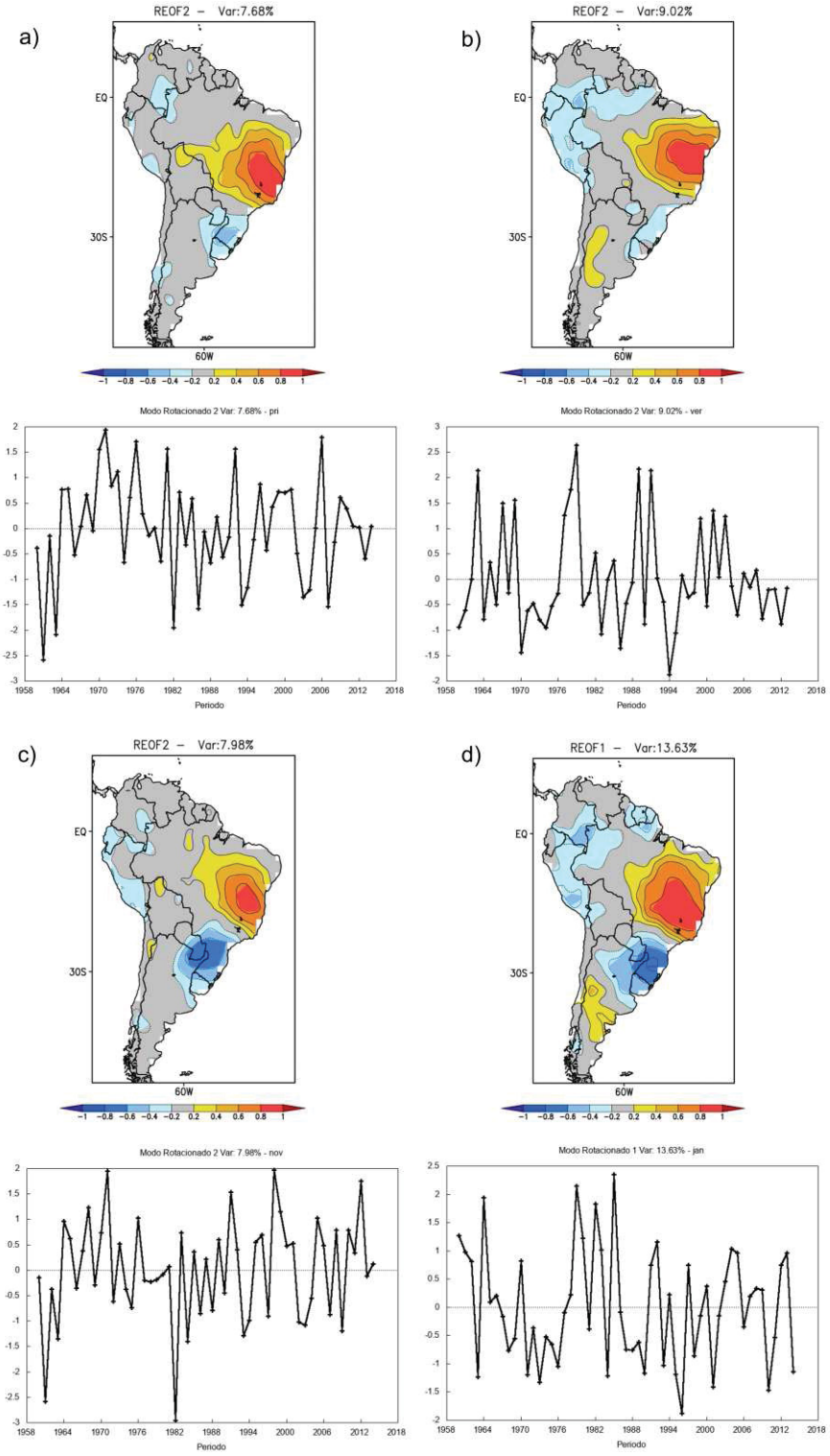
FIGURA 49 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS MODOS DIPOLO DA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO, D) JANEIRO, DE DADOS DE ESTAÇÕES DE 1960 A 2000.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0. FL em pontos de grade contendo menos que 75% dos dados não são mostrados.

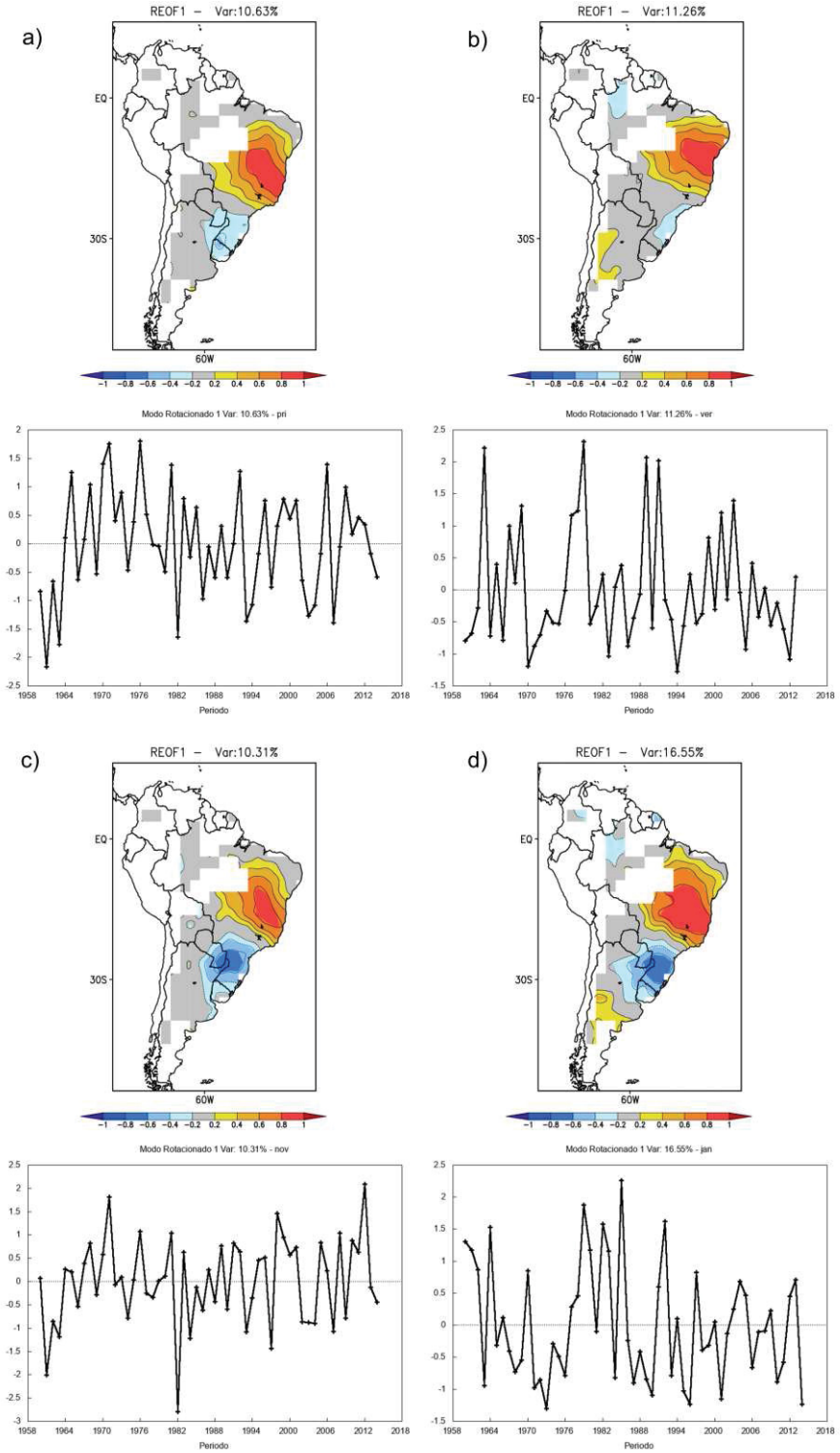
FIGURA 50 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS MODOS DIPOLO DA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO, D) JANEIRO, DE DADOS DO GPCC DE 1960 A 2014.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 51 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS MODOS DIPOLO DA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO, D) JANEIRO, DE DADOS DE ESTAÇÕES DE 1960 A 2014.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0. FL em pontos de grade contendo menos que 75% dos dados não são mostrados.

TABELA 21 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE COMPONENTES PRINCIPAIS DOS MODOS ROTACIONADOS APRESENTADOS ANTERIORMENTE E SIGNIFICÂNCIA ASSOCIADA.

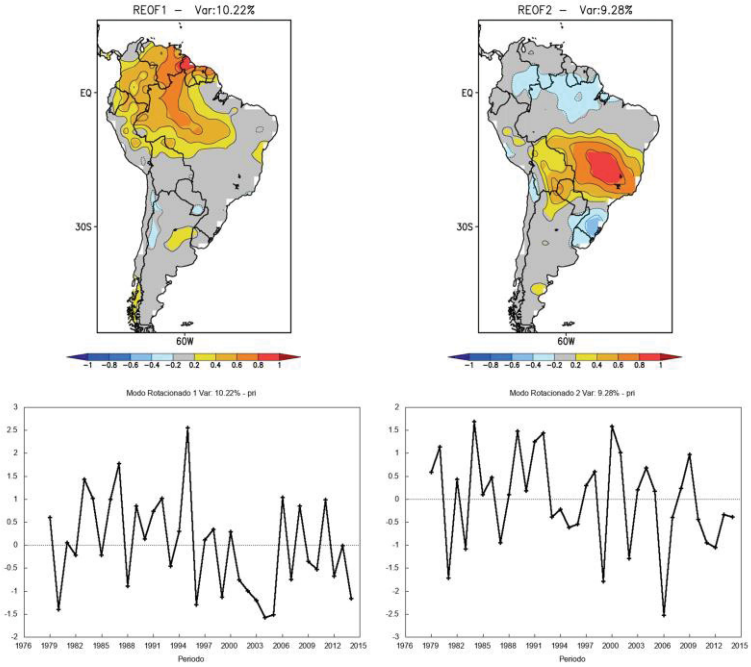
Dados	Modo pri	Modo ver	Correl.	Signif.	Modo jan	Modo nov	Correl.	Signif.
Dados de estações (1960-2014)	REOF1	REOF1	-0,03	-0,41	REOF1	REOF1	-0,22	-0,05
Dados de estações (1960-2000)	REOF1	REOF1	-0,06	-0,36	REOF1	REOF1	-0,25	-0,06
Dados de estações (1979-2014)	REOF2	REOF1	0,08	0,32	REOF1	REOF1	-0,16	-0,18
GPCC (1960-2014)	REOF2	REOF2	-0,06	-0,33	REOF1	REOF2	-0,19	-0,08
GPCC (1960-2000)	REOF2	REOF2	-0,08	-0,31	REOF1	REOF1	-0,18	-0,13
GPCC (1979-2014)	REOF2	REOF2	0,03	0,43	REOF1	REOF1	-0,09	-0,30

FONTE: A autora (2022).

Os modos de variabilidade também foram obtidos para todos os modelos do CMIP6 selecionados neste estudo. No entanto, a maioria dos modelos não foi capaz de reproduzir modos tipo dipolo com anomalias de sinal oposto em CESA e em SESA na primavera e no verão austral. Os modelos CESM2 e HadGEM3-GC31-LL simulam o modo dipolo apenas na primavera, enquanto os modelos ACCESS-ESM1-5, CanESM5, CNRM-CM6-1, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR e MRI-ESM2-0, mostram esse modo apenas no verão. Por esse motivo, os modos de variabilidade não foram obtidos para a média do conjunto de todos os modelos.

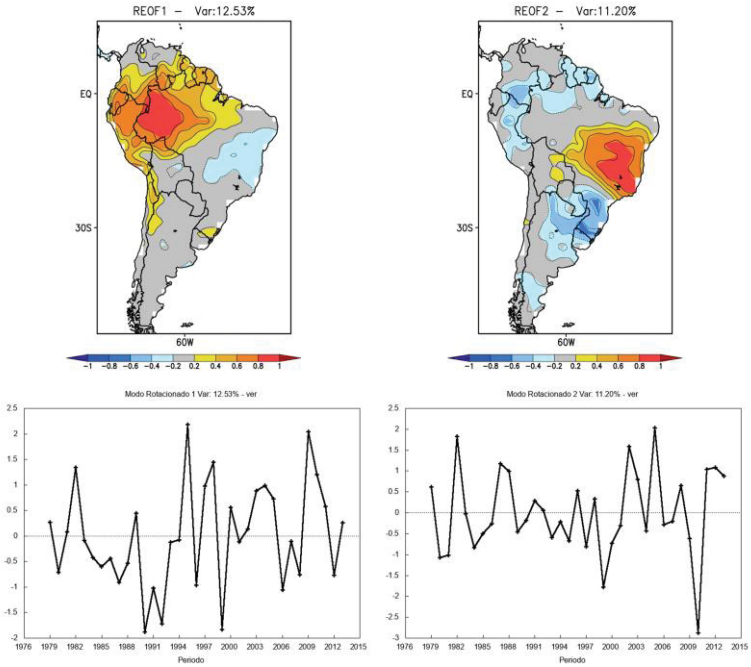
Para o modelo EC-Earth3-Veg, com melhor desempenho na simulação da precipitação no clima presente, o modo dipolo da primavera aparece como o segundo modo rotacionado (REOF2), com anomalias opostas em CESA e SESA (FIGURA 52). Já o primeiro modo da primavera exibe anomalia de precipitação no noroeste da AS e na região Amazônica. Para o verão (FIGURA 53), o modelo representa no primeiro modo anomalias tipo dipolo no noroeste da AS e em CESA, enquanto o segundo modo rotacionado (REOF2) apresenta anomalias em SESA e em CESA. Mesmo apresentando modos tipo dipolo na primavera e no verão, o cálculo do coeficiente de correlação entre os seus FS (TABELA 22) revela que a inversão das anomalias entre a primavera e o verão não é significativa.

FIGURA 52 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS DOIS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NA PRIMAVERA PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

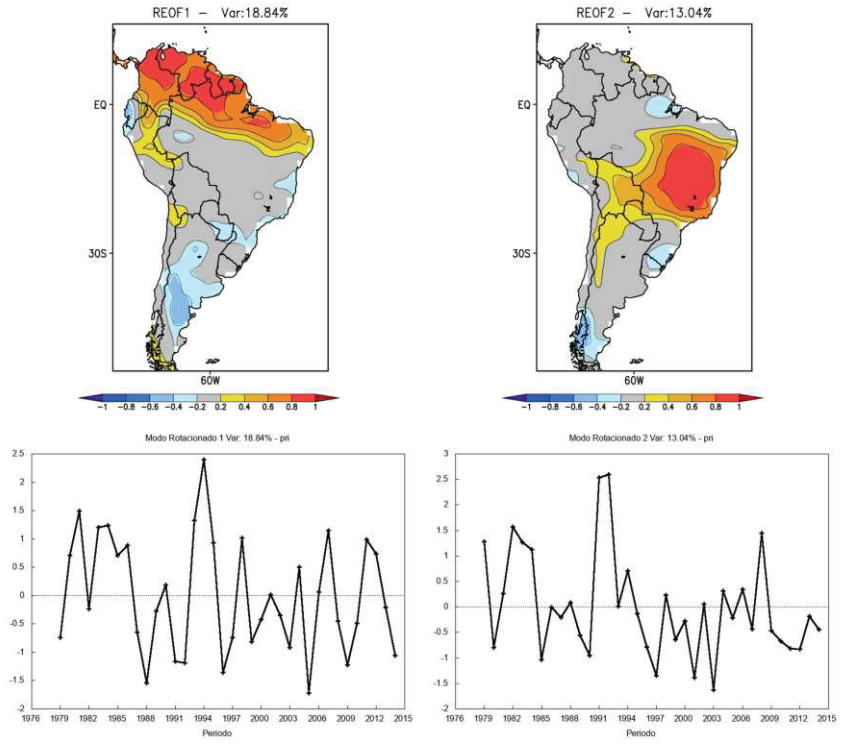
FIGURA 53 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS DOIS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NO VERÃO PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

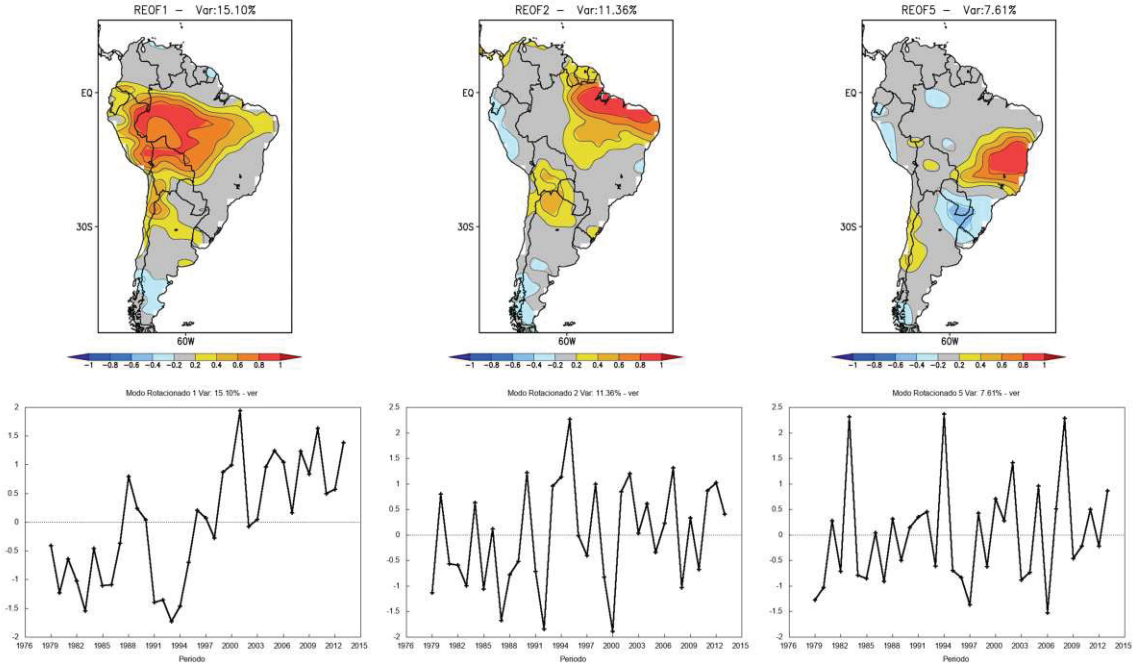
Para o modelo IPSL-CM6A-LR, de melhor desempenho ao simular a climatologia presente, o modo dipolo da primavera é o segundo modo (REOF2), com fortes anomalias em CESA (FIGURA 54). Já o primeiro modo da primavera, mostra anomalias no norte e nordeste da AS e anomalias de sinal oposto na Argentina. Para o verão, o modelo simula o padrão tipo dipolo apenas no quinto modo rotacionado (REOF5) (FIGURA 55). Ao contrário do EC-Earth3-Veg, o IPSL-CM6A-LR exibe correlação significativa entre os modos dipolo da primavera e do verão (TABELA 22). No entanto, a correlação é positiva, indicando que para esse período não há inversões de anomalias de uma estação para a outra.

FIGURA 54 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS DOIS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NA PRIMAVERA PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 55 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS DOIS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NO VERÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR (1979-2014).



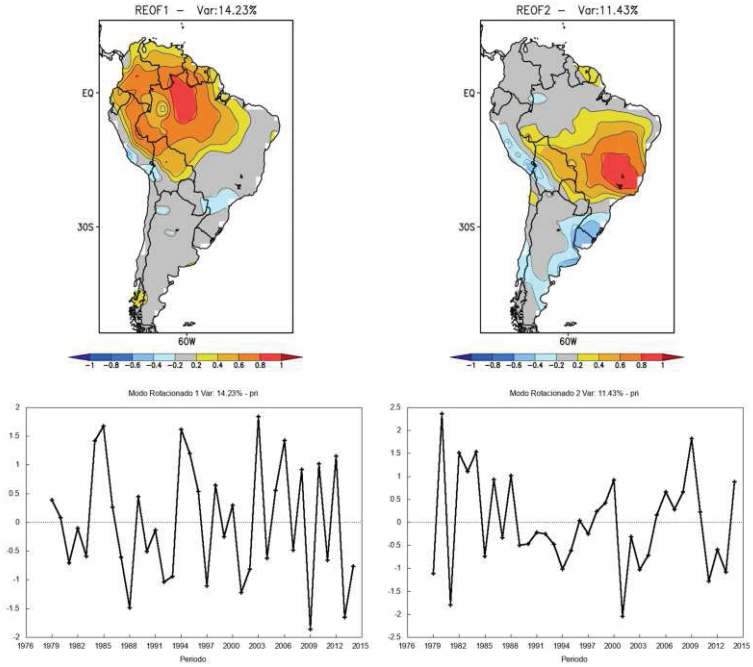
FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

O modelo KACE-1-0-G simula o modo dipolo da primavera como o segundo modo (REOF2) (FIGURA 56). No primeiro modo da primavera, o modelo mostra anomalias de mesmo sinal sobre todo o noroeste da AS e parte da região Amazônica, e anomalia de sinal oposto no sudeste do Brasil. Para o verão, o modo dipolo (REOF2) apresenta a anomalia mais intensa em CESA deslocada para o Nordeste do Brasil e em SESA a anomalia se estende por grande parte da Argentina e Paraguai (FIGURA 57). A correlação apresentada entre os modos dipolo da primavera e do verão para o modelo foi positiva e significativa (TABELA 22), indicando não haver inversões de anomalias de uma estação para a outra.

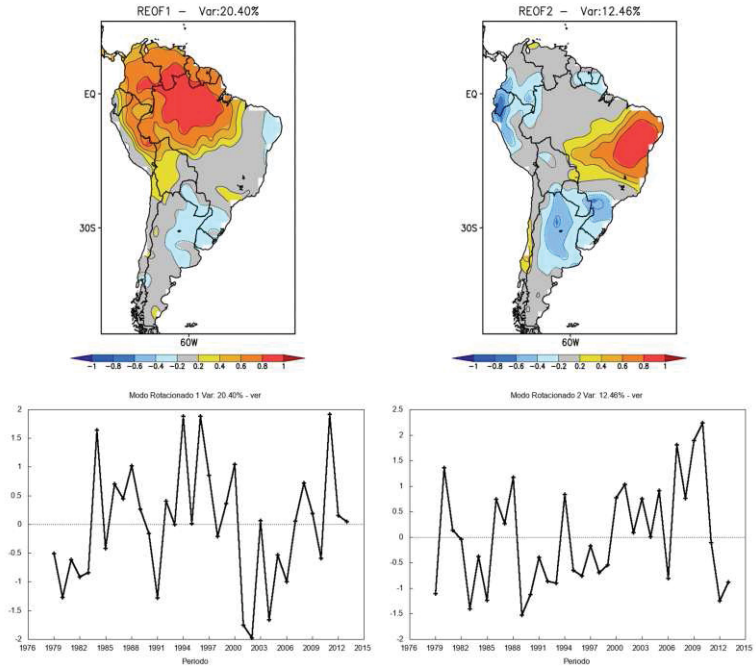
Este resultado de correlação positiva entre os modos dipolo de primavera e verão em modelos não é surpreendente, pois os modelos tendem a mostrar persistência de anomalias entre estas duas estações em CESA (GRIMM; ZILLI; CAVALCANTI, 2007).

FIGURA 56 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS DOIS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NA PRIMAVERA PARA O MODELO KACE-1-0-G (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 57 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS SUPERIORES) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS INFERIORES) DOS DOIS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NO VERÃO PARA O MODELO KACE-1-0-G (1979-2014).



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

TABELA 22 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE COMPONENTES PRINCIPAIS DOS RESPECTIVOS MODOS ROTACIONADOS DOS MODELOS E SIGNIFICÂNCIA ASSOCIADA.

Modelos	Modo pri	Modo ver	Correlação	Significância
EC-Earth3-Veg	REOF2	REOF2	-0,05	-0,39
IPSL-CM6A-LR	REOF2	REOF5	0,32	0,03
KACE-1-0-G	REOF2	REOF2	0,29	0,05

FONTE: A autora (2022).

4.5 MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM

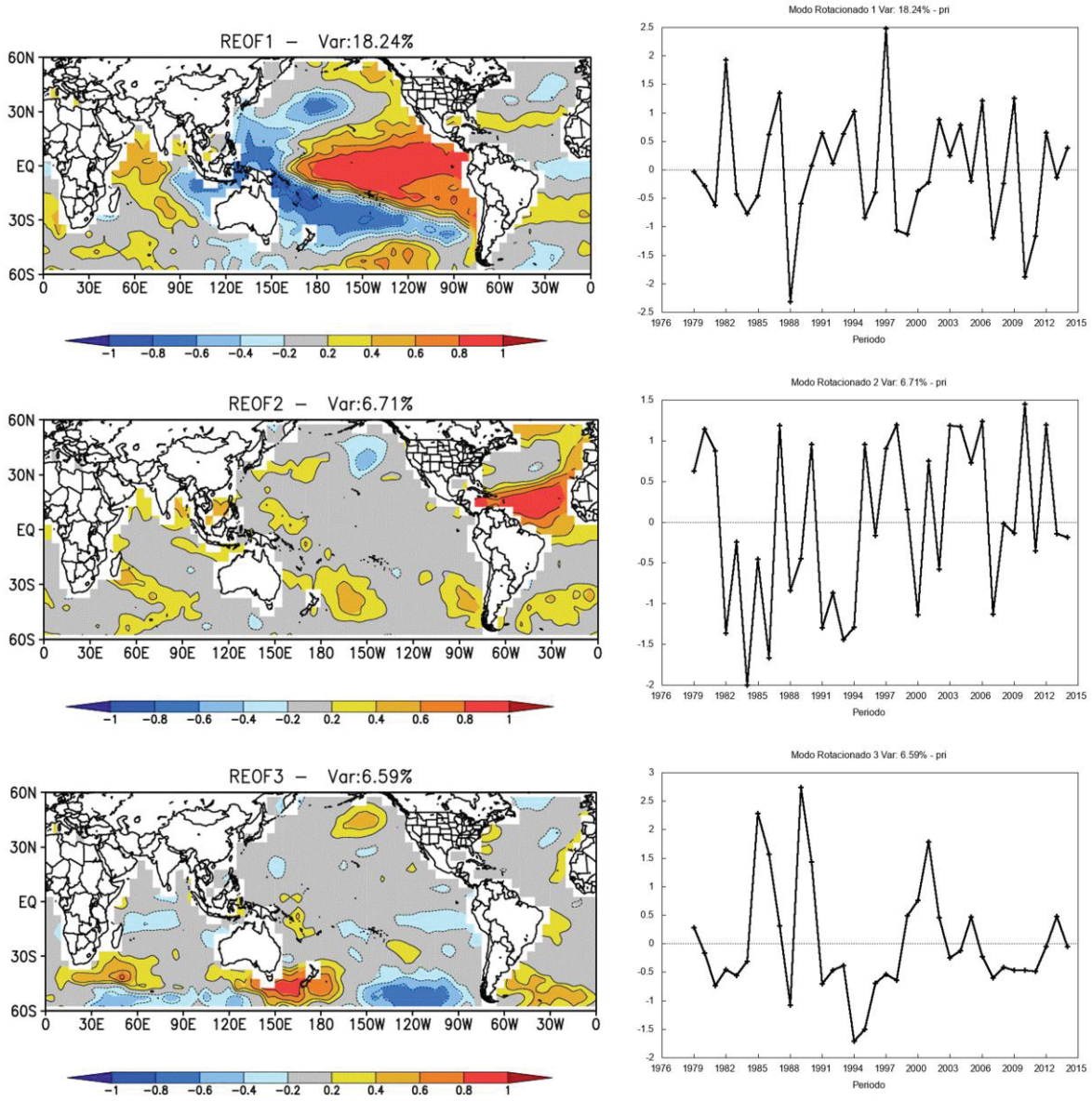
Um dos objetivos do presente trabalho consiste na avaliação dos impactos de ENOS no clima futuro. Para essa análise, é necessário avaliar como os modelos utilizados simulam o ENOS, o que é feito através do cálculo de modos de variabilidade de Temperatura da Superfície do Mar (TSM). Foram obtidos modos de variabilidade da primavera e do verão para dados observados do HadISST1 e para os resultados dos modelos. Os modos também foram calculados para a média do conjunto dos modelos que foram capazes de simular o modo ENOS. Vale ressaltar que a variabilidade interdecadal não foi filtrada dos dados originais, portanto os modos de variabilidade podem apresentar variações dessa escala temporal.

As FIGURAS 58 e 59, apresentam os 3 primeiros modos de variabilidade da primavera e do verão, respectivamente, para dados observados de TSM. O primeiro modo (REOF1) da primavera e do verão está associado ao ENOS (modo ENOS), apresentando, na fase positiva (El Niño), anomalias positivas de TSM no centro-leste do Pacífico equatorial e anomalias de sinal oposto no oeste do Pacífico e subtrópicos. Na fase oposta (La Niña), os sinais das anomalias são opostos. Na primavera, mas principalmente no verão, anomalias de mesmo sinal que do Pacífico Leste são observadas sobre o Oceano Índico, sul do Pacífico e Atlântico Sul. O segundo modo da primavera (REOF2) mostra um padrão bastante semelhante ao REOF3 do verão, com anomalias no Atlântico Norte. Esse modo pode estar relacionado com a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) ou com a variabilidade do Atlântico Tropical Norte (ATN). Já o segundo modo do verão (REOF2), não possui um modo correspondente na primavera e indica anomalias sobre o centro e nordeste do Pacífico, podendo estar associado à Oscilação Interdecadal do Pacífico (OIP).

Através dos componentes principais (*factor scores*) referentes ao modo ENOS da primavera e do verão é possível identificar anos de eventos EN e LN quando os

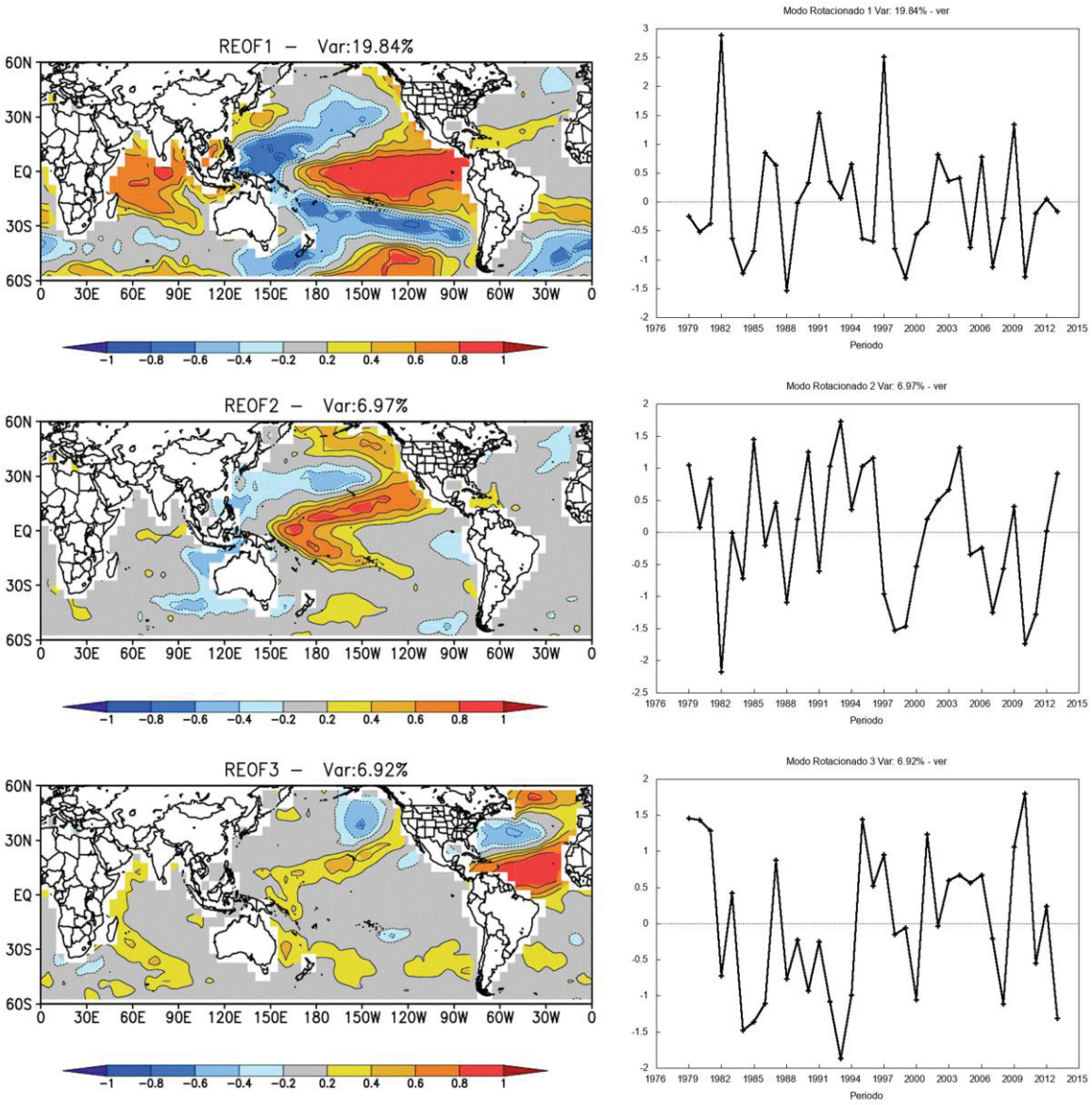
valores excedem ±0,75σ. Para dados observados de TSM, a TABELA 23 apresenta a lista de ocorrência desses eventos em cada estação e os anos em comum, considerados como os anos em que ocorreram EN e LN para cálculos posteriores.

FIGURA 58 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA DADOS DO HADISST1.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 59 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA DADOS DO HADISST1.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

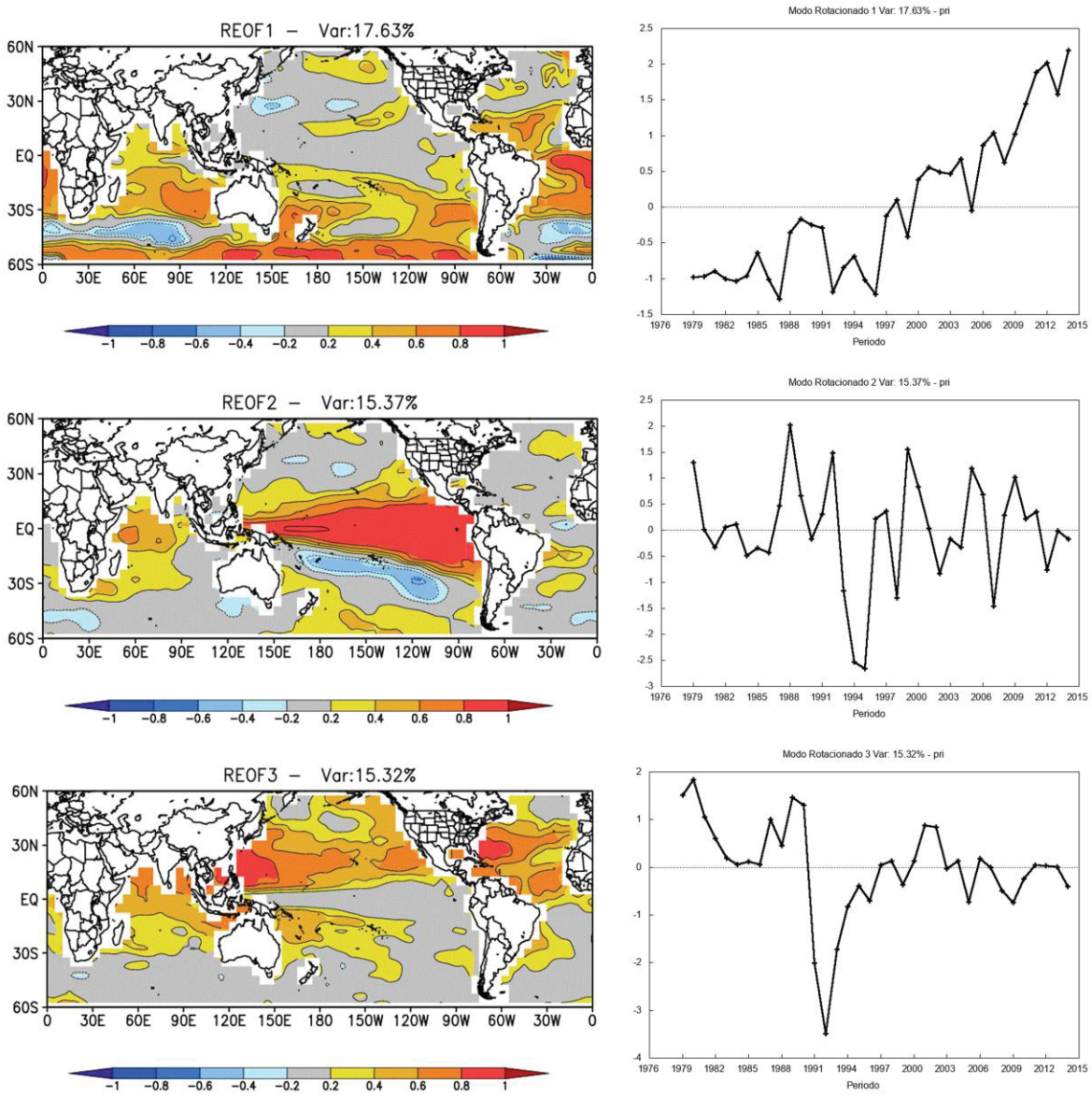
TABELA 23 – LISTAS DE ANOS EN E LN RESULTANTES DOS DADOS OBSERVADOS (HADISST1) NA PRIMAVERA, NO VERÃO E ANOS EM COMUM ENTRE AS ESTAÇÕES.

Evento	Primavera	Verão	Comum
EN	1982, 1987, 1994, 1997, 2002, 2004, 2006, 2009	1982, 1986, 1991, 1997, 2002, 2006, 2009	1982, 1997, 2002, 2006, 2009
LN	1984, 1988, 1995, 1998, 1999, 2007, 2010, 2011	1984, 1985, 1988, 1998, 1999, 2005, 2007, 2010	1984, 1988, 1998, 1999, 2007, 2010

FONTE: A autora (2022).

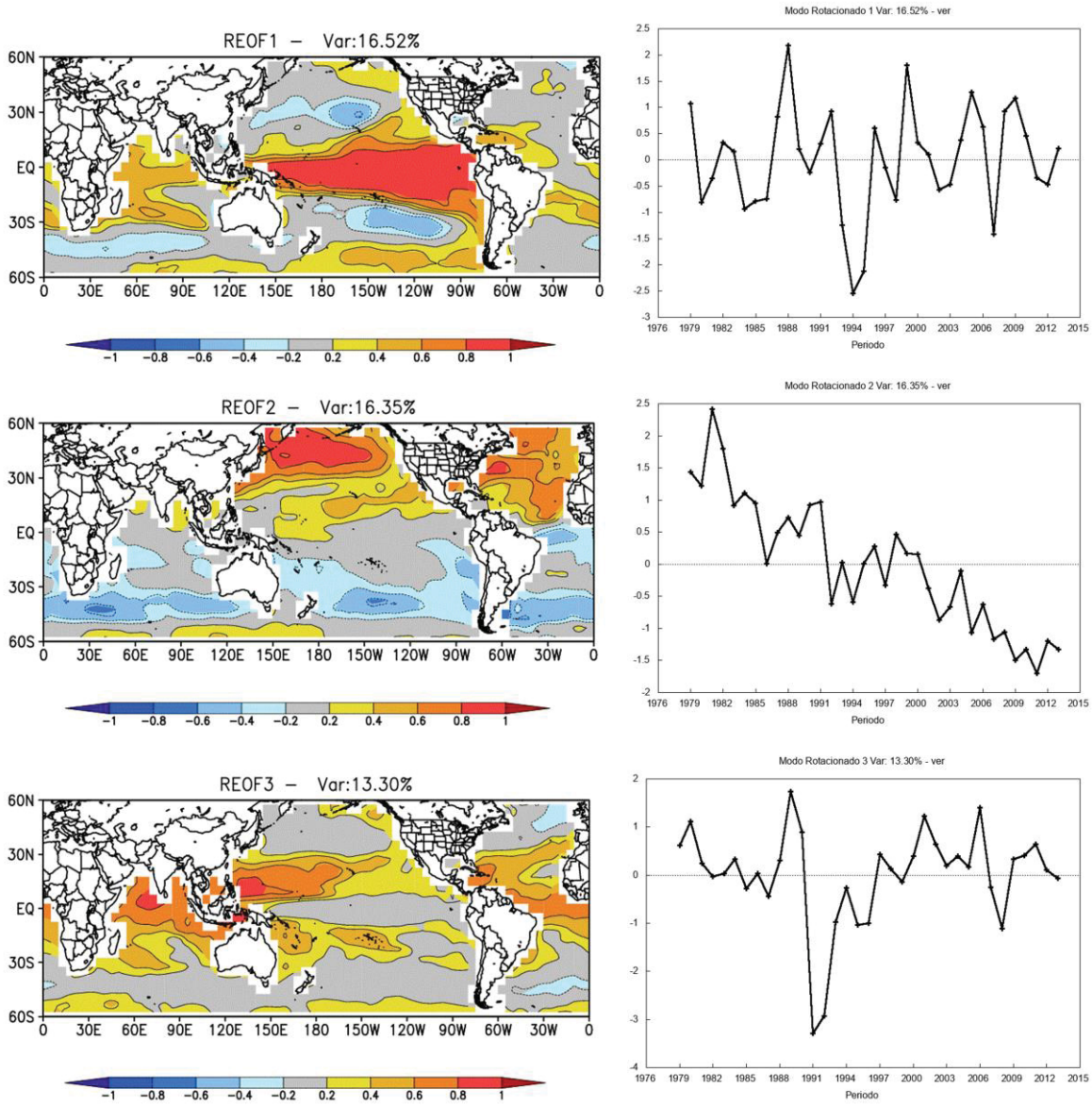
Analogamente, os modos de variabilidade também foram obtidos para os modelos do CMIP6. As FIGURAS 60 e 61 mostram os três primeiros modos de variabilidade da primavera e do verão, respectivamente, calculados para o modelo IPSL-CM6A-LR, o qual apresentou individualmente o melhor desempenho ao simular a climatologia do período presente. O primeiro (REOF1) e terceiro (REOF3) modos da primavera mostram anomalias de mesmo sinal em grande parte do globo. Enquanto o REOF1 apresenta anomalias mais concentradas no HS, o REOF3 apresenta anomalias mais concentradas no HN. Já o REOF2 representa o modo ENOS, com a anomalia sobre o Pacífico equatorial estendida até o Pacífico Oeste. Em comparação com o modo ENOS observado (FIGURA 58), o do modelo não mostra anomalia de sinal oposto no oeste do Pacífico e apresenta as anomalias sobre o Oceano Índico distribuídas em uma área maior. Para o verão, o primeiro modo do modelo (REOF1) é o modo ENOS. O REOF3 se assemelha bastante ao REOF3 da primavera e o REOF2 mostra anomalias de TSM opostas nos dois hemisférios. É possível notar que, apesar da tendência ter sido retirada dos dados em cada ponto de grade antes do cálculo da ACP, alguns FS possuem uma evidente tendência como, por exemplo, REOF1 da primavera (FIGURA 60) e REOF2 de verão (FIGURA 61). Isso acontece porque em certa estação um componente principal pode apresentar tendência mesmo que não haja tendência na série temporal inteira, ou seja, mesmo que a série total não tenha tendência, é possível que a TSM apenas da primavera, por exemplo, mostre aumento ao longo dos anos.

FIGURA 60 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 61 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR.

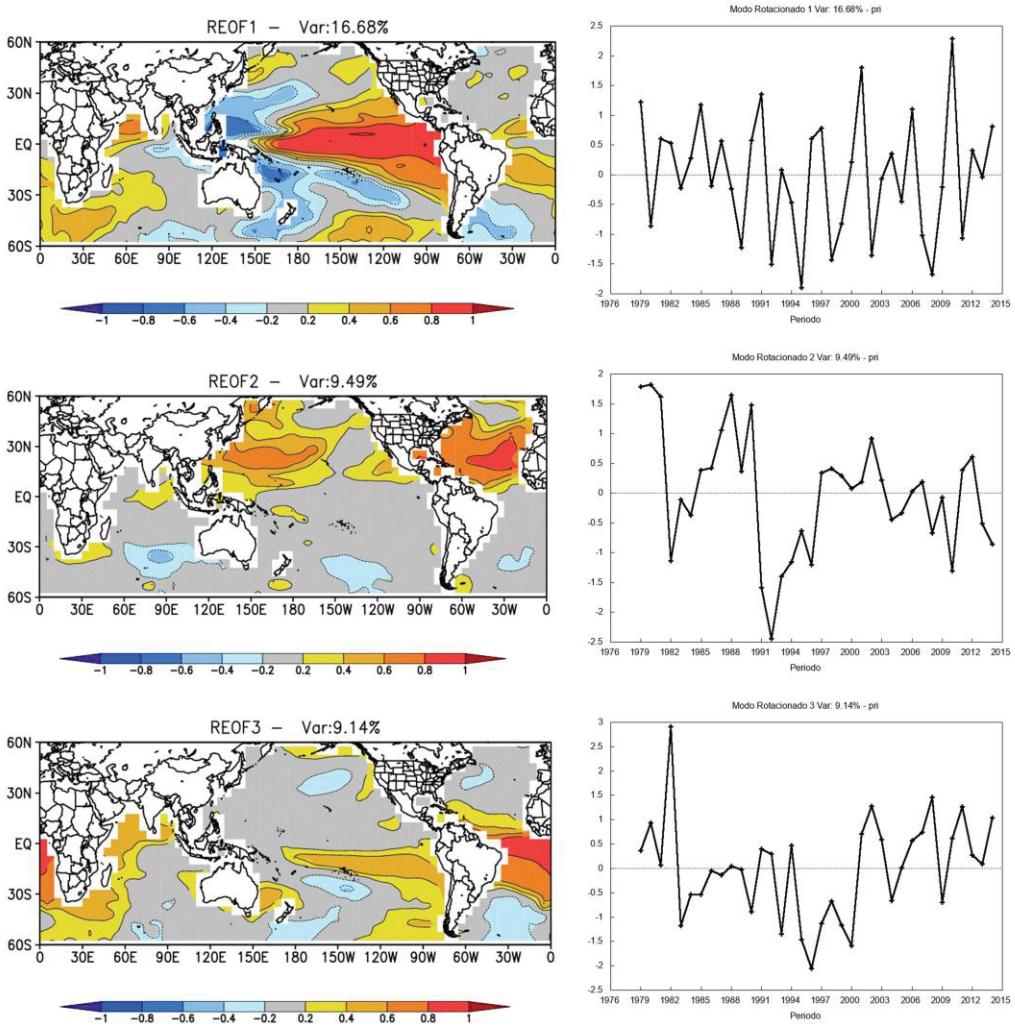


FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

O modelo CESM2 se destaca na representação do modo ENOS de primavera e verão (o desempenho é avaliado na Seção 4.6). Por esse motivo, os três primeiros modos de variabilidade simulados por esse modelo são apresentados nas FIGURAS 62 e 63 para a primavera e o verão, respectivamente. O modo ENOS da primavera é o principal modo (REOF1). Nesse modo, o modelo simula as anomalias de TSM no centro-leste do Pacífico equatorial e anomalias de sinais opostos em torno dessa região. No Atlântico Sul, o CESM2 representa uma anomalia mais forte do que o

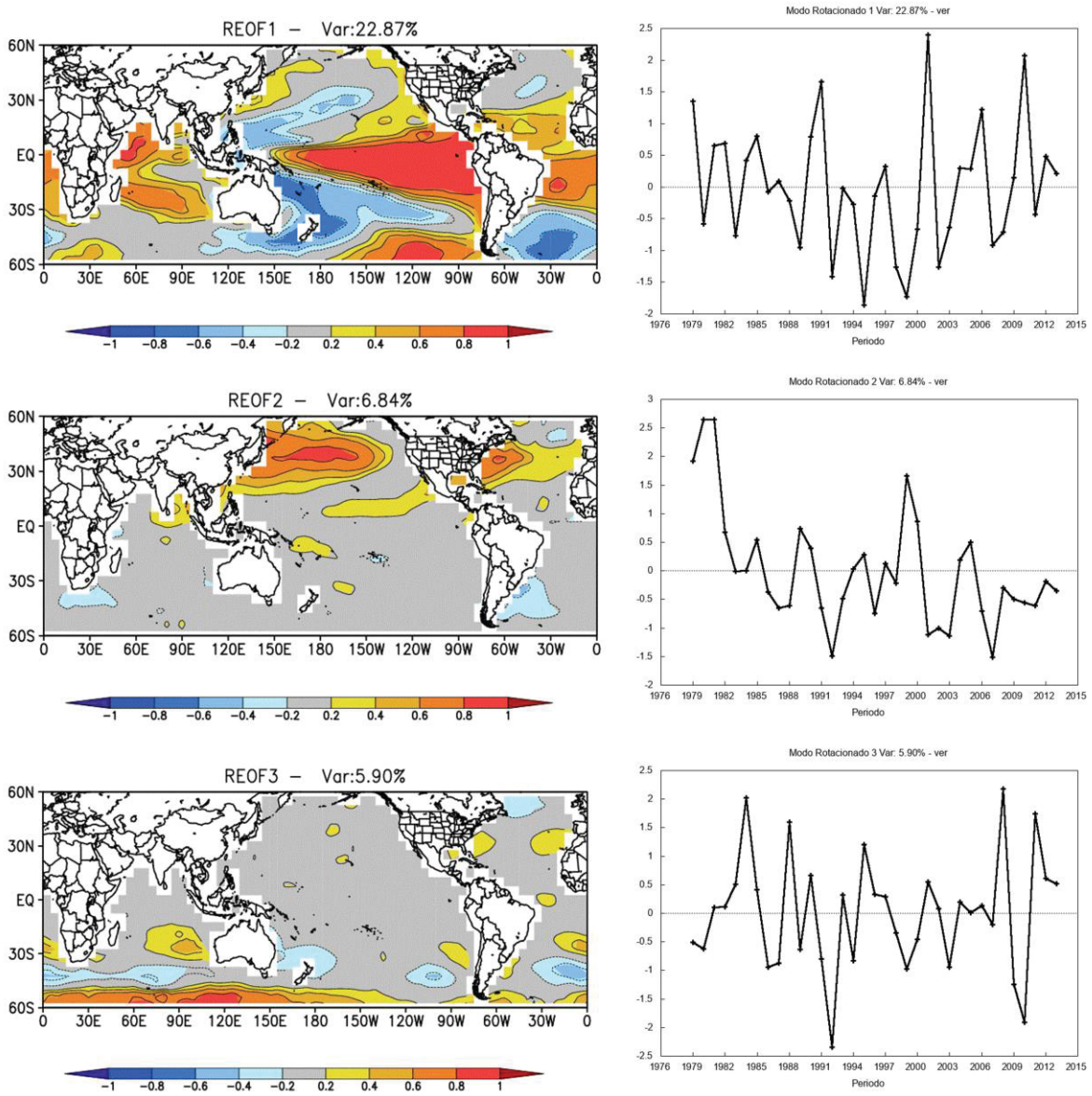
observado (FIGURA 58). Já o REOF2 da primavera mostra anomalias de TSM no Atlântico Norte, assemelhando-se ao REOF2 da primavera de dados observados (FIGURA 58). Contudo, ainda nesse modo, o modelo mostra anomalias também fortes no noroeste do Pacífico. Já no REOF3, aparecem anomalias de mesmo sinal no Atlântico Sul e no centro-leste do Pacífico do HS. No verão, as anomalias do modo ENOS (REOF1) mostram sinais mais fortes no Pacífico equatorial, no sul do Pacífico e no Oceano Índico, em comparação com o modo ENOS da primavera. O segundo modo do verão assemelha-se ao REOF2 da primavera, porém mostra anomalias mais fortes sobre o noroeste do Pacífico e mais fracas no Atlântico Norte.

FIGURA 62 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA O MODELO CESM2.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 63 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA O MODELO CESM2.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

Os anos EN e LN simulados pelo CESM2 são apresentados na TABELA 24 abaixo para cada estação e os anos em comum entre as estações.

TABELA 24 – LISTAS DE ANOS EN E LN SIMULADOS PELO MODELO CESM2 NA PRIMAVERA, NO VERÃO E ANOS EM COMUM ENTRE AS ESTAÇÕES.

Evento	Primavera	Verão	Comum
EN	1979, 1985, 1991, 1997, 2001, 2006, 2010, 2014	1979, 1985, 1990, 1991, 2001, 2006, 2010	1979, 1985, 1991, 2001, 2006, 2010
LN	1980, 1989, 1992, 1995, 1998, 1999, 2002, 2007, 2008, 2011	1983, 1989, 1992, 1995, 1998, 1999, 2002, 2007	1989, 1992, 1995, 1998, 1999, 2002, 2007

FONTE: A autora (2022).

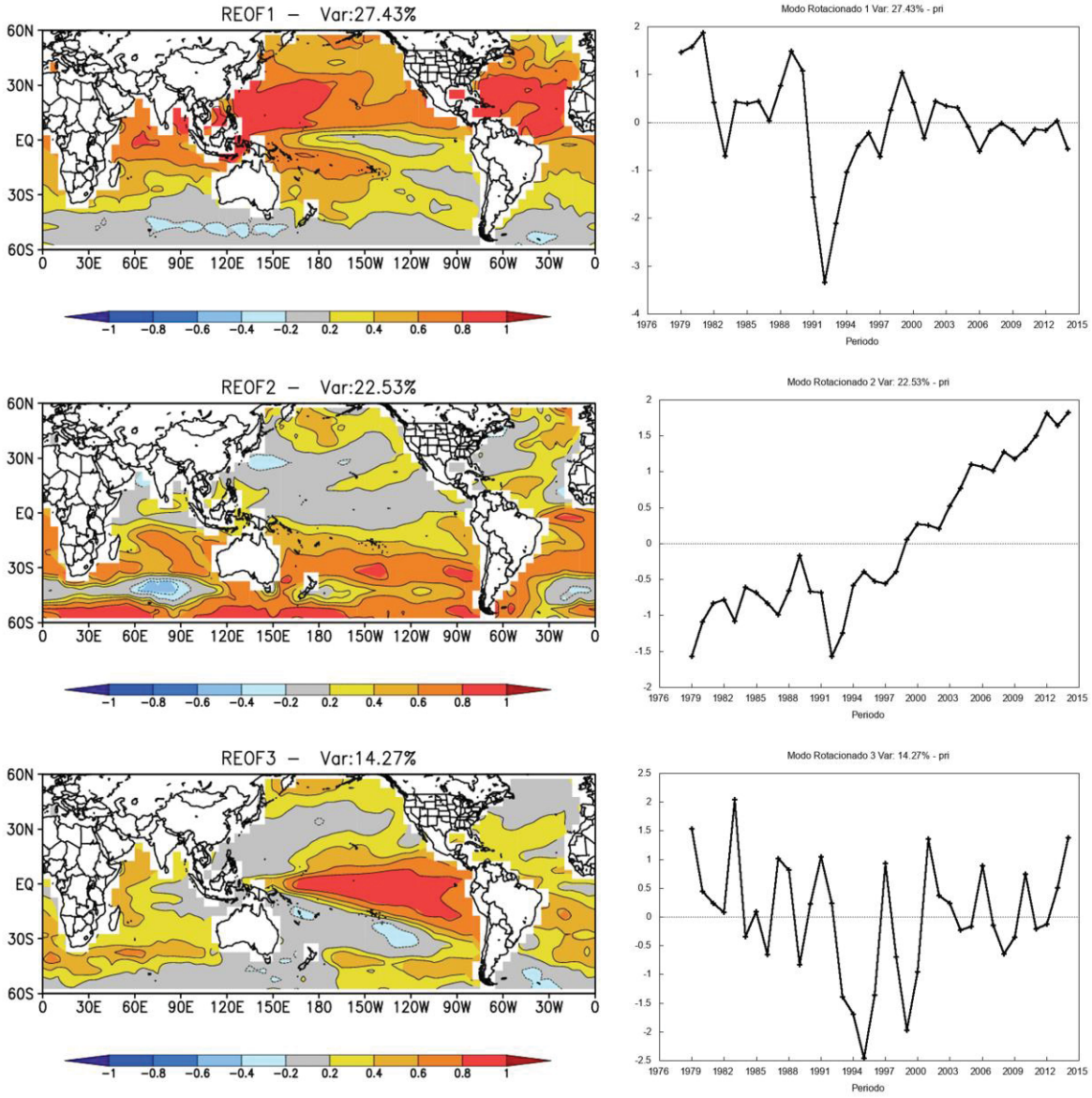
Dentre os modelos avaliados, o modelo ACCESS-ESM1-5 foi o único que não foi capaz de simular o modo ENOS, nem para a primavera e nem para verão austral. Por isso, ao realizar a média do conjunto de todos os modelos para avaliação dos modos de variabilidade, esse modelo não foi considerado.

O modelo IPSL-CM6A-LR simula o modo ENOS de primavera como o segundo modo rotacionado e o modelo CNRM-CM6-1, apresenta o modo ENOS de verão como o terceiro modo rotacionado. Salvo esses casos, todos os demais modelos mostram o modo ENOS de primavera e verão como o principal modo de variabilidade (REOF1). A simulação desse modo por cada modelo é apresentada na Seção 4.6.

Abaixo, as FIGURAS 64 e 65 mostram os 3 primeiros modos de variabilidade da primavera e do verão, respectivamente, para a média do conjunto de modelos que foram capazes de simular o modo ENOS. O panorama geral mostra que a média do *ensemble* nem sempre é melhor do que a simulação de um modelo, Além do modo ENOS da primavera e do verão ser o terceiro modo rotacionado, as anomalias mais intensas do Pacífico central leste quase não atingem a costa oeste da AS e não há anomalias de sinais opostos em torno dessas regiões ou mesmo no oeste do Pacífico. O primeiro modo da primavera e o segundo modo do verão, mostram anomalias de TSM de mesmo sinal, distribuídas principalmente no HN, indicando tendência de resfriamento da TSM do HN no período histórico, especialmente nos extratrópicos no verão, sendo que no REOF2 de verão aparecem anomalias de sinais opostos no HS, indicando tendência de aquecimento. Tendência de aquecimento nos extratrópicos do HS aparece mais forte no REOF2 de primavera. Já o primeiro modo do verão mostra anomalias de mesmo sinal distribuídas na faixa tropical, com variabilidade mais forte no Pacífico oeste-Índico leste e Atlântico, sem clara tendência. Portanto, não há muita

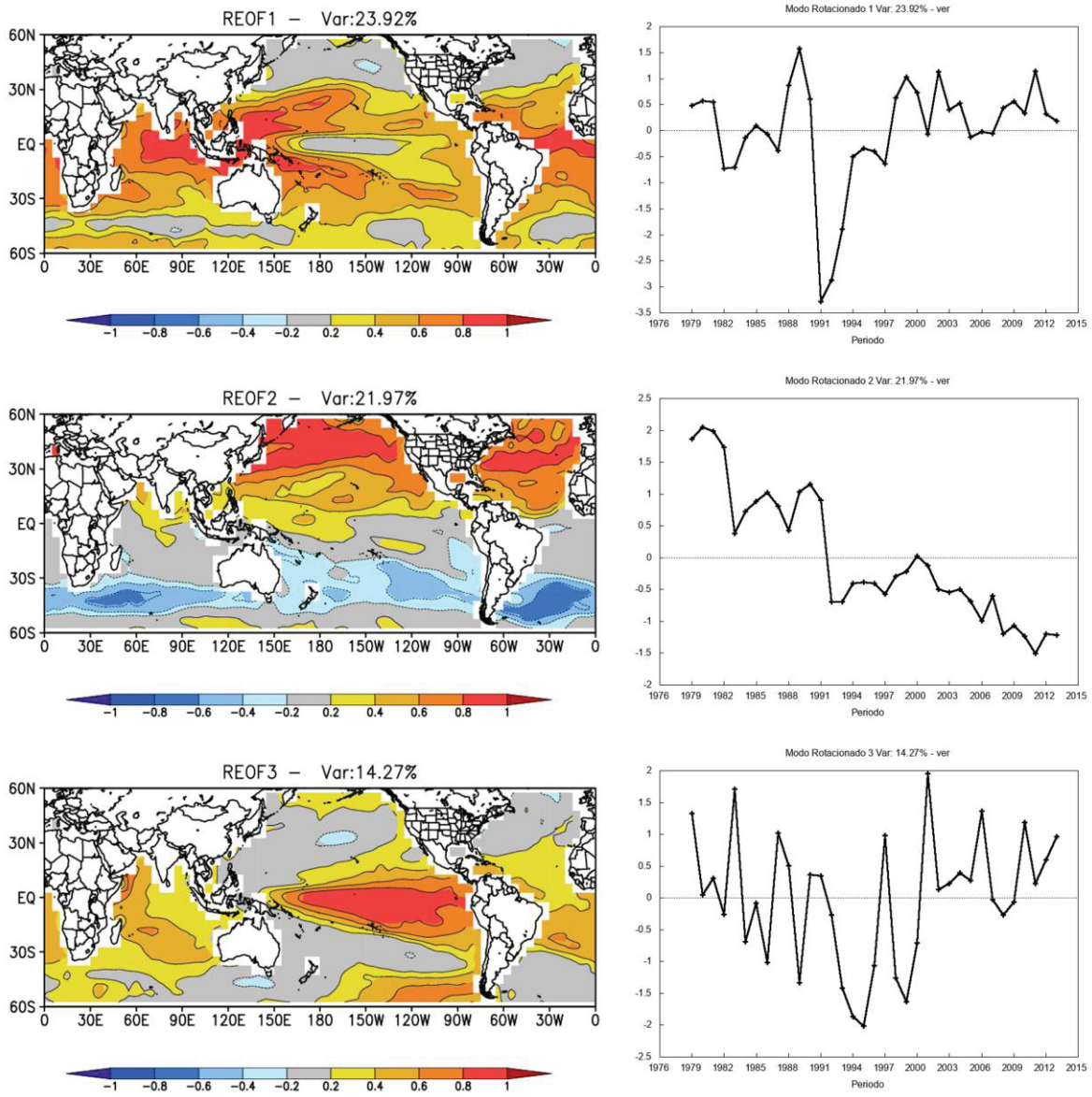
correspondência entre os três primeiros modos de TSM observados e simulados (média de *ensemble*) de primavera e verão, a não ser o modo ENOS, que também apresenta diferenças.

FIGURA 64 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 65 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

Os anos EN e LN simulados pela média do conjunto dos modelos que foram capazes de simular o modo ENOS na primavera e no verão são apresentados na TABELA 25 abaixo, para cada estação e os anos em comum entre as estações.

TABELA 25 – LISTAS DE ANOS EN E LN RESULTANTES DA MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NA PRIMAVERA, NO VERÃO E ANOS EM COMUM ENTRE AS ESTAÇÕES.

Evento	Primavera	Verão	Comum
EN	1979, 1983, 1987, 1988, 1991, 1997, 2001, 2006, 2010, 2014	1979, 1983, 1987, 1997, 2001, 2006, 2010, 2013	1979, 1983, 1987, 1997, 2001, 2006, 2010
LN	1989, 1993, 1994, 1995, 1996, 1999, 2000	1986, 1989, 1993, 1994, 1995, 1996, 1998, 1999	1989, 1993, 1994, 1995, 1996, 1999

FONTE: A autora (2022).

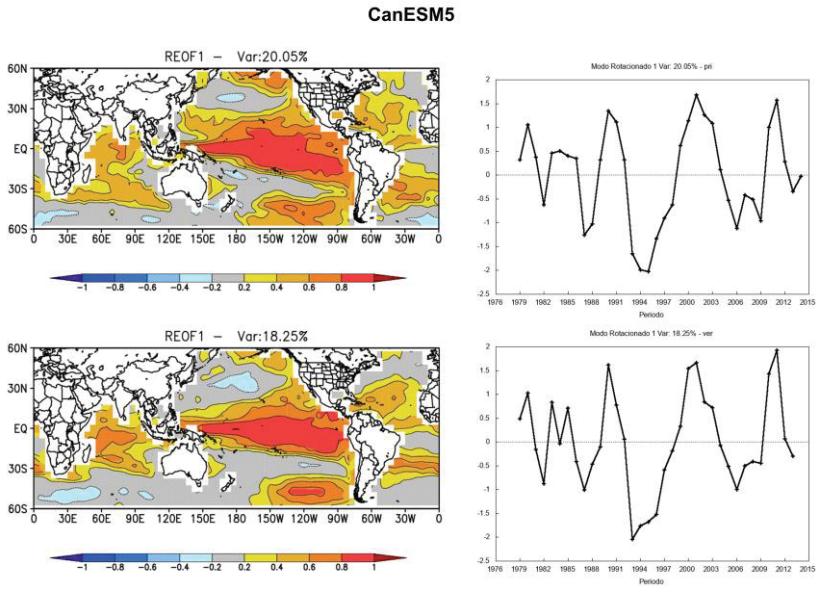
4.6 SIMULAÇÃO DE ENOS

Para avaliar os modelos quanto à simulação de ENOS no clima presente (1979-2014), foram selecionados os modos de variabilidade em que os modelos mostram padrões característicos do ENOS. Isso foi feito para cada modelo e para a média do conjunto de modelos que foram capazes de reproduzir esse modo, na primavera e no verão austral, e os resultados são mostrados nesta seção.

Na Seção 4.5 é possível consultar os 3 primeiros modos de variabilidade da primavera e do verão simulados pelo modelo IPSL-CM6A-LR (FIGURA 60 e FIGURA 61), que apresentou melhor desempenho ao reproduzir a climatologia presente. Os modos de variabilidade do modelo CESM2, o de melhor desempenho na reprodução de ENOS, e da média do conjunto de modelos que simulam o modo ENOS, também foram apresentados com mais detalhes nas FIGURAS 62, 63, 64 e 65.

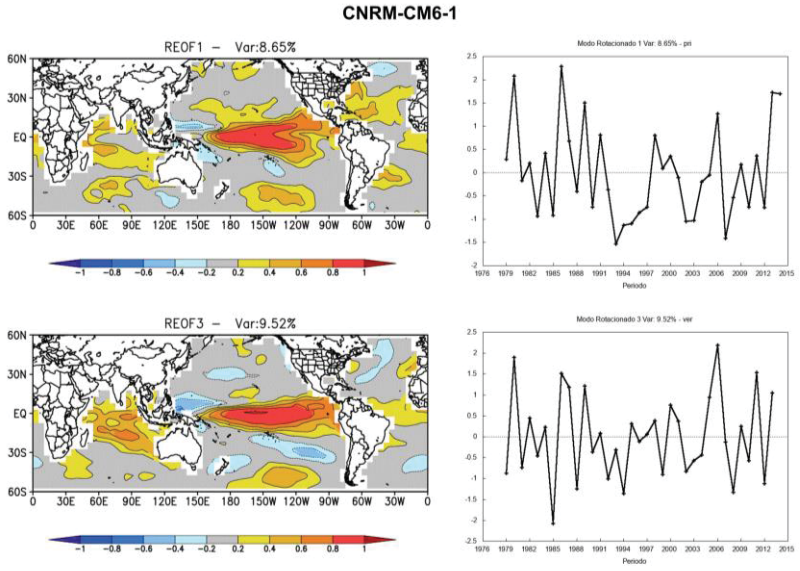
A FIGURA 66 a seguir apresenta os modos de variabilidade da primavera e do verão associados ao modo ENOS do modelo CanESM5. O modelo apresenta anomalias de mesmo sinal distribuídas em grande parte do globo e ao longo de todo o Pacífico equatorial, tanto na primavera como no verão austral, e quase não mostra anomalias de sinal oposto. Já o modelo CNRM-CM6-1 (FIGURA 67) mostra as anomalias um pouco mais concentradas, sobre o Pacífico equatorial central-leste, são mais deslocadas mais para o centro do oceano, especialmente no verão austral.

FIGURA 66 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO CANESM5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 67 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO CNRM-CM6-1.

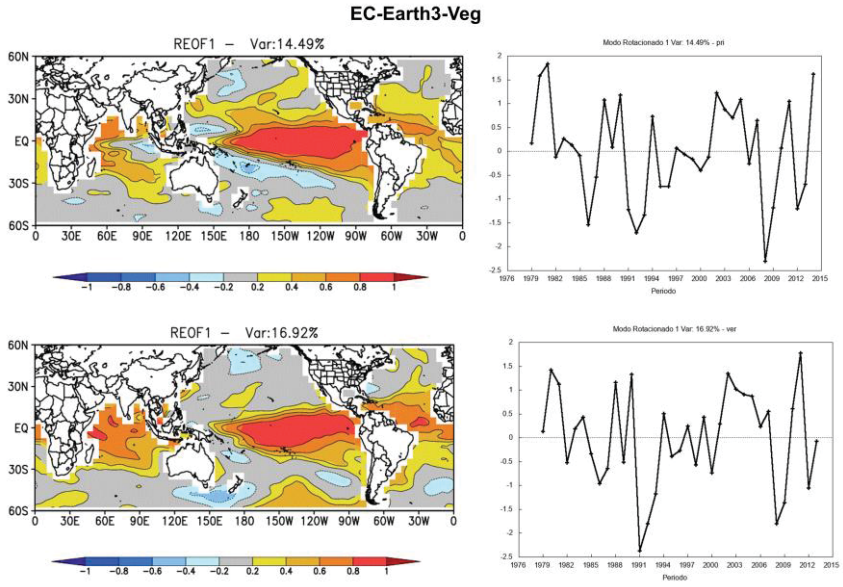


FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

Os modelos EC-Earth3-Veg (FIGURA 68) e HadGEM3-GC31-LL (FIGURA 69), mostram padrões de ENOS semelhantes em cada estação. Os modelos simulam

fracas anomalias no Pacífico Oeste e em torno da região da maior anomalia no centro-leste do Pacífico. Especificamente, o EC-Earth3-Veg superestima as anomalias no Atlântico nas duas estações em comparação com o HadGEM3-GC31-LL.

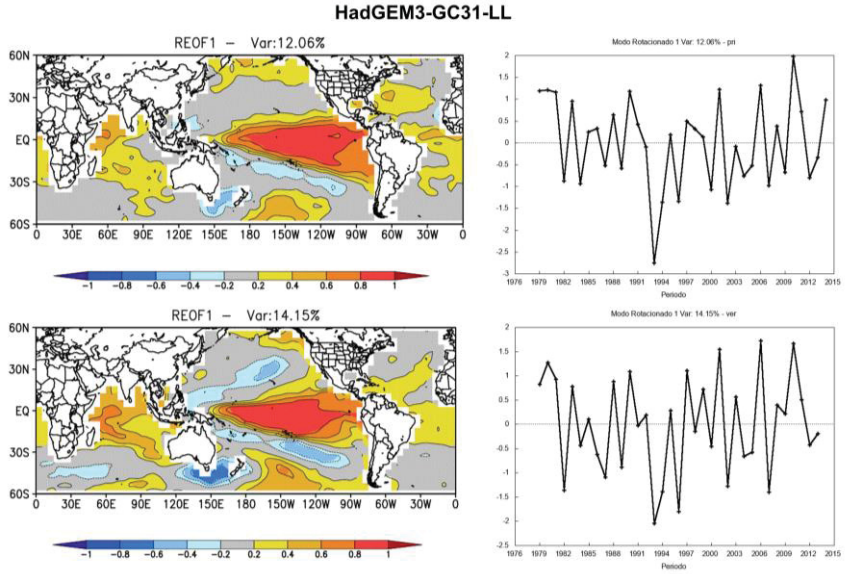
FIGURA 68 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO EC-EARTH3-VEG.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

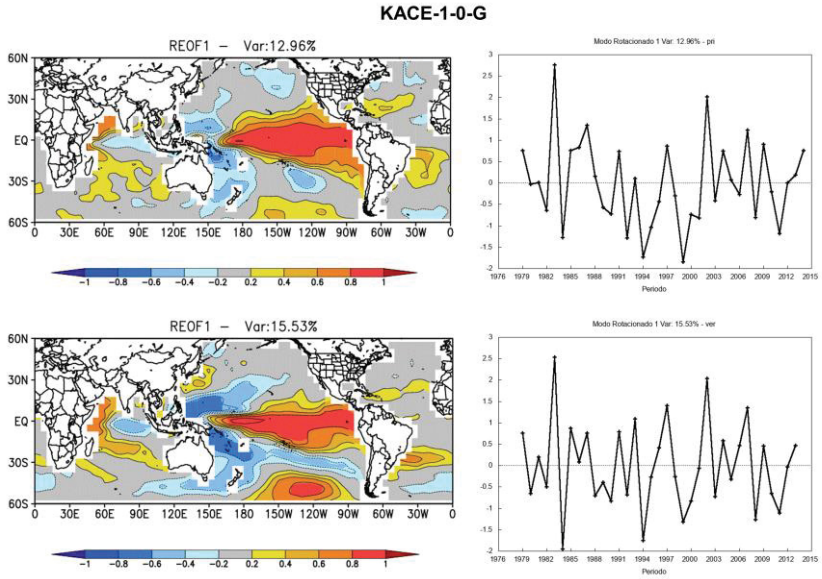
Os modelos KACE-1-0-G (FIGURA 70), MPI-ESM1-2-HR (FIGURA 71) e MRI-ESM2-0 (FIGURA 72), mostram anomalias semelhantes no centro-leste do Pacífico equatorial em cada estação, por vezes apresentando deslocamentos mais para norte ou sul do equador. Eles simulam também as anomalias de sinais opostos a essas no oeste do Pacífico e em torno das anomalias no centro-leste do Pacífico equatorial. Diferentemente dos demais modelos (com exceção do CESM2), essas anomalias de sinais opostos são mais evidentes nas simulações desses modelos.

FIGURA 69 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO HADGEM3-GC31-LL.



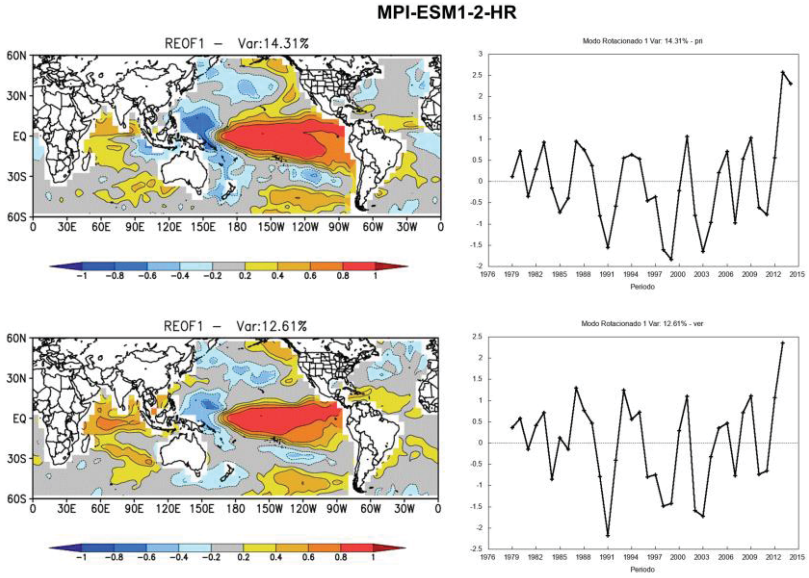
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 70 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO KACE-1-0-G.



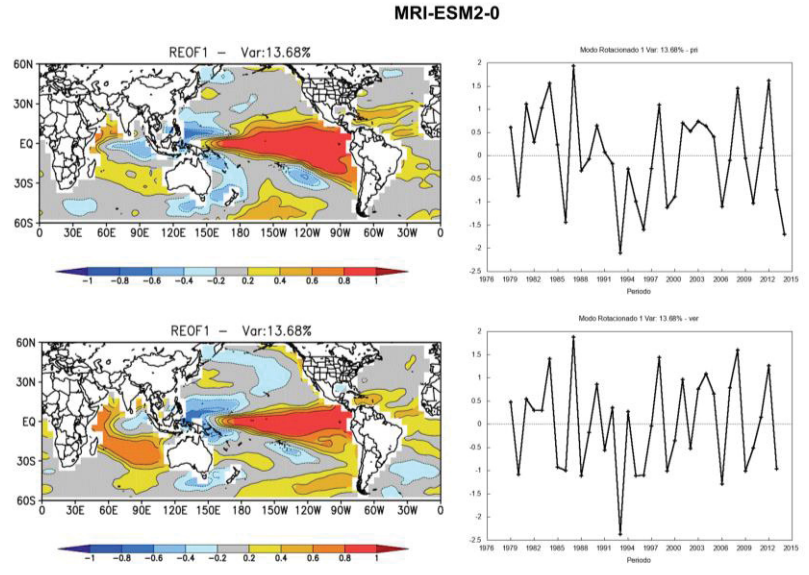
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 71 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MPI-ESM1-2-HR.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

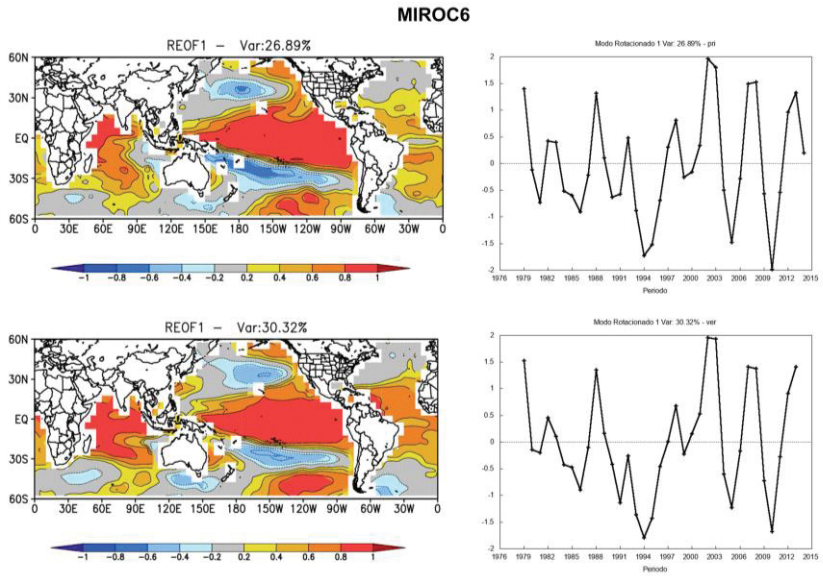
FIGURA 72 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MRI-ESM2-0.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

O modelo MIROC6 (FIGURA 73) mostra fortes anomalias de TSM de mesmo sinal sobre todo o Pacífico equatorial, estendendo-se em direção aos trópicos. Além disso, o modelo superestima as anomalias nos oceanos Atlântico e Índico em ambas as estações em comparação com resultados observados (FIGURA 58 e FIGURA 59).

FIGURA 73 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MIROC6.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

Para classificar os modelos de acordo com seus desempenhos em simular o ENOS, foram calculados inicialmente 4 índices. O primeiro índice foi computado com base na correlação entre os padrões espaciais (*Factor Loadings*) do modo ENOS apresentado por dados observados e o modo ENOS simulado por cada um dos modelos (e média do conjunto). Para o cálculo do índice, cada coeficiente de correlação obtido foi subtraído de 1, analogamente ao que foi feito na análise de climatologias de precipitação e circulação e então foi feita a média dos resultados para primavera e verão. Posteriormente, cada valor (1-r) foi padronizado pela média de cada estação. A TABELA 26 apresenta os valores sazonais calculados para esse índice, já padronizados pelas médias dos valores sazonais de (1-r) sobre todos os modelos, as quais são mostradas na última linha da tabela. Dessa forma, para saber o real coeficiente de correlação calculado, basta multiplicar o valor da tabela pela média da respectiva estação e subtrair de 1. O resultado do índice para cada modelo

é dado pela média dos valores apresentados nas estações (última coluna da TABELA 26).

TABELA 26 – ÍNDICES (1-r) OBTIDOS DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ESPACIAL (r) ENTRE FL DO MODO ENOS OBSERVADO (HADISST1) E DO SIMULADO POR CADA MODELO ESPECIFICADO, PARA O PERÍODO 1979-2014, APÓS SEREM PADRONIZADOS PELA MÉDIA DE (1-r) PARA CADA ESTAÇÃO (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**PRI**	**VER**	**Médias entre as estações**
CanESM5	1,31	1,46	1,39
CESM2	0,70	0,71	0,71
CNRM-CM6-1	1,31	0,99	1,15
EC-Earth3-Veg	1,11	1,01	1,06
HadGEM3-GC31-LL	0,89	0,70	0,79
IPSL-CM6A-LR	1,33	1,33	1,33
KACE-1-0-G	0,85	0,85	0,85
MIROC6	0,87	1,02	0,95
MPI-ESM1-2-HR	0,74	0,81	0,77
MRI-ESM2-0	1,01	1,09	1,05
Ensemble Multi-modelo (ENOS)	0,88	1,04	0,96
Médias Sazonais	0,29	0,28	-

FONTE: A autora (2022).

O segundo índice calculado foi o RMSE entre os *Factor Loadings* do modo ENOS resultante de dados observados e do modo ENOS simulado por cada um dos modelos e média do conjunto de modelos, em cada estação. Cada valor do RMSE obtido foi então padronizado pela média dos resultados de todos os modelos na respectiva estação. A TABELA 27 apresenta os valores padronizados determinados para cada modelo, em cada estação, e a última linha mostra a média dos RMSE antes de serem padronizados. Assim, para obter o valor real do RMSE calculado basta multiplicar o valor da tabela pela média. Por fim, o índice é determinado pela média dos valores que cada modelo obteve nas duas estações (última coluna da TABELA 27).

TABELA 27 – RMSE PADRONIZADO ENTRE FL DO MODO ENOS OBSERVADO (HADISST1) E SIMULADO POR CADA MODELO ESPECIFICADO PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA SAZONAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**PRI**	**VER**	**Médias entre as estações**
CanESM5	1,29	1,22	1,25
CESM2	0,80	0,99	0,90
CNRM-CM6-1	1,04	0,91	0,97
EC-Earth3-Veg	1,04	1,01	1,03
HadGEM3-GC31-LL	0,94	0,82	0,88
IPSL-CM6A-LR	1,11	1,09	1,10
KACE-1-0-G	0,85	0,87	0,86
MIROC6	1,14	1,24	1,19
MPI-ESM1-2-HR	0,80	0,83	0,81
MRI-ESM2-0	0,93	0,96	0,94
Ensemble Multi-modelo (ENOS)	1,06	1,06	1,06
Médias Sazonais	0,33	0,33	-

FONTE: A autora (2022).

O terceiro índice foi calculado com base na diferença entre a variância da série de *Factor Scores* do modo ENOS calculado com dados observados e a variância dos FS do modo ENOS simulado por cada modelo e obtido da média do conjunto. Foi calculada a diferença: variância do modo ENOS do modelo – variância do modo ENOS observado, para primavera e verão. Essas diferenças no verão foram negativas para todos os modelos e média do conjunto, ou seja, a variância da série observada foi maior do que a variância apresentada por todos os modelos no verão. Como o objeto de interesse nessa avaliação é o ‘quanto’ os modelos distam do observado e não ‘como’, foram considerados para o cálculo do índice os módulos desses resultados. Foi computada a média desses valores de todos os modelos para cada estação e o módulo da diferença para cada modelo foi padronizado pela média da respectiva

estação (TABELA 28). Por fim, o índice foi determinado pela média dos valores que cada modelo obteve nas duas estações (última coluna da TABELA 28).

TABELA 28 – MÓDULOS DAS DIFERENÇAS PADRONIZADAS ENTRE AS VARIÂNCIAS DAS SÉRIES DE FS DO MODO ENOS OBSERVADO (HADISST1) E SIMULADO POR CADA MODELO ESPECIFICADO PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA SAZONAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**PRI**	**VER**	**Médias entre as estações**
CanESM5	1,67	0,48	1,08
CESM2	0,88	0,87	0,87
CNRM-CM6-1	0,24	1,24	0,74
EC-Earth3-Veg	1,70	0,66	1,18
HadGEM3-GC31-LL	0,22	1,24	0,73
IPSL-CM6A-LR	0,93	0,93	0,93
KACE-1-0-G	1,84	0,76	1,30
MIROC6	1,41	1,76	1,58
MPI-ESM1-2-HR	0,42	1,00	0,71
MRI-ESM2-0	0,57	0,90	0,74
Ensemble Multi-modelo (ENOS)	1,13	1,16	1,14
Médias Sazonais	1,17E-05	1,37E-05	-

FONTE: A autora (2022).

O quarto índice foi determinado através do cálculo do RMSE entre as curvas de densidade espectral de potência (DEP) dos FS do modo ENOS de dados observados e do modo ENOS de cada modelo (e média do conjunto). Inicialmente, calcularam-se as curvas de DEP através da TDF da função de autocorrelação da série de FS do modo ENOS simulado por cada modelo, média do *ensemble* e dados observados. As FIGURAS A19 e A20 no Anexo 3 apresentam os gráficos de DEP em função dos ciclos (em anos) presentes no sinal de ENOS de cada modelo, da média do conjunto e dos dados observados. Como a série de FS para a primavera possui 360 termos, o *lag* máximo nesse caso é de 72. Já para o verão (350 termos), o *lag* máximo é 70.

Assim, as curvas de DEP obtidas dos dados do HadISST1 foram comparadas às obtidas pelos modelos e média do *ensemble* através do cálculo do RMSE, para a primavera e para o verão. A seguir, cada resultado foi dividido pela média de todos os modelos na respectiva estação. Esses resultados são apresentados na TABELA 29, sendo a última linha as médias dos valores não padronizados. Para o cálculo do índice, foi feita a média dos resultados que cada modelo obteve nas duas estações (última coluna da TABELA 29).

TABELA 29 – RMSE PADRONIZADO ENTRE AS CURVAS DE DEP DO MODO ENOS OBSERVADO (HADISST1) E DO MODO ENOS SIMULADO POR CADA MODELO ESPECIFICADO PARA O PERÍODO 1979-2014. A PADRONIZAÇÃO É OBTIDA DA DIVISÃO PELA MÉDIA MENSAL SOBRE TODOS OS MODELOS (ÚLTIMA LINHA). VER DESCRIÇÃO NO TEXTO.

Modelos	**PRI**	**VER**	**Médias entre as estações**
CanESM5	1,26	1,35	1,30
CESM2	0,96	0,78	0,87
CNRM-CM6-1	0,79	0,77	0,78
EC-Earth3-Veg	0,96	0,92	0,94
HadGEM3-GC31-LL	0,90	1,10	1,00
IPSL-CM6A-LR	0,95	1,04	0,99
KACE-1-0-G	0,80	0,90	0,85
MIROC6	1,25	1,03	1,14
MPI-ESM1-2-HR	1,09	1,01	1,05
MRI-ESM2-0	1,05	1,05	1,05
Ensemble Multi-modelo (ENOS)	0,99	1,05	1,02
Médias Sazonais	0,02	0,02	-

FONTE: A autora (2022).

O primeiro critério para classificar os modelos de acordo com seus desempenhos ao simularem o modo ENOS é dado pelo índice geral, (IG_{ENOS}), que é a média dos 4 índices descritos, para cada modelo (TABELA 30). É conveniente lembrar que o desempenho é melhor quanto menor for o índice.

TABELA 30 – ÍNDICE GERAL DE CADA MODELO E MÉDIA DO CONJUNTO DESSES MODELOS.

Modelos	IG_{ENOS}
CanESM5	1,26
CESM2	0,84
CNRM-CM6-1	0,91
EC-Earth3-Veg	1,05
HadGEM3-GC31-LL	0,85
IPSL-CM6A-LR	1,09
KACE-1-0-G	0,96
MIROC6	1,21
MPI-ESM1-2-HR	0,84
MRI-ESM2-0	0,94
Ensemble Multi-modelo (ENOS)	1,05

FONTE: A autora (2022).

O segundo critério de classificação dos modelos é o número de vezes que um modelo (e a média do *ensemble*) aparece entre os 8 melhores em cada um dos índices calculados. A TABELA 31 apresenta os valores dessas repetições para cada modelo e para a média do *ensemble*.

TABELA 31 – NÚMERO DE VEZES QUE O MODELO APARECE ENTRE OS 8 MELHORES NA CLASSIFICAÇÃO DE CADA ÍNDICE.

Modelo	Número de exibições
CanESM5	1
CESM2	4
CNRM-CM6-1	3
EC-Earth3-Veg	3
HadGEM3-GC31-LL	4
IPSL-CM6A-LR	2
KACE-1-0-G	3
MIROC6	1
MPI-ESM1-2-HR	3
MRI-ESM2-0	4
Ensemble Multi-modelo (ENOS)	4

FONTE: A autora (2022).

Portanto, a classificação final do desempenho dos modelos ao simularem o modo ENOS, do melhor para o pior modelo, é apresentada na TABELA 32.

TABELA 32 – CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS AO SIMULAREM O MODO ENOS.

Classificação	Modelo
1°	CESM2
2°	MPI-ESM1-2-HR
3°	HadGEM3-GC31-LL
4°	CNRM-CM6-1
5°	MRI-ESM2-0
6°	KACE-1-0-G
7°	Ensemble multi-modelo (ENOS)
8°	EC-Earth3-Veg
9°	IPSL-CM6A-LR
10°	MIROC6
11°	CanESM5

FONTE: A autora (2022).

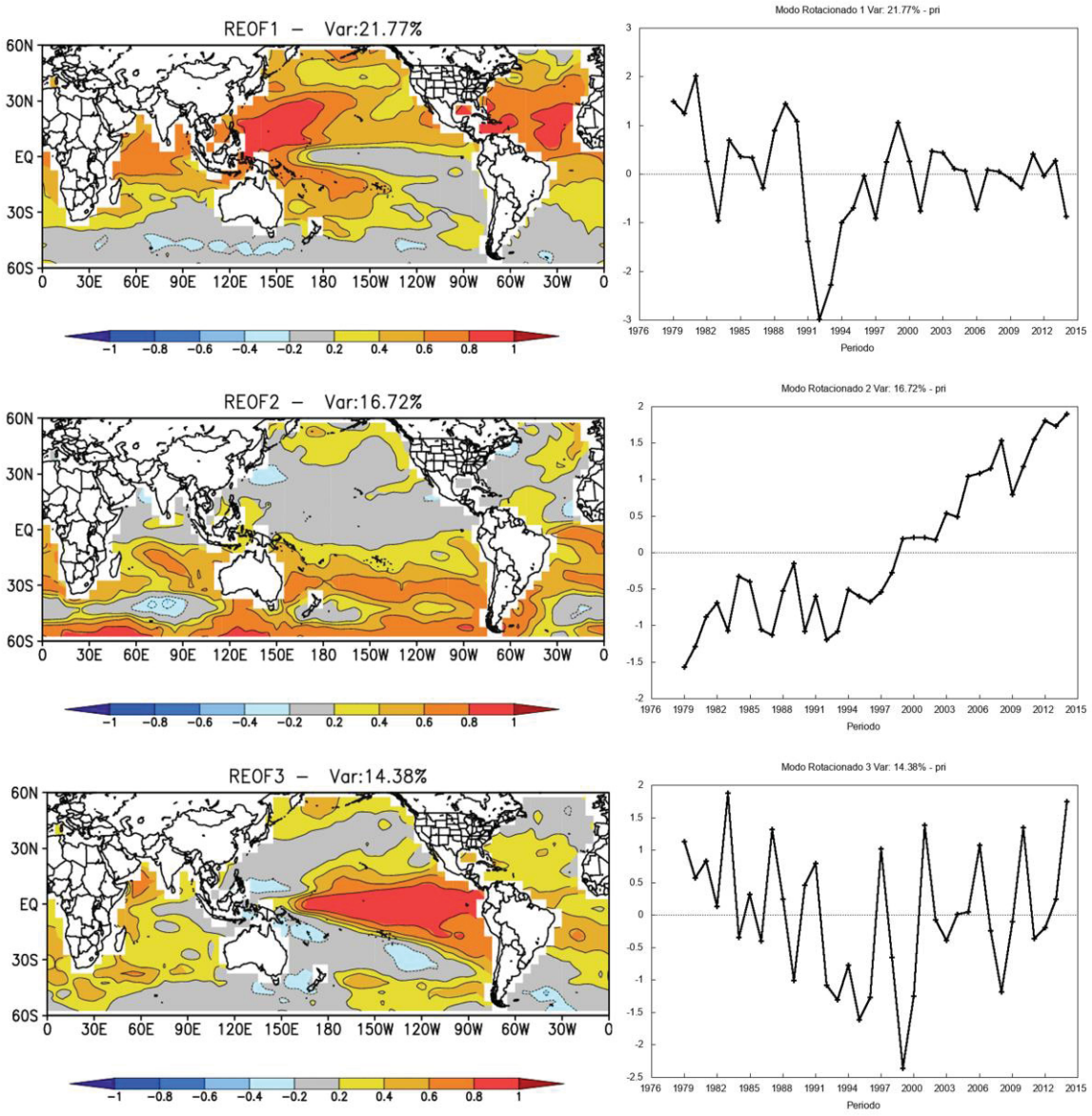
Para análises envolvendo o ENOS, foi computada a média do conjunto dos melhores modelos neste aspecto. Essa média não envolve o *Ensemble* multi-modelo (ENOS), mas sim os 7 modelos: CESM2, MPI-ESM1-2-HR, HadGEM3-GC31-LL, CNRM-CM6-1, MRI-ESM2-0, KACE-1-0-G e EC-Earth3-Veg. Para essas análises, o Ensemble multi-modelo (ENOS) é avaliado separadamente.

Vale ressaltar que, calculando um "índice geral" apenas para o verão, ou seja, fazendo-se a média para cada modelo dos resultados obtidos somente no verão em cada índice, os modelos que apresentam melhor desempenho são os mesmos da classificação geral, apesar de não serem classificados na mesma ordem.

As FIGURAS 74 e 75 abaixo apresentam os 3 primeiros modos de variabilidade da primavera e verão, respectivamente, calculados para a média do conjunto dos sete melhores modelos em simular ENOS. Tanto para a primavera como para o verão, o modo ENOS é o terceiro modo rotacionado, mostrando anomalias de TSM no Pacífico central-leste equatorial e anomalias de mesmo sinal nos oceanos Índico e Atlântico. Na primavera, aparecem anomalias de sinal oposto a essas no oeste do Pacífico e, no verão, as anomalias do centro-leste se estendem até o oeste do Pacífico. Na primavera, os dois primeiros modos mostram anomalias de mesmo sinal predominantes no HN em REOF1 e no HS em REOF2. Para o verão, o primeiro modo mostra anomalias de mesmo sinal distribuídas por todo o globo.

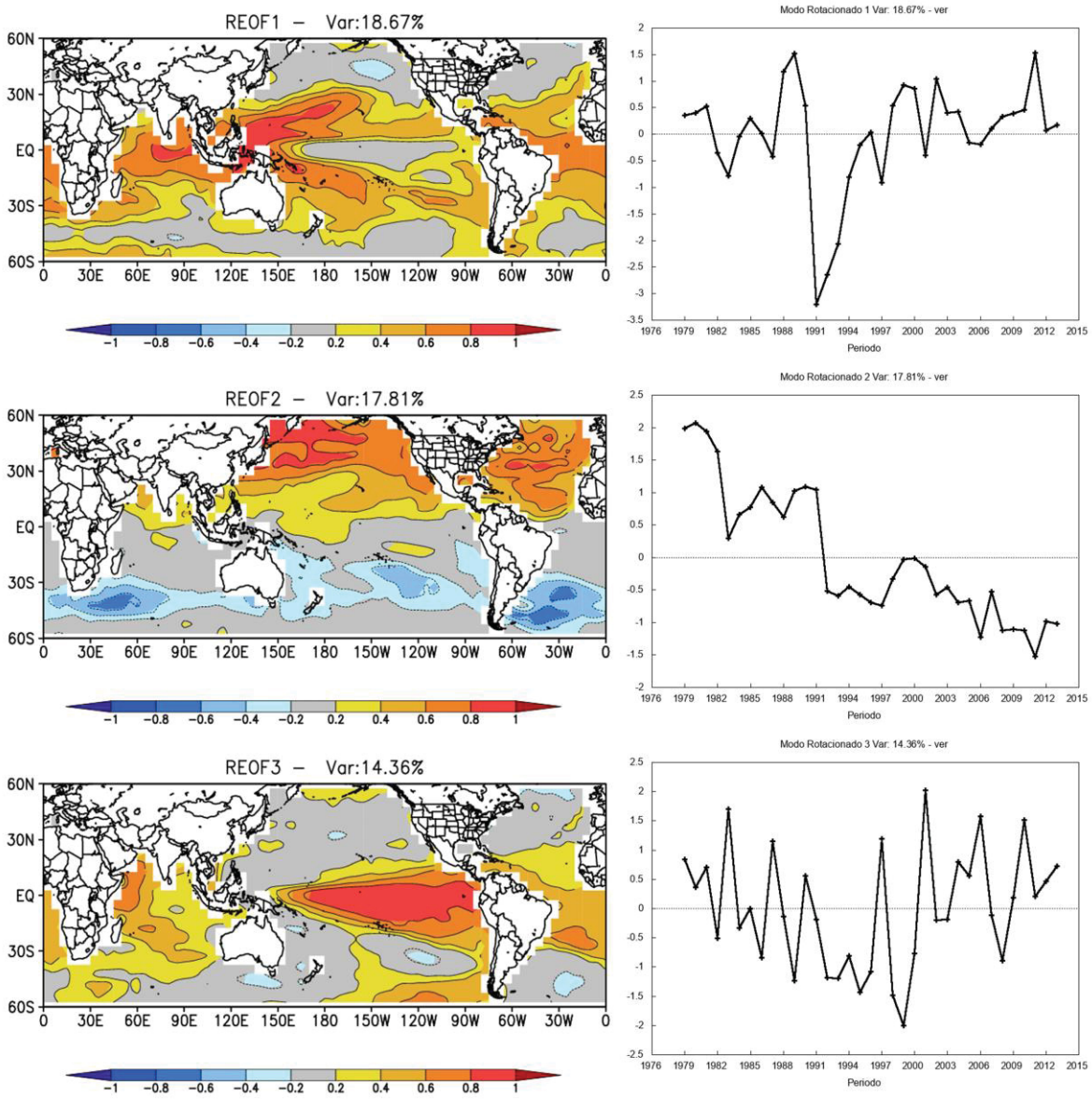
Comparando os três primeiros modos de TSM na primavera e verão obtidos com o ensemble de todos os 10 modelos que simularam o modo ENOS (FIGURA 64 e FIGURA 65) com o ensemble apenas dos 7 que tiveram o melhor desempenho nesta simulação (FIGURA 74 e FIGURA 75), não há grandes diferenças entre os modos. Nos 7 melhores aparecem um pouco mais anomalias de sinal oposto no Pacífico oeste e as tendências de TSM na primavera são um pouco mais fracas. Portanto, o melhor modelo (CESM2) parece ter desempenho melhor que o ensemble dos 7 melhores em reproduzir o modo ENOS e até os outros modos (FIGURA 62 e FIGURA 63).

FIGURA 74 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA RESULTADOS DA MÉDIA DO CONJUNTO DE SETE MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 75 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA RESULTADOS DA MÉDIA DO CONJUNTO DE SETE MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

Os anos EN e LN simulados pela média do conjunto dos 7 modelos que melhor simulam o ENOS são apresentados na TABELA 33 abaixo para cada estação e os anos em comum entre as estações.

TABELA 33 – LISTAS DE ANOS EN E LN RESULTANTES DA MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM ENOS, PARA PRIMAVERA, VERÃO E ANOS EM COMUM ENTRE AS ESTAÇÕES.

Evento	Primavera	Verão	Comum
EN	1979, 1981, 1983, 1987, 1991, 1997, 2001, 2006, 2010, 2014	1979, 1983, 1987, 1997, 2001, 2004, 2006, 2010	1979, 1983, 1987, 1997, 2001, 2006, 2010
LN	1989, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1999, 2000, 2008	1986, 1989, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1998, 1999, 2000, 2008	1989, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1999, 2000, 2008

FONTE: A autora (2022).

4.7 CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO

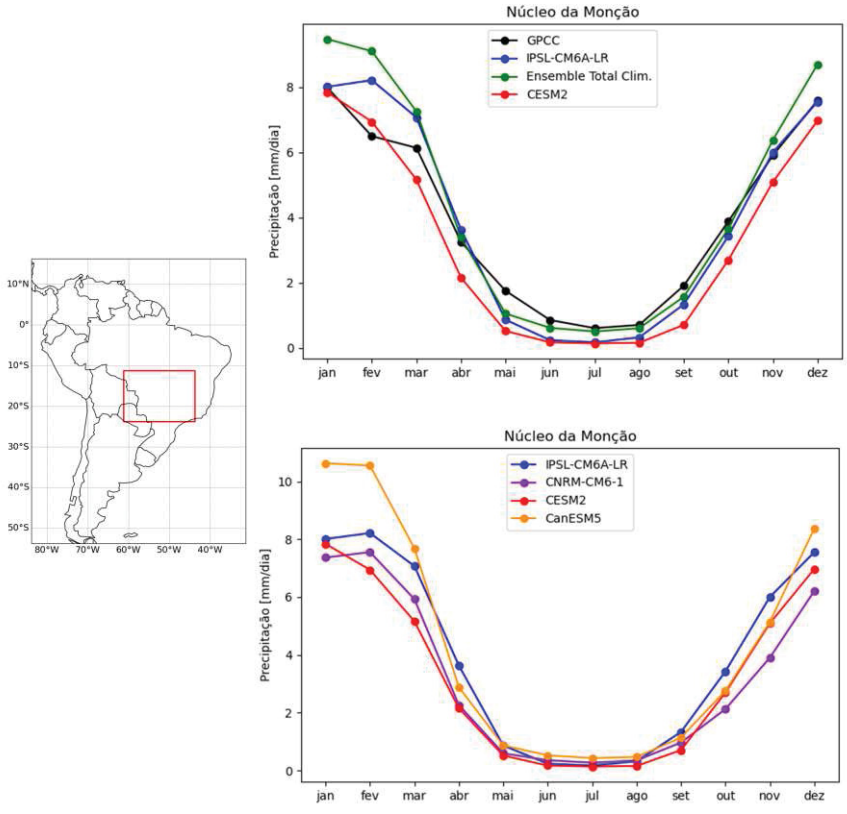
Embora os modelos tenham sido avaliados quanto a seus desempenhos em simular a precipitação no clima presente, as análises foram conduzidas com base em médias para o domínio total da AS. É de suma importância, no entanto, o estudo da climatologia de precipitação em regiões mais específicas como, por exemplo, as regiões mais afetadas pelo SMAS e regiões que sofrem grandes impactos das chuvas ou secas causadas pela variabilidade climática natural. Esse conhecimento é necessário para a agricultura, a produção de energia hidroelétrica, a prevenção de desastres naturais, dentre tantos outros setores. Portanto, é necessário entender como os modelos reproduzem a variação da precipitação nessas regiões no clima presente para que as mudanças projetadas para o futuro possam ser estudadas.

Para tanto, foram calculados ciclos anuais de precipitação sobre 7 regiões específicas. Para cada região serão mostrados os ciclos da precipitação observada (GPCC), da média do conjunto de todos os modelos e do modelo IPSL-CM6A-LR, que mostraram melhor desempenho ao simular o clima presente, além do modelo CESM2, que apresentou melhor desempenho na simulação de ENOS. Também serão mostradas comparações entre os ciclos do melhor e do pior modelo individual na simulação da climatologia (IPSL-CM6A-LR e CNRM-CM6-1) e do melhor e pior modelo na simulação de ENOS (CESM2 e CanESM5). Resultados para a média do conjunto dos modelos que melhor simulam o ENOS serão mostrados em comparações entre o clima presente e futuro apresentadas nos próximos capítulos.

A FIGURA 76 apresenta o ciclo anual sobre o núcleo da monção, mostrado do lado esquerdo da figura. É possível notar que os modelos mostrados e a média do

conjunto são capazes de reproduzir bem o ciclo característico do SMAS, com o verão (DJF) bastante chuvoso e o inverno (JJA) muito seco. Para essa região, os modelos e a média do conjunto mostram um comportamento bastante semelhante nos meses de inverno, subestimando a precipitação nesse período em comparação com o observado. O CESM2 mostra o comportamento mais próximo do observado no início do ano, ao contrário da média do *ensemble*. No final do ano, o modelo que mais se aproxima do observado é o IPSL-CM6A-LR. Pelo painel inferior da FIGURA 76, é possível notar que as diferenças entre os modelos de melhor e pior desempenho na simulação da climatologia e de ENOS são muito pequenas na estação seca e maiores na estação de monção, entre outubro e março/abril. Não é possível dizer que nesta região a média de conjunto tem desempenho melhor que qualquer modelo em particular, nem em termos médios. O melhor modelo para a climatologia (IPSL-CM6A-LR) é melhor do que a média de conjunto em reproduzir o ciclo anual observado (FIGURA 76, painel superior).

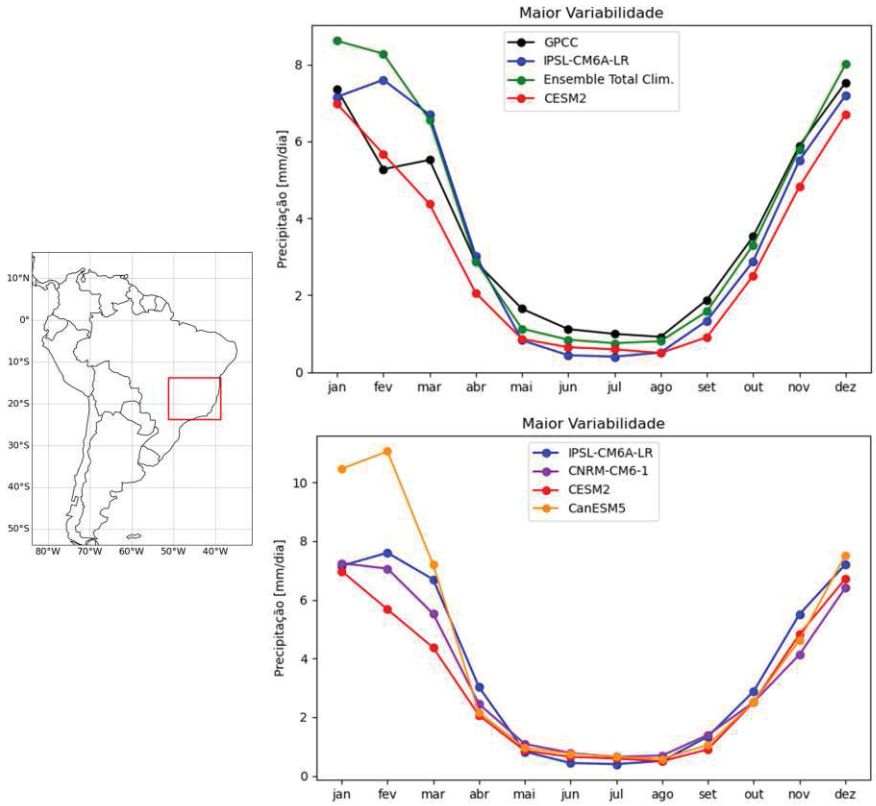
FIGURA 76 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE O NÚCLEO DA MONÇÃO (PAINÉIS À DIREITA), NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA.



FONTE: A autora (2022).

Para a região de maior variabilidade da monção, os ciclos anuais calculados são mostrados na FIGURA 77. Para essa região, os modelos também simulam o inverno mais seco e o verão mais úmido. Há maior convergência entre os modelos na primavera, em comparação à região núcleo da monção na FIGURA 76. Tanto o painel superior como o inferior mostram que, de abril a dezembro, a precipitação simulada pelos modelos e a obtida da média do conjunto é bastante semelhante, embora os modelos tendam a subestimar a precipitação em comparação com os dados observados. As maiores diferenças encontram-se de dezembro a março (verão), quando a média do ensemble e, principalmente, o CanESM5, superestimam a precipitação observada.

FIGURA 77 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A REGIÃO DE MAIOR VARIABILIDADE DA MONÇÃO (PAINÉIS À DIREITA) NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA.

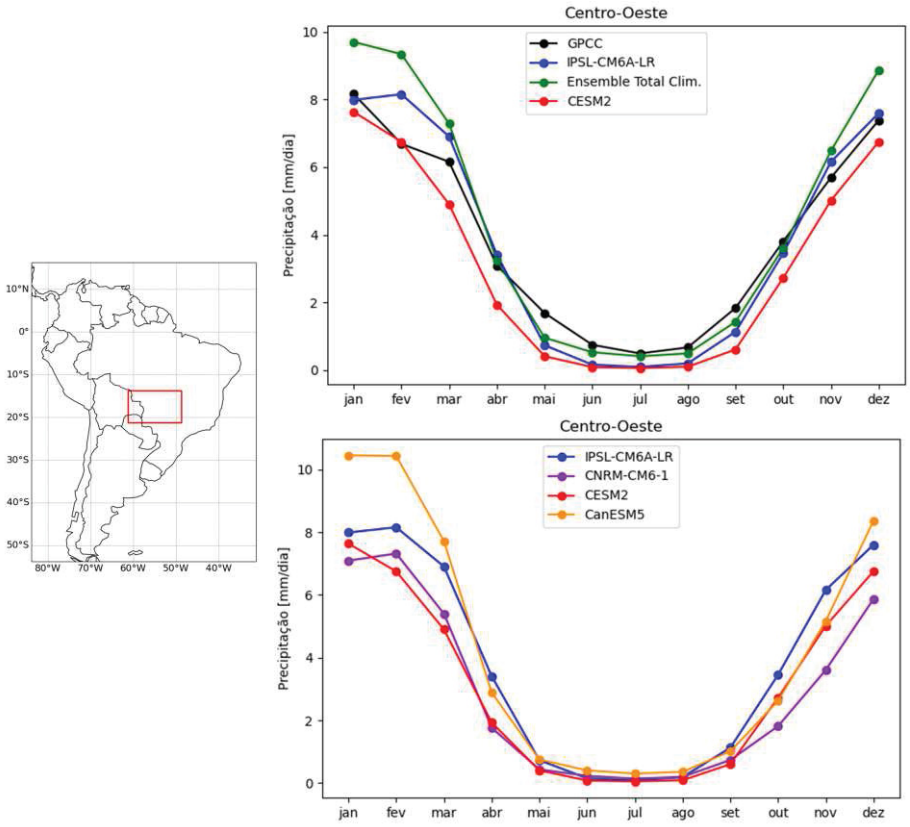


FONTE: A autora (2022).

A terceira região avaliada foi o Centro-Oeste do Brasil, uma região bastante afetada pelo regime de monção (FIGURA 78). O comportamento é muito semelhante ao observado para o núcleo da monção na FIGURA 76. É possível notar que novamente os modelos mostram o aumento da precipitação nos meses de verão e

diminuição durante o inverno austral, simulando para esse período um clima bastante seco. Durante o verão, os modelos IPSL-CM6A-LR e CESM2 mostram o ciclo próximo do observado, enquanto a média do *ensemble* de modelos se aproxima mais do observado de abril a outubro. Ainda, para os meses do inverno os modelos apresentam valores muito próximos entre si. A curva mostrada pelo CESM2 (melhor desempenho ao simular o ENOS) chega a coincidir com a curva apresentada pelo CanESM5 (pior desempenho ao simular ENOS) durante outubro e novembro.

FIGURA 78 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE O CENTRO-OESTE DO BRASIL (PAINÉIS À DIREITA) NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA.

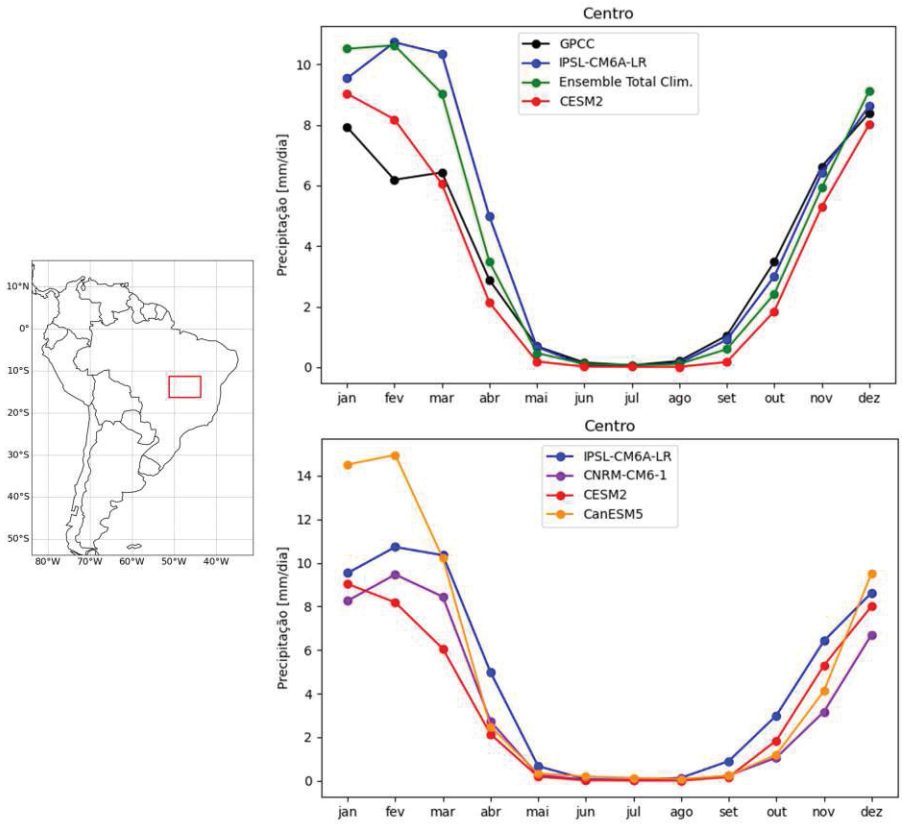


FONTE: A autora (2022).

Os ciclos anuais também foram obtidos para uma região próxima ao Centro do Brasil (FIGURA 79). Esta região também sofre influência do SMAS, apresentando verões bastante úmidos e invernos mais secos. Do painel superior da FIGURA 79, vê-se que os modelos e a média do conjunto simulam a precipitação próxima da observada de maio a dezembro. A partir de janeiro, tanto o IPSL-CM6A-LR como a média do ensemble mostram excesso de precipitação na região. O CESM2, superestima a precipitação observada em janeiro e fevereiro e a subestima de março

em diante. O modelo CanESM5 simula muita precipitação no início do ano, chegando a valores acima de 14 mm/dia, enquanto o observado mostra valores de 6 a 8 mm/dia. Contudo, para o inverno, o CanESM5 e também o CNRM-CM6-1 mostram os mesmos resultados que os apresentados por modelos que obtiveram melhores desempenhos.

FIGURA 79 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE O CENTRO DO BRASIL (PAINÉIS À DIREITA) NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA.

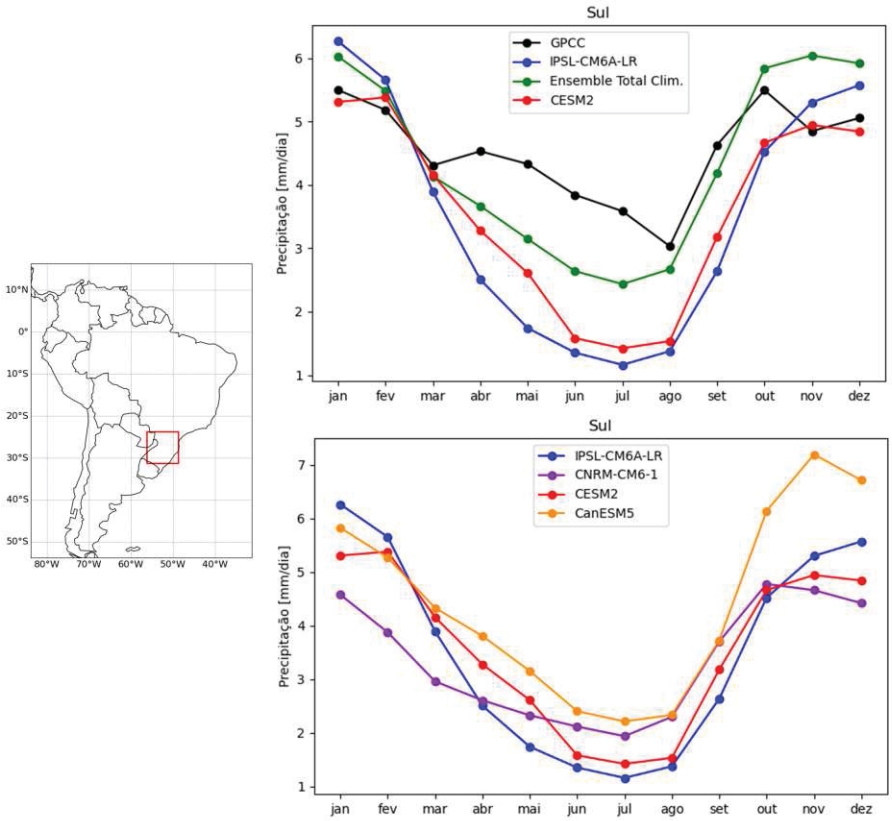


FONTE: A autora (2022).

Para o Sul do Brasil, região que faz parte de SESA, os ciclos anuais são apresentados na FIGURA 80. Do painel superior é possível notar que de março a setembro os dois modelos e a média do conjunto subestimam bastante a precipitação observada. Em outubro, os valores apresentados pelo IPSL-CM6A-LR e pelo CESM2 são muito próximos e a média do *ensemble* ultrapassa os valores observados. De novembro a março o modelo CESM2 é o que mais se aproxima do observado e, de novembro a fevereiro, o IPSL-CM6A-LR e a média do ensemble superestimam a precipitação do GPCC. Do painel inferior, nota-se que, para essa região, as curvas apresentadas pelos melhores modelos não se aproximam das curvas mostradas pelos piores modelos, com exceção do mês de outubro. De maneira geral, os modelos

apresentados mostram para o Sul do Brasil um ciclo de precipitação com características da precipitação de monção, embora a região não faça parte do domínio do SMAS.

FIGURA 80 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE O SUL DO BRASIL (PAINÉIS À DIREITA) NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA.

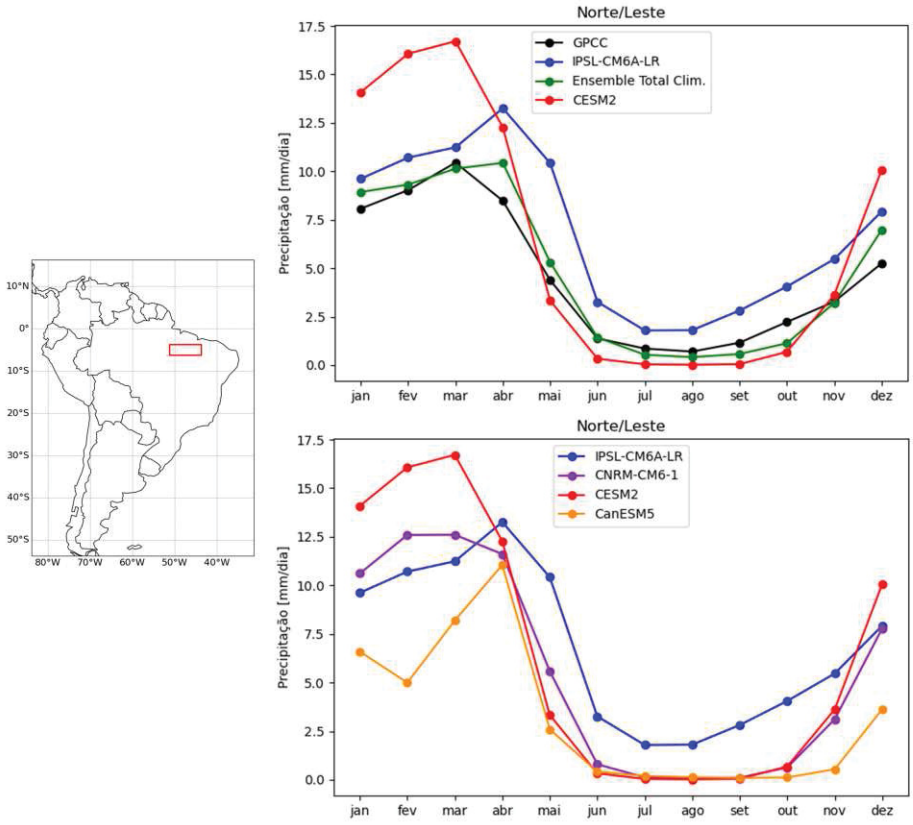


FONTE: A autora (2022).

Para o Norte do Brasil foram analisadas duas regiões: uma mais a leste (Norte/Leste) e outra mais a oeste, na região Amazônica (Norte/Oeste). Os ciclos apresentados para a região Norte/Leste são mostrados na FIGURA 81, indicando início mais tardio da estação chuvosa em relação às outras regiões de monção. A curva resultante da média do conjunto de modelos foi a que apresentou mais proximidade com a curva obtida de dados observados. O modelo CESM2 mostra excesso de precipitação de dezembro a abril, especialmente no pico do verão, quando simula uma precipitação de quase 17,5 mm/dia. Já o modelo IPSL-CM6A-LR, superestima a precipitação observada ao longo de todo o ano, embora siga a variação anual relativa observada. De acordo com o painel inferior, de novembro a março as

curvas apresentadas pelo CESM2 e CanESM5 mostram grandes diferenças, com o CESM2 simulando mais precipitação em todos esses meses.

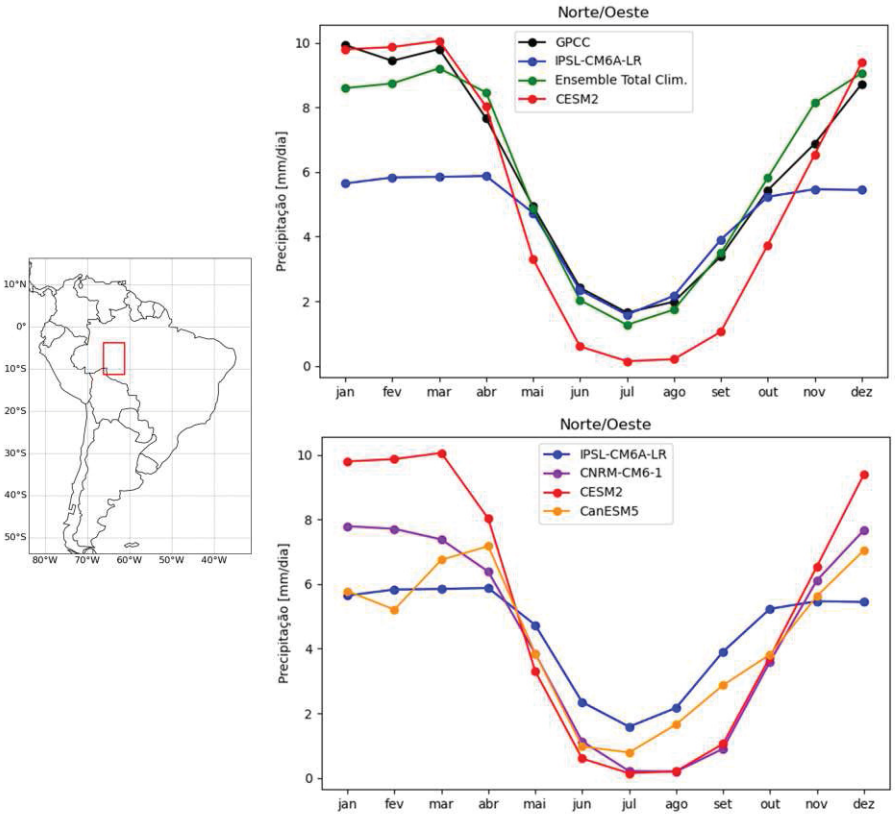
FIGURA 81 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A PARTE LESTE DO NORTE DO BRASIL (PAINÉIS À DIREITA) NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA.



FONTE: A autora (2022).

Para a região Norte/Oeste, os ciclos anuais são mostrados na FIGURA 82. Do painel superior nota-se que a curva apresentada pela média do conjunto de modelos foi a mais próxima da curva obtida de dados observados ao longo do ano, com exceção do modelo CESM2 nos meses janeiro, fevereiro, março, abril e novembro. Esse mesmo modelo mostra pouca precipitação no inverno. Já a precipitação simulada pelo IPSL-CM6A-LR, se distancia bastante da observada na estação da monção, estando mais próxima nos meses do inverno austral. Do painel inferior é possível perceber que a precipitação simulada pelo CNRM-CM6-1 (pior modelo na simulação da climatologia) é bastante semelhante à apresentada pelo CESM2 (melhor modelo na simulação de ENOS) de maio a novembro. Com exceção do IPSL-CM6A-LR, os modelos tendem a subestimar a precipitação de inverno.

FIGURA 82 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A PARTE OESTE DO NORTE DO BRASIL (PAINÉIS À DIREITA) NA REGIÃO MARCADA NO PAINEL À ESQUERDA.



FONTE: A autora (2022).

De maneira geral, os 4 modelos e a média do conjunto de todos os 11 modelos representam as características da precipitação observada, em termos da variação do ciclo anual, principalmente nas regiões afetadas pelo SMAS, mostrando aumento da precipitação no verão e diminuição durante o inverno. Os modelos são melhores ao representarem a precipitação de inverno e divergem mais nos meses da estação chuvosa. Vale ressaltar que para os cálculos dos ciclos anuais não foram retiradas tendências dos dados iniciais.

5 PROJEÇÕES DOS MODELOS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5

5.1 PRECIPITAÇÃO

Climatologias de precipitação para os 11 modelos selecionados (TABELA 1) e para a média do conjunto de modelos foram também obtidas para o cenário futuro SSP2-4.5, de emissões intermediárias de GEE. Considerando a média das rodadas de cada modelo, foram calculadas climatologias mensais e sazonais para o período de 2065 a 2100.

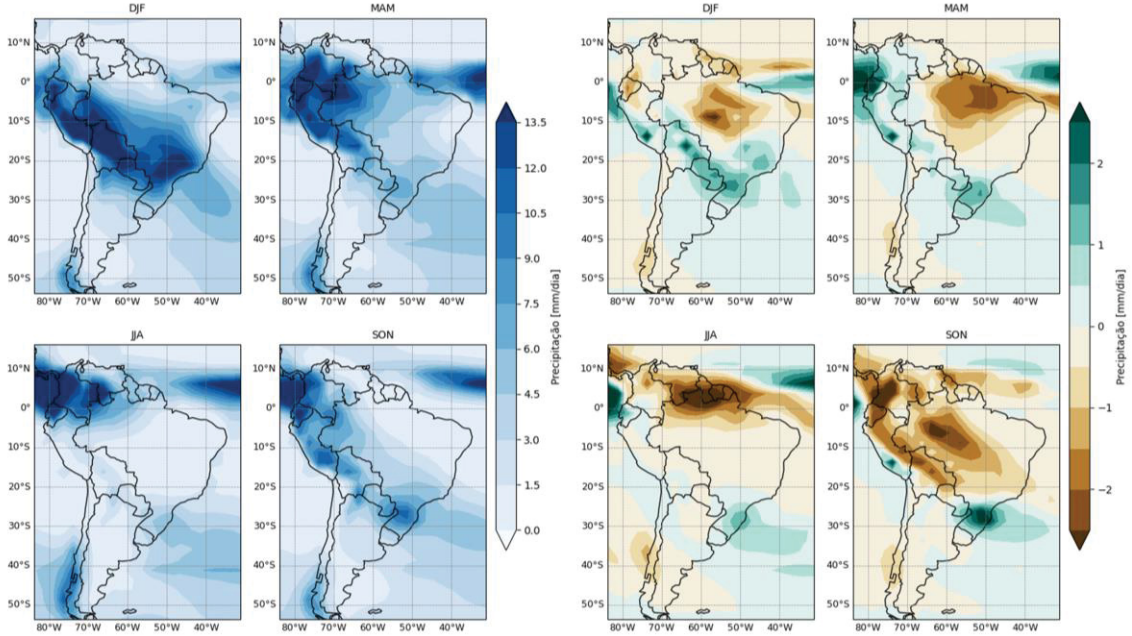
De maneira geral, todos os modelos projetam no futuro o ciclo anual da precipitação de forma semelhante ao clima presente, com aumento da precipitação no centro do Brasil a partir de novembro, atingindo um pico nos meses do verão austral e decaindo até o inverno austral, quando a precipitação mais intensa se desloca para próximo do equador e a precipitação total na AS atinge valores mínimos.

Em comparação com as climatologias de precipitação de cada modelo e média do conjunto obtidas para o clima presente, as climatologias calculadas neste cenário mostram variações principalmente na intensidade da precipitação simulada, não apresentando grandes variações nos padrões de precipitação de cada modelo. Assim, se um modelo apresenta a precipitação máxima de verão localizada no Sudeste do Brasil, por exemplo, neste cenário geralmente a precipitação aumenta ou diminui nessa mesma região no verão.

O modelo ACCESS-ESM1-5 (FIGURA 83), em relação ao clima presente (FIGURA 13), mostra aumento da precipitação no Sudeste do Brasil e diminuição na região Amazônica durante o verão austral. No inverno, o modelo apresenta diminuição da precipitação sobre o norte da AS, próximo do equador. Contudo, as mudanças são mais evidentes durante a primavera austral, quando o modelo mostra aumento da precipitação no Sul do Brasil e diminuição na região Amazônica e nos Andes.

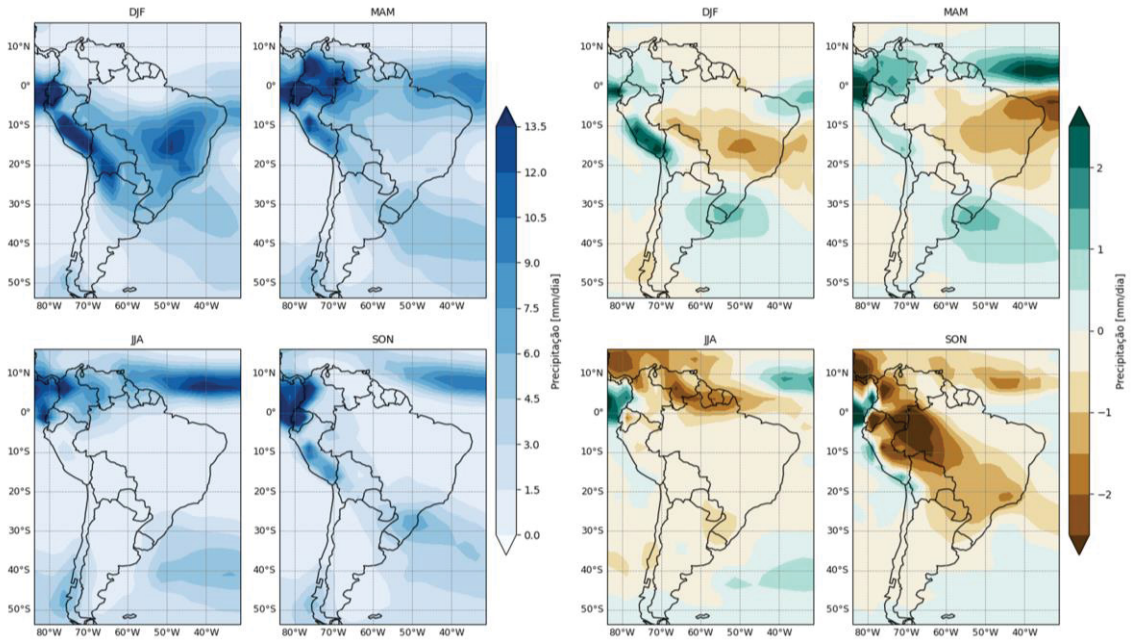
Durante a primavera austral, o modelo CanESM5 (FIGURA 84) projeta redução de precipitação sobre grande parte do continente em comparação com o clima presente (FIGURA 15), principalmente no oeste da região Amazônica. Para o verão austral, o modelo mostra diminuição da precipitação mais intensa, no centro-leste do Brasil. Ao mesmo tempo, ainda durante o verão, o modelo projeta aumento de precipitação sobre os Andes.

FIGURA 83 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO ACCESS-ESM1-5 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

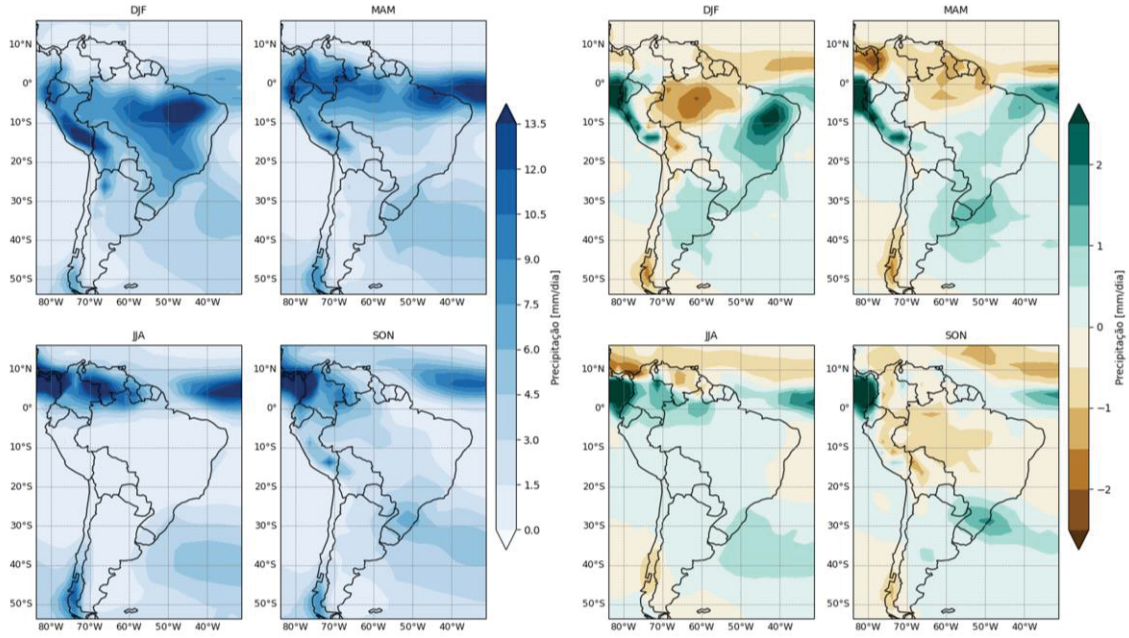
FIGURA 84 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CANESM5 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

O modelo CESM2 (FIGURA 85) projeta aumento da precipitação de verão no nordeste e centro-leste do Brasil e diminuição na região Amazônica, em comparação com o clima presente (FIGURA 17). Essa diminuição da precipitação sobre a Amazônia também acontece durante o outono e a primavera austral, porém com menor intensidade. Ainda durante a primavera, o modelo mostra aumento de precipitação no sul do Brasil. Além do CESM2, o modelo CNRM-CM6-1 (FIGURA 86) também mostra aumento de precipitação no Nordeste do Brasil durante o verão austral, bem como nos Andes, com relação ao clima presente (FIGURA 18). Para o inverno austral, o modelo quase não apresenta alterações.

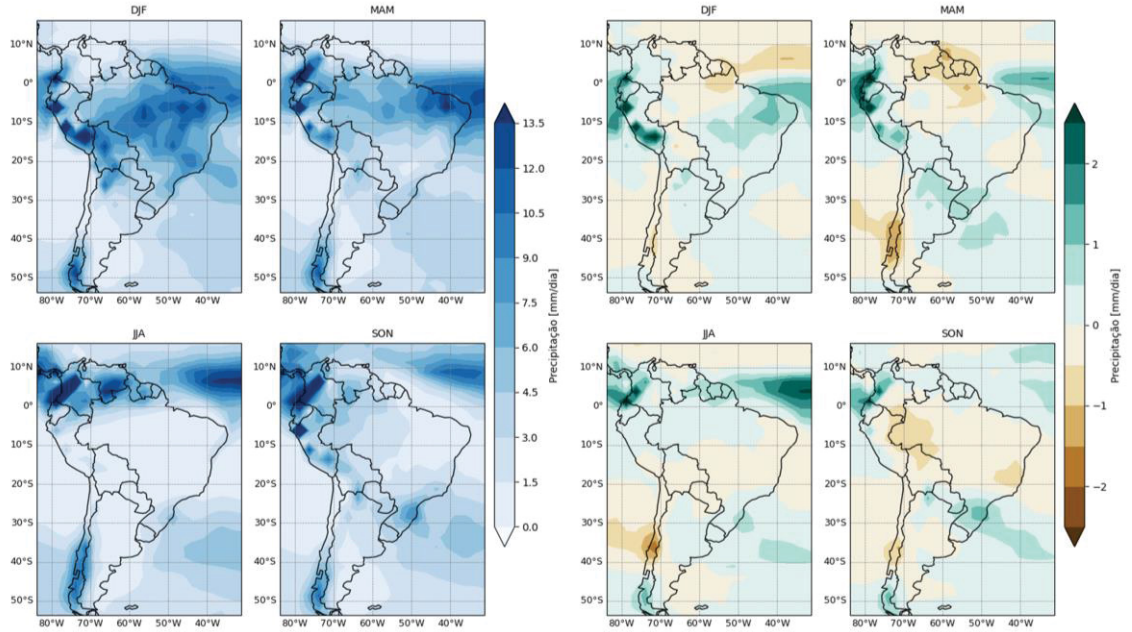
FIGURA 85 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

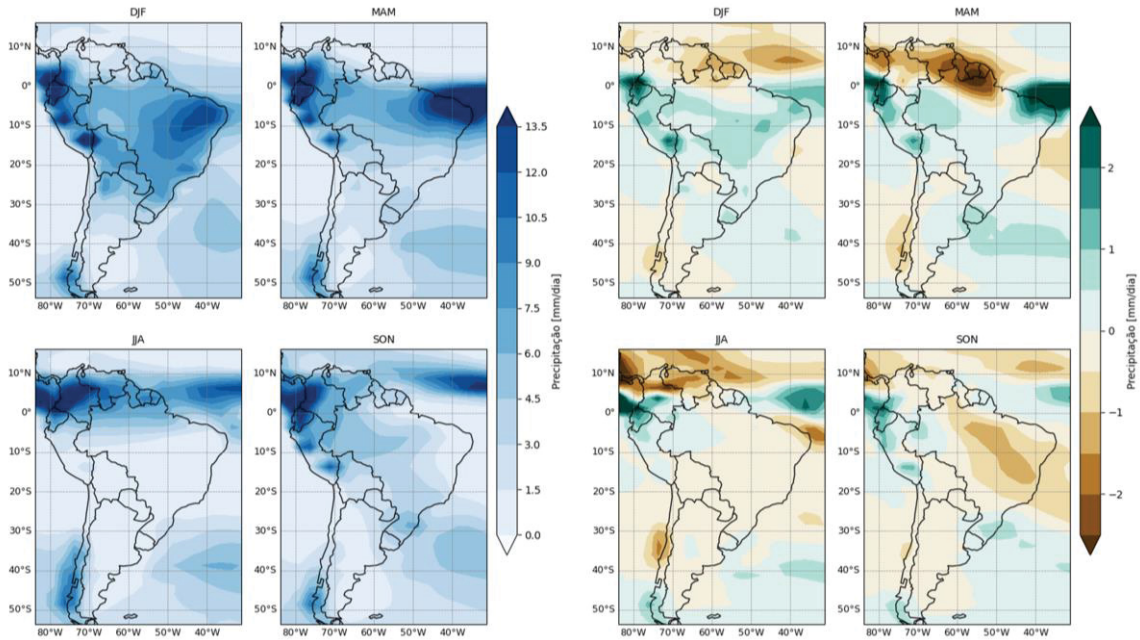
O modelo IPSL-CM6A-LR (FIGURA 87), que apresentou melhor desempenho ao simular a climatologia presente, também mostra aumento de precipitação no Nordeste do Brasil durante o verão, em comparação com a FIGURA 19. Na primavera austral, o modelo apresenta aumento de precipitação no Sul do Brasil e diminuição no centro-leste do Brasil e leste da região Amazônica.

FIGURA 86 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CNRM-CM6-1 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 87 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.

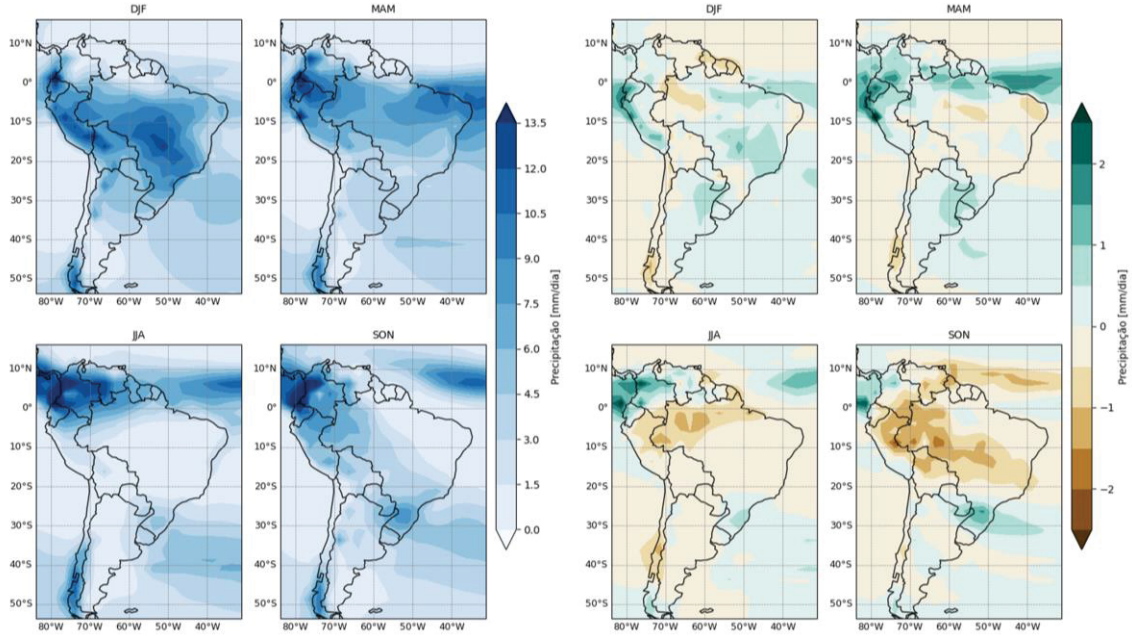


FONTE: A autora (2022).

Durante o verão austral, o modelo EC-Earth3-Veg (FIGURA 88) projeta aumento da precipitação na região de precipitação mais intensa no clima presente (FIGURA 23), no centro do Brasil. Por outro lado, na primavera austral, o EC-Earth3-

Veg mostra aumento da precipitação no Sul do Brasil e diminuição na região Amazônica.

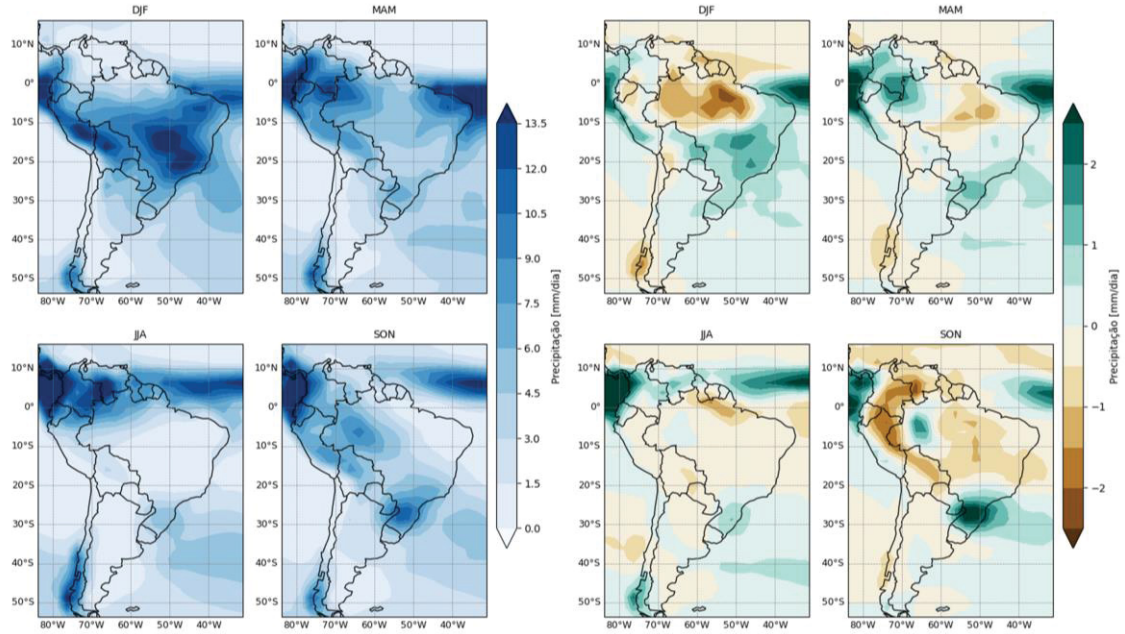
FIGURA 88 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

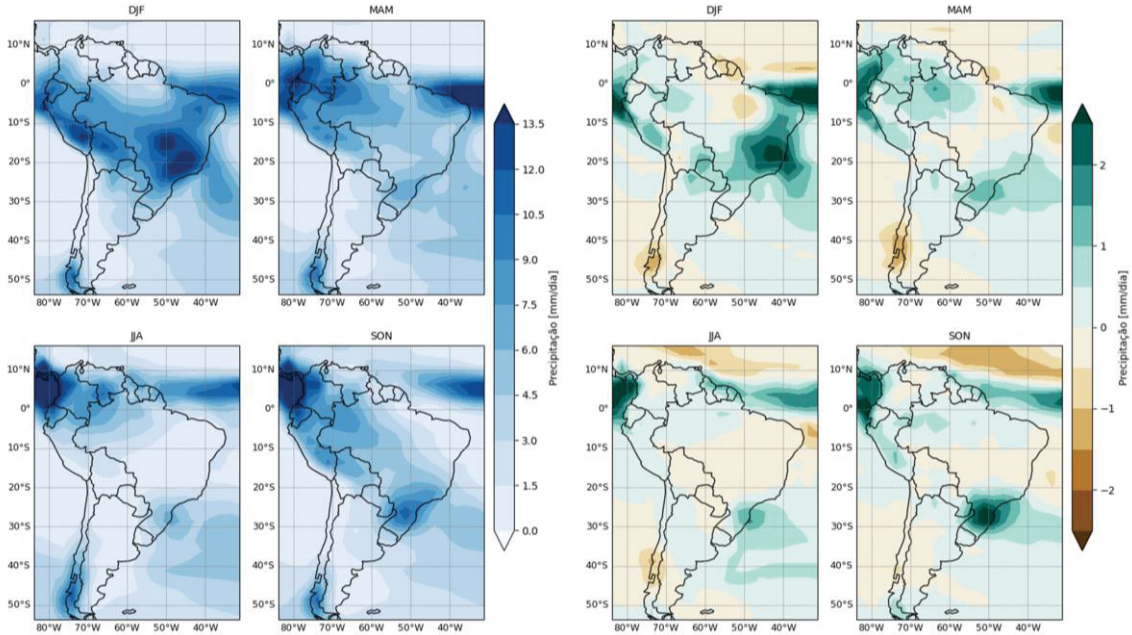
O modelo HadGEM3-GC31-LL (FIGURA 89) exibe no verão austral aumento da precipitação no Sudeste, Centro e Nordeste do Brasil, ao mesmo tempo em que mostra diminuição da precipitação na região Amazônica, em comparação com o clima presente (FIGURA 20). Durante o outono, o modelo mostra aumento de precipitação no Noroeste da AS, próximo do equador e no Sul do Brasil, onde há aumento da precipitação também nas demais estações. O modelo KACE-1-0-G (FIGURA 90) apresenta para o verão austral aumento de precipitação semelhante ao simulado pelo HadGEM3-GC31-LL, nas regiões Sudeste, Centro e Nordeste do Brasil em comparação com o que simula para o clima presente (FIGURA 16). No outono austral, o KACE-1-0-G projeta aumento de precipitação no Sul do Brasil e na região Amazônica. O aumento de precipitação no Sul do Brasil também é projetado para a primavera austral.

FIGURA 89 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 90 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO KACE-1-0-G NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.

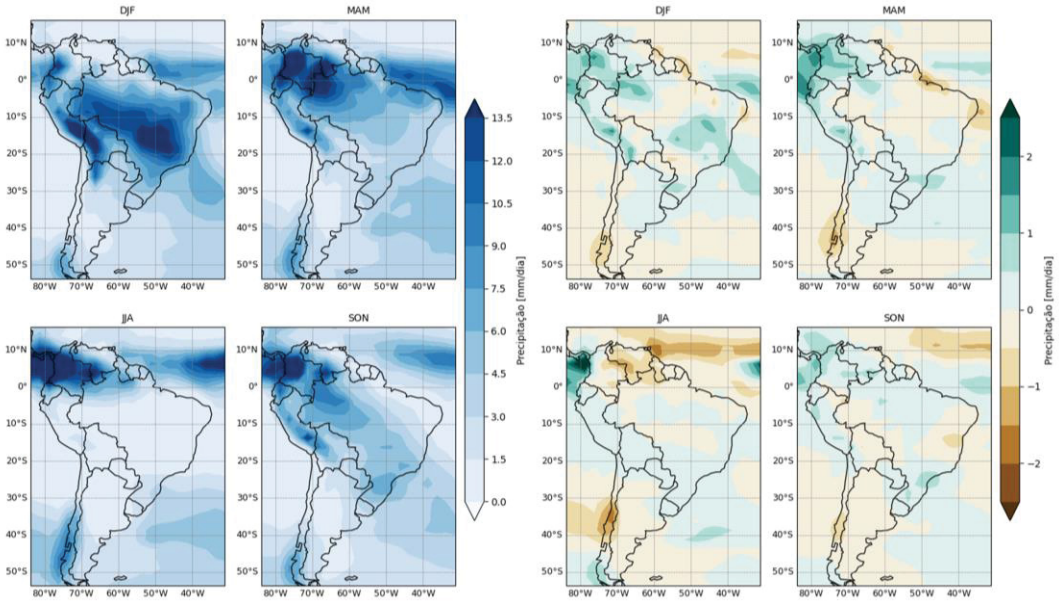


FONTE: A autora (2022).

Os modelos MIROC6 (FIGURA 91) e MPI-ESM1-2-HR (FIGURA 92) mostram para este cenário poucas alterações com relação às climatologias para o período presente (FIGURA 21 e FIGURA 22). De maneira geral, os modelos simulam aumento

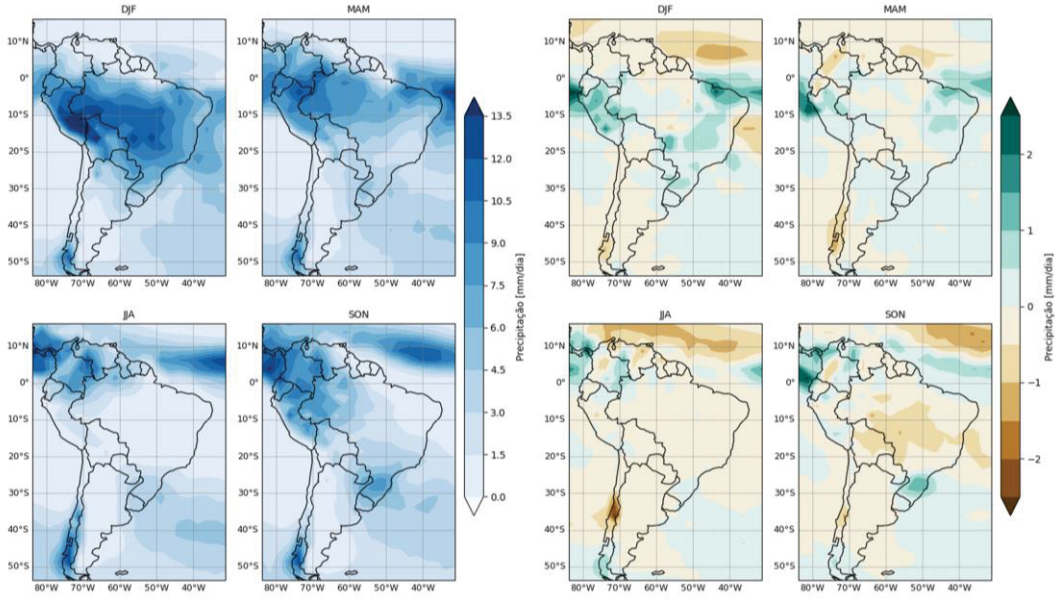
de precipitação próximo ao centro-leste do Brasil e nos Andes no verão austral e, especificamente, o MPI-ESM1-2-HR mostra também aumento da precipitação no Sul de Brasil na primavera austral.

FIGURA 91 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MIROC6 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

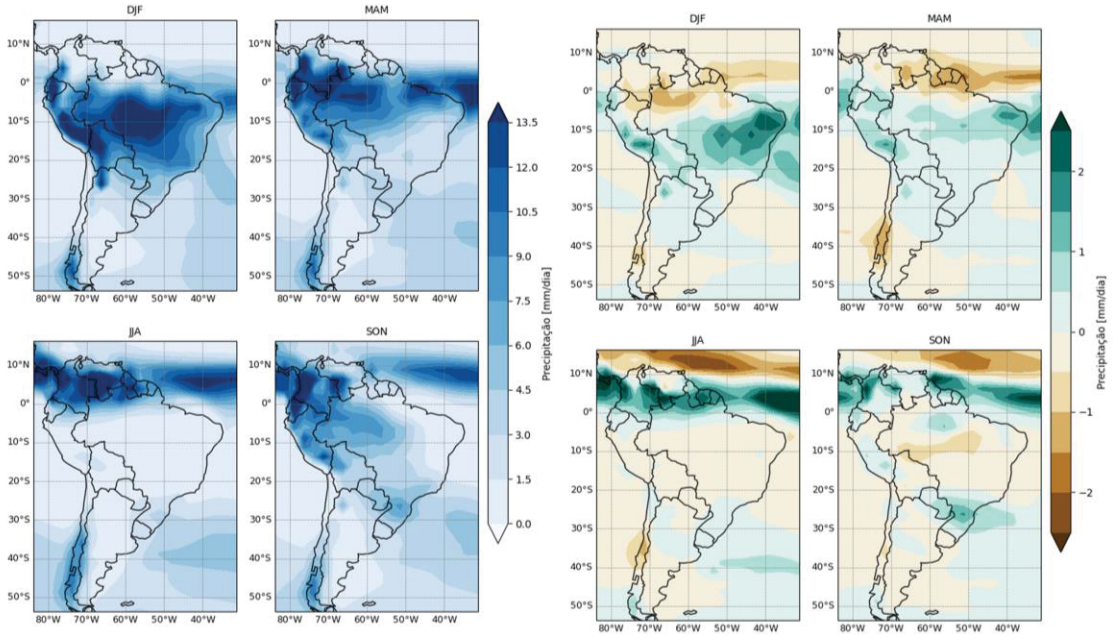
FIGURA 92 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MPI-ESM1-2-HR NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

Para o verão austral, em comparação com a FIGURA 14, o modelo MRI-ESM2-0 (FIGURA 93) projeta aumento de precipitação sobre a região Amazônica e sobre o Centro e Nordeste do Brasil. Além disso, ainda durante o verão, o modelo mostra aumento de precipitação nos Andes. No inverno austral, o MRI-ESM2-0 mostra aumento de precipitação no norte da AS, ao norte do equador e, na primavera austral, projeta aumento de precipitação no Sul do Brasil.

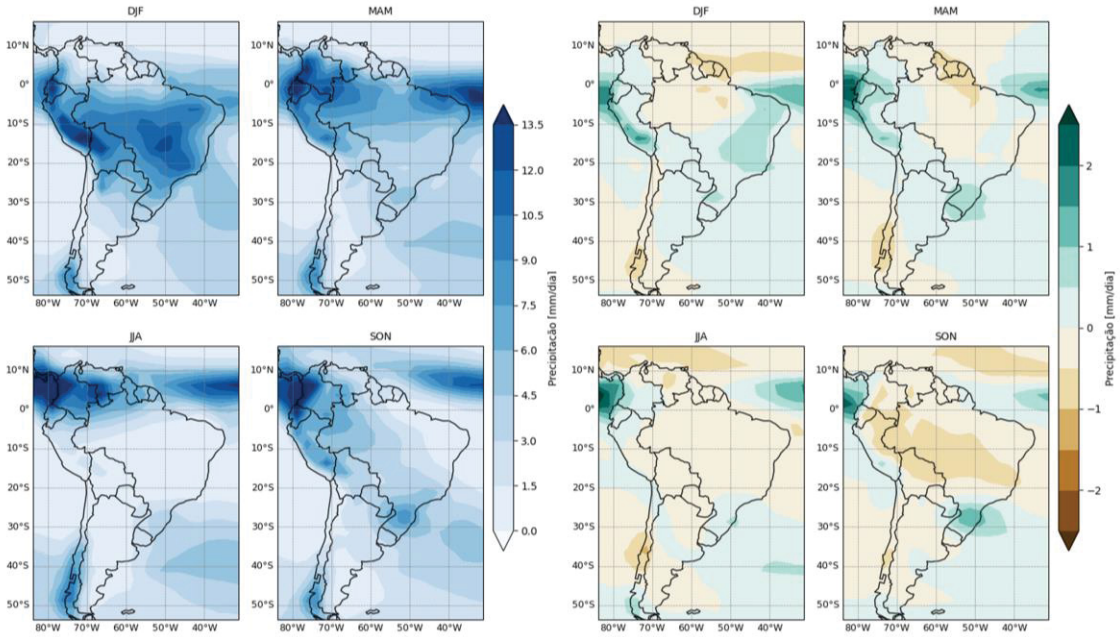
FIGURA 93 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MRI-ESM2-0 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

A média do conjunto de todos os modelos (FIGURA 94) projeta para o cenário futuro SSP2-4.5 o aumento da precipitação no centro-leste do Brasil no verão austral e na região de máxima precipitação de verão no clima presente, no Centro do Brasil (FIGURA 24). No verão e outono também aumenta a precipitação nos Andes e, para o outono e a primavera austral, no Sul do Brasil. Durante a primavera, a média do *ensemble* mostra redução da precipitação na região Amazônica e no centro do continente.

FIGURA 94 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

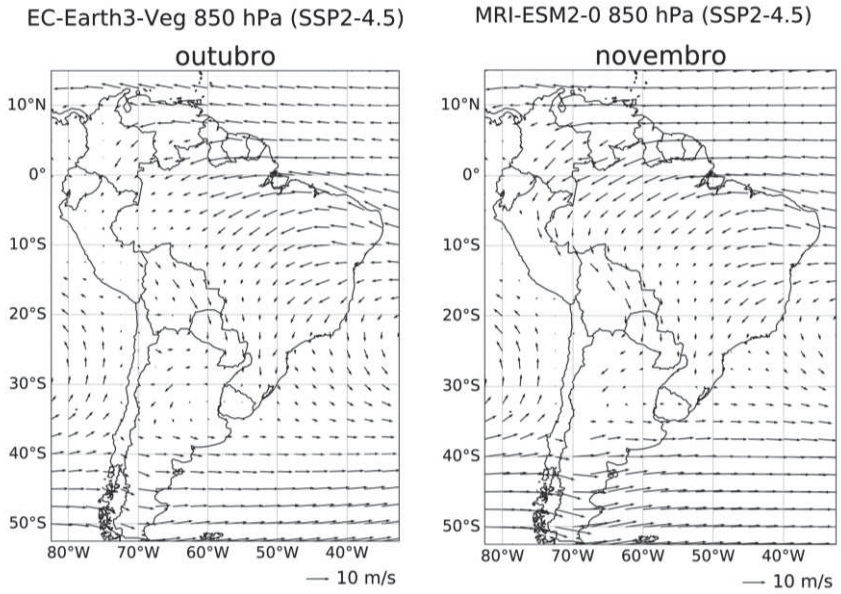
5.2 CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA

Seguindo a análise do clima presente, climatologias de circulação atmosférica em baixos (850 hPa) e altos (200 hPa) níveis foram obtidas no cenário futuro SSP2-4.5 para os os 11 modelos selecionados do CMIP6 e para a média do conjunto de modelos. Para baixos níveis (850 hPa), de maneira geral, os modelos simulam no clima futuro as principais características reproduzidas no clima presente. Todos os modelos mostram a mudança na direção do vento equatorial de sudeste/leste no inverno para leste/nordeste no verão austral. Ao entrar no continente, os ventos são desviados pelos Andes, adquirindo direção noroeste e, então, circulação ciclônica em torno da baixa do Chaco. No outono austral, os modelos mostram o enfraquecimento do vento equatorial de nordeste.

Para o clima presente (1979-2014), os modelos mostraram diferenças entre si quanto ao mês em que o vento equatorial alterava sua direção para vento de nordeste, simulando essa mudança na primavera austral. Para o cenário SSP2-4.5, as projeções dos modelos e da média do conjunto de modelos também mostram algumas diferenças quanto ao início da circulação de monção. A FIGURA 95 mostra

exemplos de dois modelos nos quais essas diferenças ocorrem em outubro e em novembro.

FIGURA 95 – CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS DE MODELOS QUE SIMULAM EM OUTUBRO E NOVEMBRO A ALTERAÇÃO NA DIREÇÃO DO VENTO EQUATORIAL QUE INCIDE NO CONTINENTE (CENÁRIO SSP2-4.5).



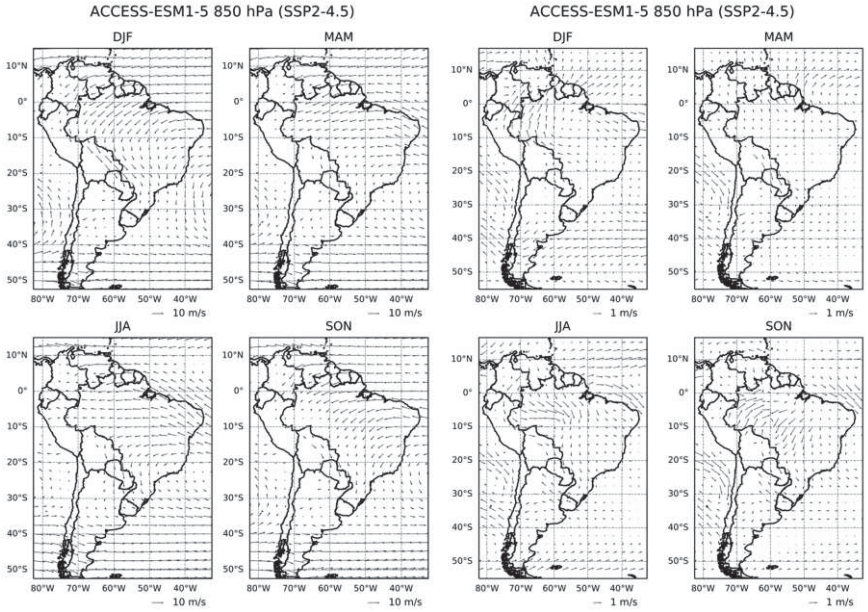
FONTE: A autora (2022).

Em comparação com as rodadas históricas, no cenário SSP2-4.5 os modelos mostram poucas diferenças na velocidade do vento em baixos níveis na AS. As mudanças são mais evidentes para os modelos ACCESS-ESM1-5 (FIGURA 96) e HadGEM3-GC31-LL (FIGURA 97) no verão austral, quando é mostrado divergência na região Amazônica, explicando a redução da precipitação nessa região (FIGURA 83 e FIGURA 89). Para a primavera, as diferenças também mostram convergência dos ventos em baixos níveis no Sul do Brasil, onde os modelos mostram aumento da precipitação neste cenário. Os campos de vento sazonais em baixos níveis simulados no clima presente e cenários futuros pelos modelos são apresentados no Anexo 2.

Para a circulação de altos níveis (200 hPa), de maneira geral, todos os modelos e a média do conjunto de modelos apresentam no cenário futuro também as principais características da circulação simuladas no clima presente. Assim, os modelos mostram o surgimento de um sistema de alta pressão sobre a Amazônia na primavera austral, cujo centro se desloca para sul no verão, localizando-se sobre a Bolívia. Durante o verão austral, os modelos representam a Alta da Bolívia e, com o

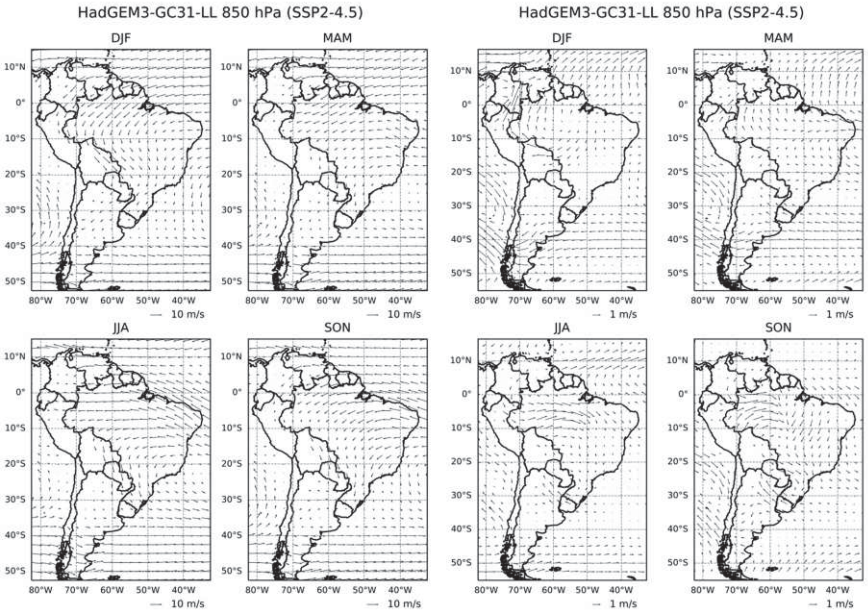
final do verão, mostram o deslocamento da circulação anticiclônica para norte e seu enfraquecimento no outono.

FIGURA 96 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS (850 hPa) PARA O MODELO ACCESS-ESM1-5 NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

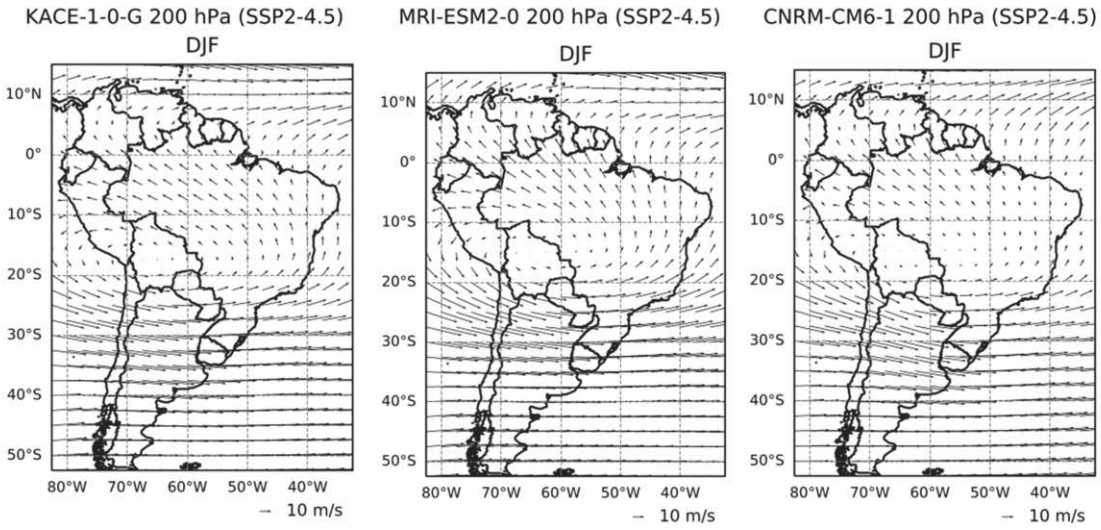
FIGURA 97 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS (850 hPa) PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CENÁRIO SSP2-4.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP2-4.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

Analogamente aos resultados para o clima presente (FIGURA 31), no cenário SSP2-4.5 ocorrem diferenças entre algumas características da Alta da Bolívia, de acordo com a posição e a intensidade da máxima precipitação de verão (FIGURA 98). O modelo KACE-1-0-G mostra a circulação anticiclônica com evidente curvatura no sudeste do Brasil, onde simula a máxima precipitação de verão (FIGURA 90). Já o modelo MRI-ESM2-0, apresenta o centro da AB mais para norte, representando a máxima precipitação de verão sobre o Noroeste da AS neste cenário (FIGURA 93). Em comparação com o MRI-ESM2-0, o modelo CNRM-CM6-1 mostra a precipitação de verão menos intensa (FIGURA 86), logo, a circulação anticiclônica simulada pelo modelo também é mais fraca.

FIGURA 98 – EXEMPLOS DE CAMPOS DE VENTO EM ALTOS NÍVEIS DE MODELOS QUE MOSTRAM ALTERAÇÕES NA CIRCULAÇÃO ANTICILÔNICA NO VERÃO AUSTRAL NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).

Em comparação com o período presente, as climatologias de circulação em altos níveis obtidas no cenário SSP2-4.5 não mostram grandes alterações na velocidade do vento de maneira geral. Os campos de vento sazonais em altos níveis de cada modelo simulados neste cenário são apresentados nas figuras do Anexo 2.

5.3 MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO

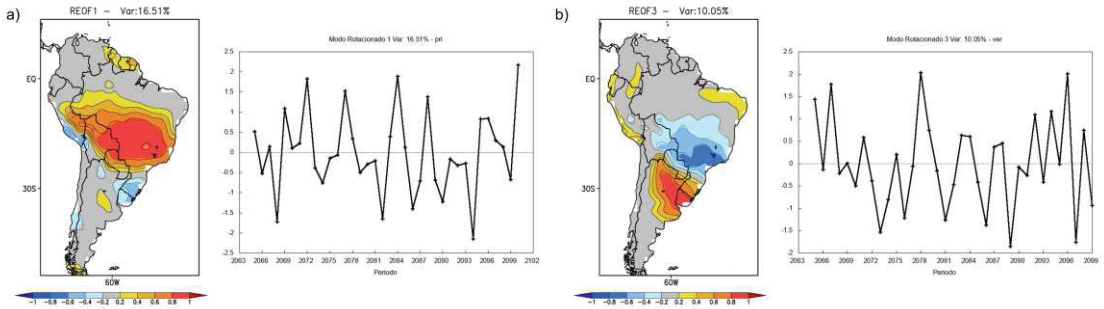
Modos de variabilidade de precipitação foram calculados também para os modelos no cenário SSP2-4.5, para o período de 2065 a 2100, a fim de verificar se os

principais modos de variabilidade interanual da primavera e do verão, como os modos tipo dipolo com anomalias de precipitação de sinais opostos em CESA e em SESA (mas com anomalias mais fortes em CESA), são alterados nas projeções do clima futuro.

Assim como para o clima presente, para o cenário futuro SSP2-4.5 alguns modelos mostram modos de primavera e verão com fortes anomalias em CESA e mais fracas de sinais opostos em SESA. A maioria dos modelos os mostram com fortes anomalias em CESA estendidas por uma grande área além do centro-leste do Brasil e com anomalias fracas em SESA.

O modelo ACCESS-ESM1-5 apresenta no modo principal de primavera um dipolo com uma forte anomalia espalhada pelo centro da AS e anomalia de sinal oposto na Região Sul do Brasil e Uruguai (FIGURA 99a). No verão, o modelo apresenta o terceiro modo rotacionado (REOF3) com anomalias tipo dipolo no Sudeste/Centro-Oeste do Brasil e em SESA (FIGURA 99b).

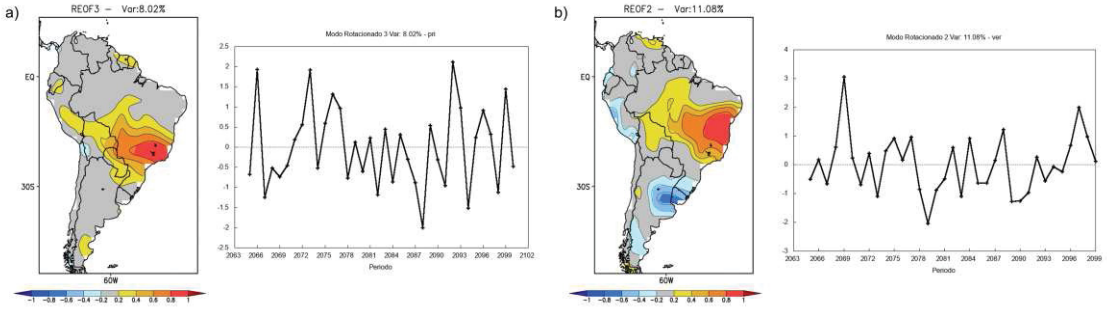
FIGURA 99 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO ACCESS-ESM1-5. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

O CanESM5 não apresenta, entre os primeiros modos, um modo tipo dipolo na primavera austral. O modelo mostra em REOF3 anomalias de precipitação no sul de CESA, mas não apresenta anomalias de sinais opostos (FIGURA 100a). Por outro lado, no verão austral, o modelo mostra um modo dipolo em REOF2, com anomalias em CESA, e com sinal oposto em SESA (FIGURA 100b).

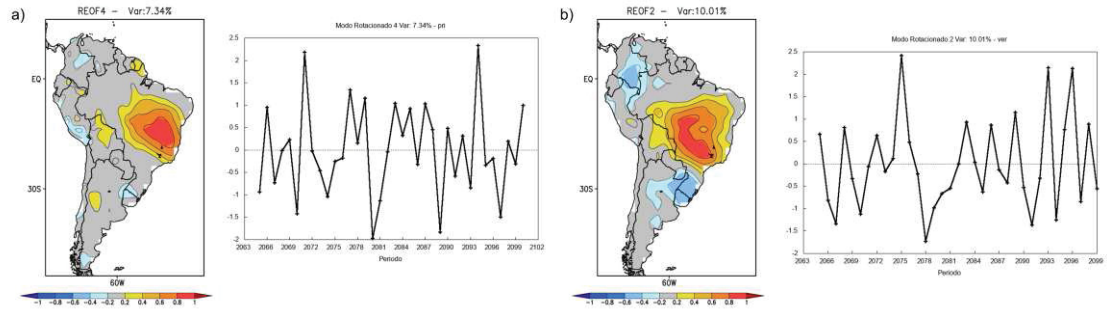
FIGURA 100 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO COM ANOMALIA EM CESA NA PRIMAVERA PARA O MODELO CANESM5. B) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO CANESM5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

O modelo CESM2 representa o modo tipo dipolo de primavera como o quarto modo rotacionado (REOF4), com anomalias em SESA muito fracas (FIGURA 101a). Já no verão, o modelo simula um modo tipo dipolo em REOF2 e as anomalias de sinais opostos se concentram em SESA e no Centro do Brasil (FIGURA 101b).

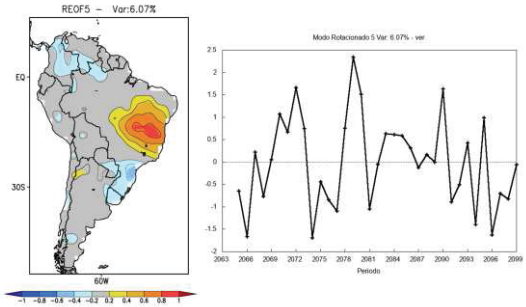
FIGURA 101 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO CESM2. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

O CNRM-CM6-1, assim como o CanESM5, não mostra um modo tipo dipolo na primavera austral, mas no verão o quinto modo rotacionado (REOF5) mostra anomalias de sinais opostos em CESA e em SESA. Este modo mostra também anomalia de precipitação com mesmo sinal que em SESA no norte da AS (FIGURA 102).

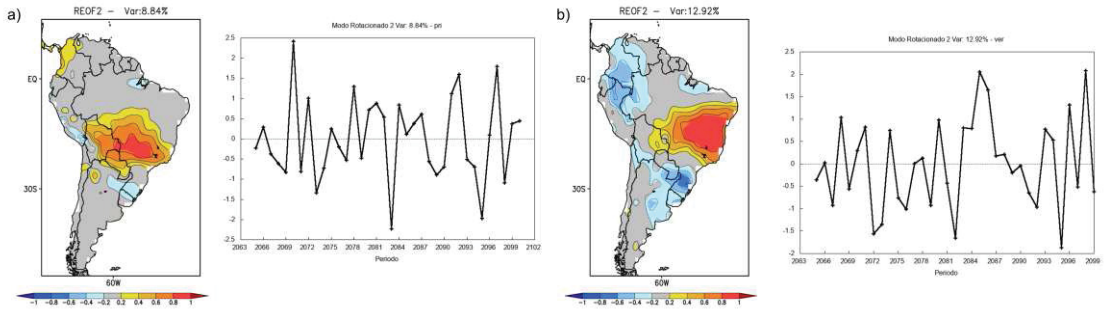
FIGURA 102 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO CNRM-CM6-1.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

O modelo EC-Earth3-Veg representa em REOF2 da primavera um modo tipo dipolo com anomalia de precipitação no centro da AS, a sudoeste de SESA, e anomalia inversa mais fraca, em SESA (FIGURA 103a). No verão, o modelo é um dos melhores neste cenário de projeções ao representar um modo dipolo bem definido, com anomalia em CESA e anomalia de sinal oposto em SESA. Neste modo (REOF2), o modelo ainda simula anomalia de mesmo sinal que em SESA no noroeste da AS, próximo do equador (FIGURA 103b).

FIGURA 103 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO.

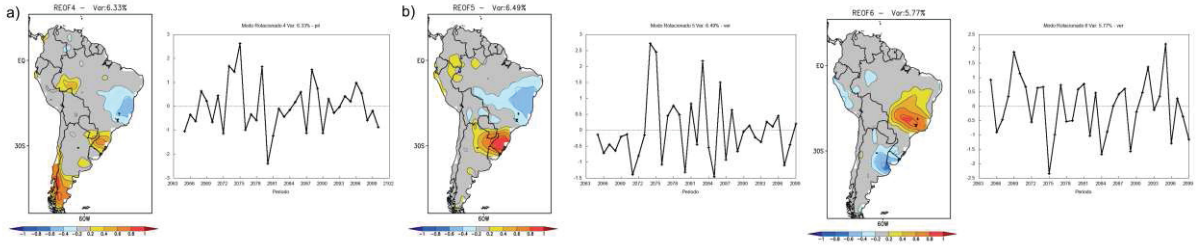


FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

O HadGEM3-GC31-LL simula na primavera austral um modo tipo dipolo com anomalias de sinais opostos em CESA e no Sul do Brasil. Contudo, diferentemente dos modelos anteriores, os sinais dos *Factor Loadings* são mais fortes em SESA do

que em CESA (FIGURA 104a). Já para o verão, há dois modos (REOF5 e REOF6) com anomalias de sinais opostos em CESA e em SESA (FIGURA 104b).

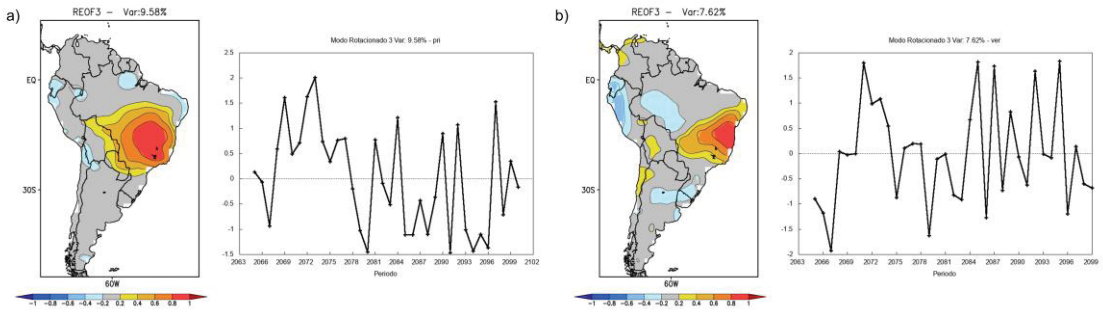
FIGURA 104 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL. B) MESMO QUE (A), MAS PARA DOIS MODOS DO VERÃO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

O modelo IPSL-CM6A-LR, similarmente ao modelo CanESM5, não apresenta um modo tipo dipolo na primavera austral, mostrando apenas um modo com fortes anomalias em CESA (FIGURA 105a). Para o verão, o modelo representa em REOF3 um modo com anomalias de sinais opostos em CESA e em SESA, embora seja bem fraca nessa região. Anomalias de precipitação de mesmo sinal que em SESA também ocorrem na região Amazônica e no oeste da AS, no HS (FIGURA 105b).

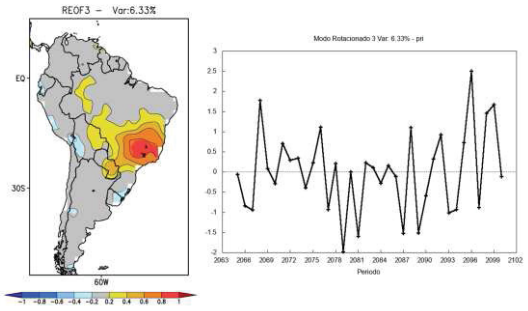
FIGURA 105 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO COM ANOMALIA EM CESA NA PRIMAVERA PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR. B) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

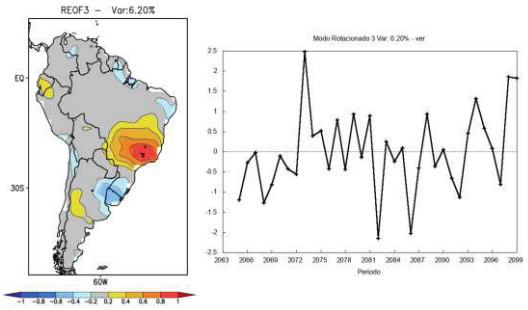
Os modelos KACE-1-0-G e MIROC6 não apresentam modos tipo dipolo na primavera, nem mesmo no verão austral. Contudo, na primavera o KACE-1-0-G representa em REOF3 um modo com fortes anomalias em CESA (FIGURA 106). O modelo MPI-ESM1-2-HR também não mostra um modo tipo dipolo na primavera, porém, no verão, o modo REOF3 apresenta anomalias de precipitação de sinais opostos em CESA e em SESA (FIGURA 107).

FIGURA 106 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO COM ANOMALIA EM CESA NA PRIMAVERA PARA O MODELO KACE-1-0-G.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 107 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO MPI-ESM1-2-HR.

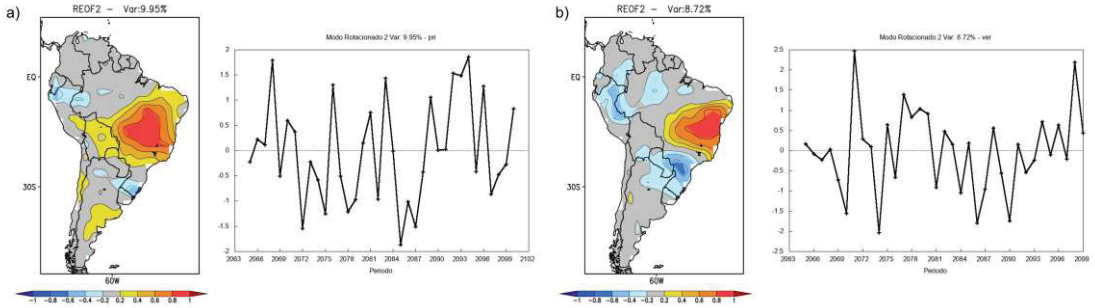


FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

O modelo MRI-ESM2-0 representa o modo dipolo da primavera como o segundo modo rotacionado (REOF2), com a anomalia em CESA deslocada mais para o Centro e Nordeste do Brasil e a anomalia em SESA com sinal mais fraco (FIGURA 108a). Já no verão, o modelo, assim como o EC-Earth3-Veg, se destaca ao

representar um modo dipolo com anomalias de sinais opostos concentradas em CESA e em SESA (FIGURA 108b).

FIGURA 108 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO MRI-ESM2-0. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

De modo geral, como no clima presente (Seção 4.4), os modelos apresentam modos de primavera e verão no clima futuro com representação da variabilidade em CESA e mais fraca e de sinal oposto em SESA. Alguns modelos, como EC-Earth3-Veg e MRI-ESM2-0, mostram modos dipolos bem definidos com anomalias de sinais mais fortes concentradas nessas duas regiões no verão austral. Tendo em vista os resultados obtidos no clima presente sobre a relação entre modos na primavera e no verão, que nos modelos tendem a ser de persistência de anomalias, não foram feitos cálculos a fim de verificar se as anomalias tendem a se inverter da primavera para o verão.

Nos casos em que os modelos representam o modo dipolo com anomalias de precipitação em CESA e mais fracas em SESA, este frequentemente não aparece como o modo principal da estação. Com exceção do MPI-ESM1-2-HR e MIROC6, os modelos simulam o primeiro modo de verão (REOF1) com uma forte anomalia de precipitação sobre o norte/noroeste da AS. No clima presente, este modo também apareceu frequentemente em primeiro lugar (capítulo 4).

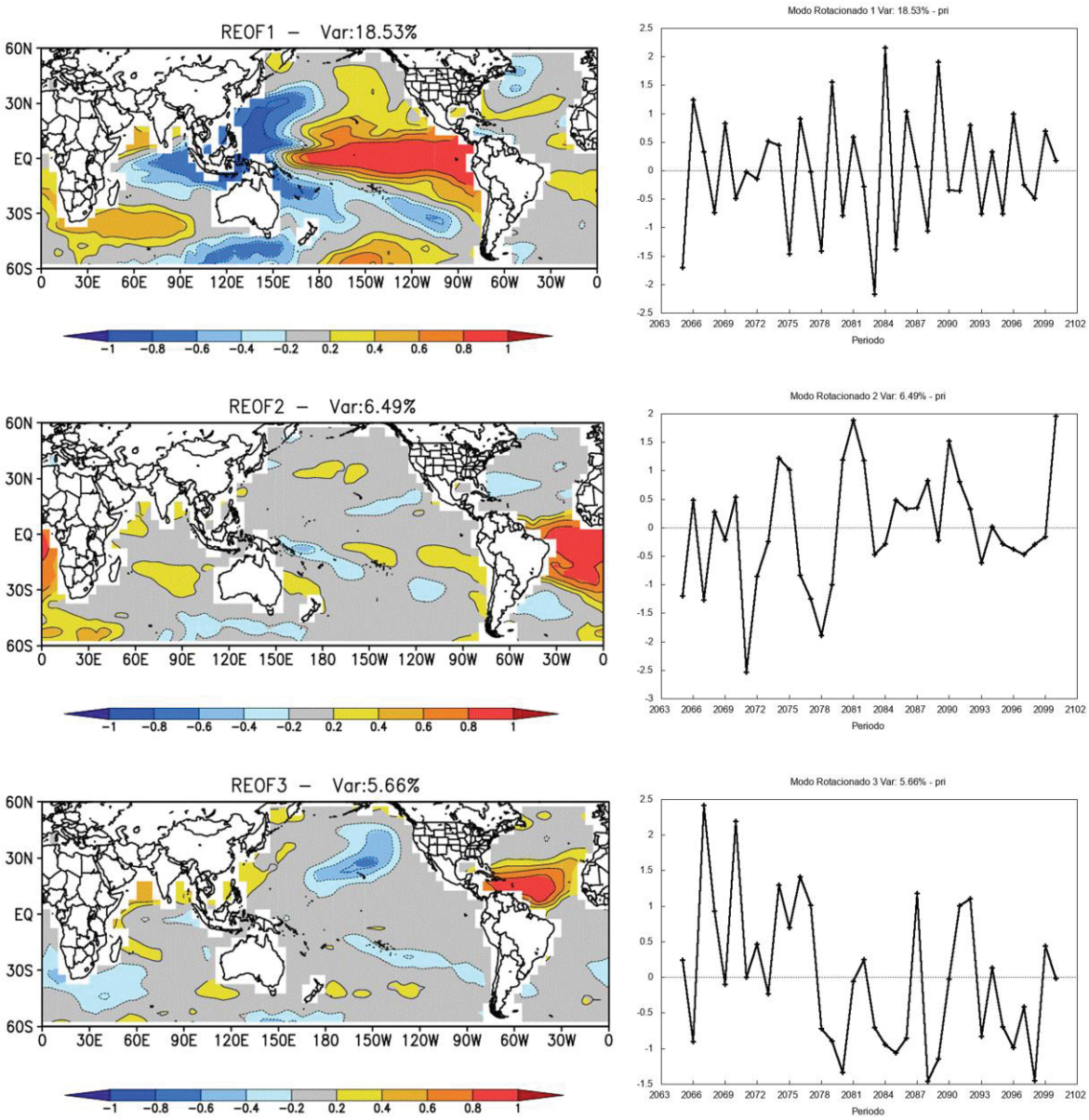
5.4 MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM

Analogamente ao que foi feito para o clima presente, foram calculados modos de variabilidade de TSM para resultados dos modelos no cenário SSP2-4.5. Os modos foram obtidos para cada modelo, para a média do conjunto de 7 modelos que tiveram melhor desempenho na simulação de ENOS no clima presente e para a média do conjunto de 10 modelos capazes de representar o modo ENOS no clima presente. Isso foi feito a fim de manter a consistência das análises e possibilitar a comparação entre diferentes períodos.

As FIGURAS 109 e 110 apresentam os três primeiros modos de variabilidade da primavera e do verão, respectivamente, para resultados do modelo CESM2, que mostrou melhor desempenho ao simular o ENOS no clima presente. Tanto na primavera como no verão, o principal modo de variabilidade (REOF1) do CESM2 é ENOS. O modo apresenta anomalias de TSM no Pacífico central leste equatorial e anomalias de sinal oposto no oeste do Pacífico e em regiões ao redor das anomalias do centro-leste. No verão, a anomalia do Pacífico central leste é mais concentrada na região tropical, observando-se também anomalias de mesmo sinal no Oceano Atlântico tropical. Já o REOF2 e o REOF3 de primavera mostram anomalias mais fortes no Atlântico Tropical sul e norte, respectivamente. O REOF2 de verão apresenta anomalias no Pacífico Norte, enquanto o REOF3 representa oscilação de anomalias no sudeste do Pacífico.

Os eventos EN e LN são identificados a partir da série de FS do modo ENOS da primavera e do verão. A TABELA 34 fornece os anos em que o modelo CESM2 simula eventos EN e LN na primavera, no verão e os anos com eventos nas duas estações (considerados os anos EN e LN simulados pelo modelo), no cenário de emissões SSP2-4.5.

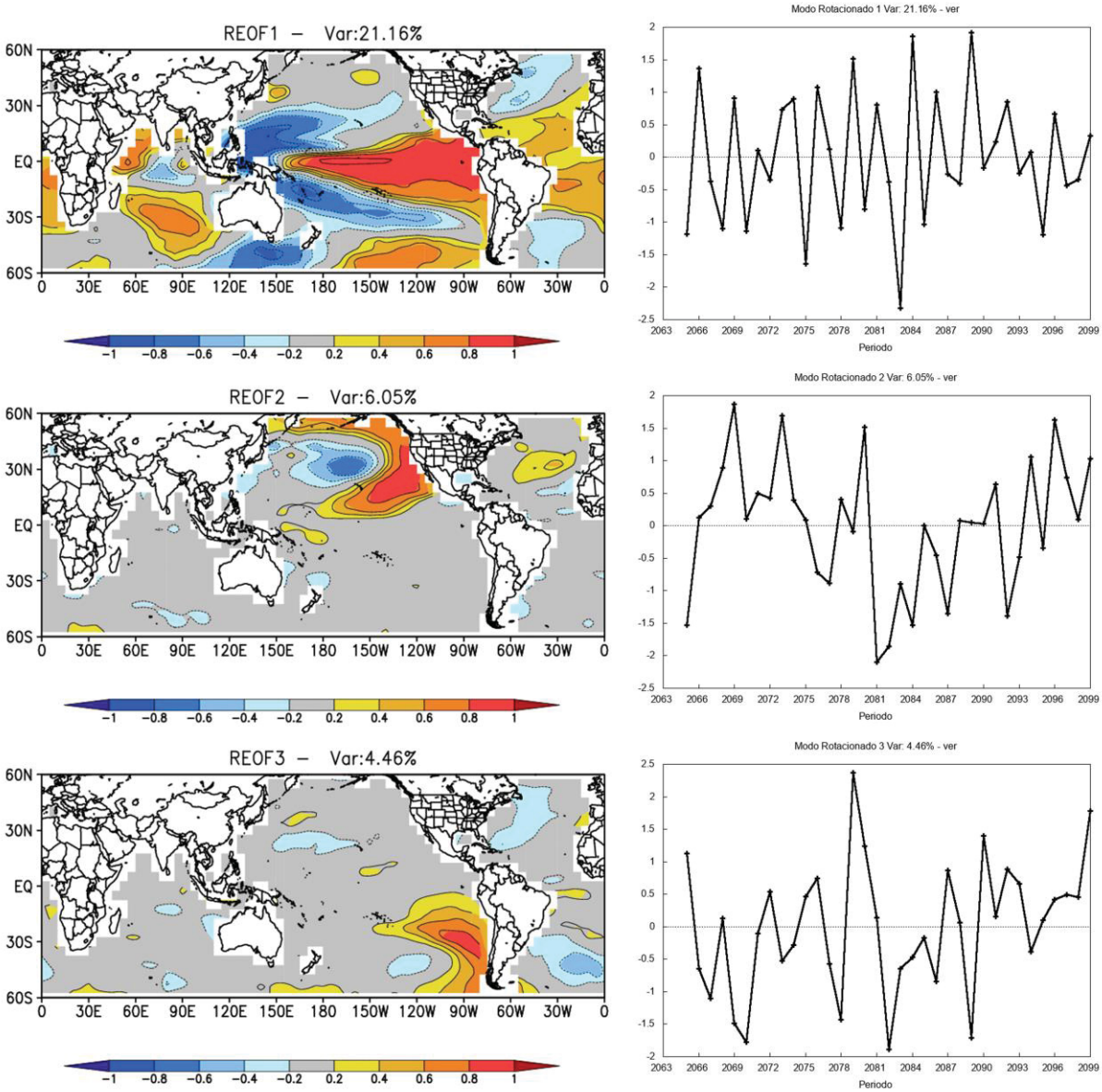
FIGURA 109 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 110 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

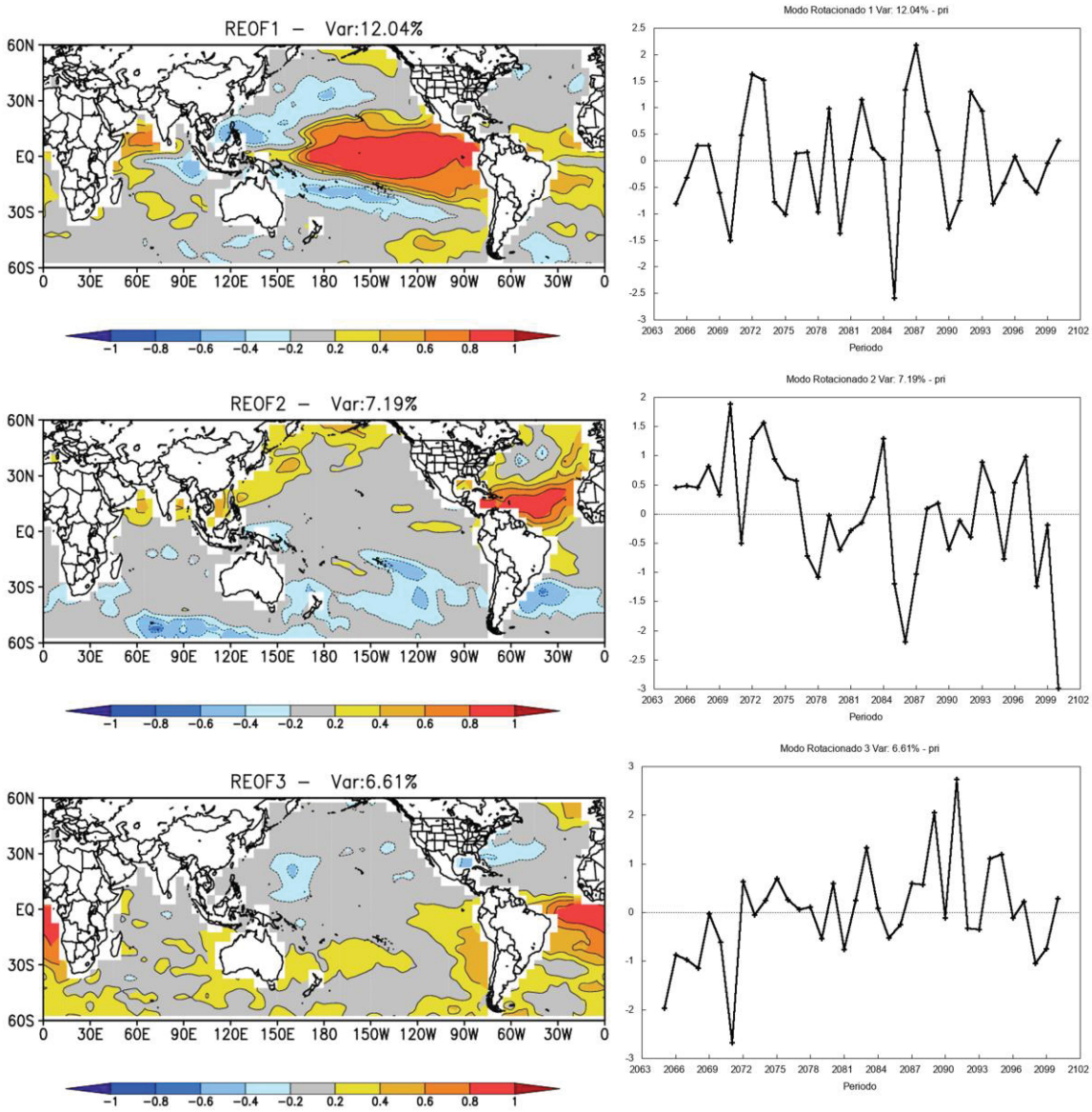
TABELA 34 – LISTAS DE ANOS COM EVENTOS EN E LN SIMULADOS PELO MODELO CESM2 NA PRIMAVERA, NO VERÃO E EM AMBAS AS ESTAÇÕES, PARA PROJEÇÕES NO CENÁRIO SSP2-4.5.

Evento	Primavera	Verão	Comum
EN	2066, 2069, 2076, 2079, 2084, 2086, 2089, 2092, 2096	2066, 2069, 2074, 2076, 2079, 2081, 2084, 2086, 2089, 2092	2066, 2069, 2076, 2079, 2084, 2086, 2089, 2092
LN	2065, 2075, 2078, 2080, 2083, 2085, 2088, 2093, 2095	2065, 2068, 2070, 2075, 2078, 2080, 2083, 2085, 2095	2065, 2075, 2078, 2080, 2083, 2085, 2095

FONTE: A autora (2022).

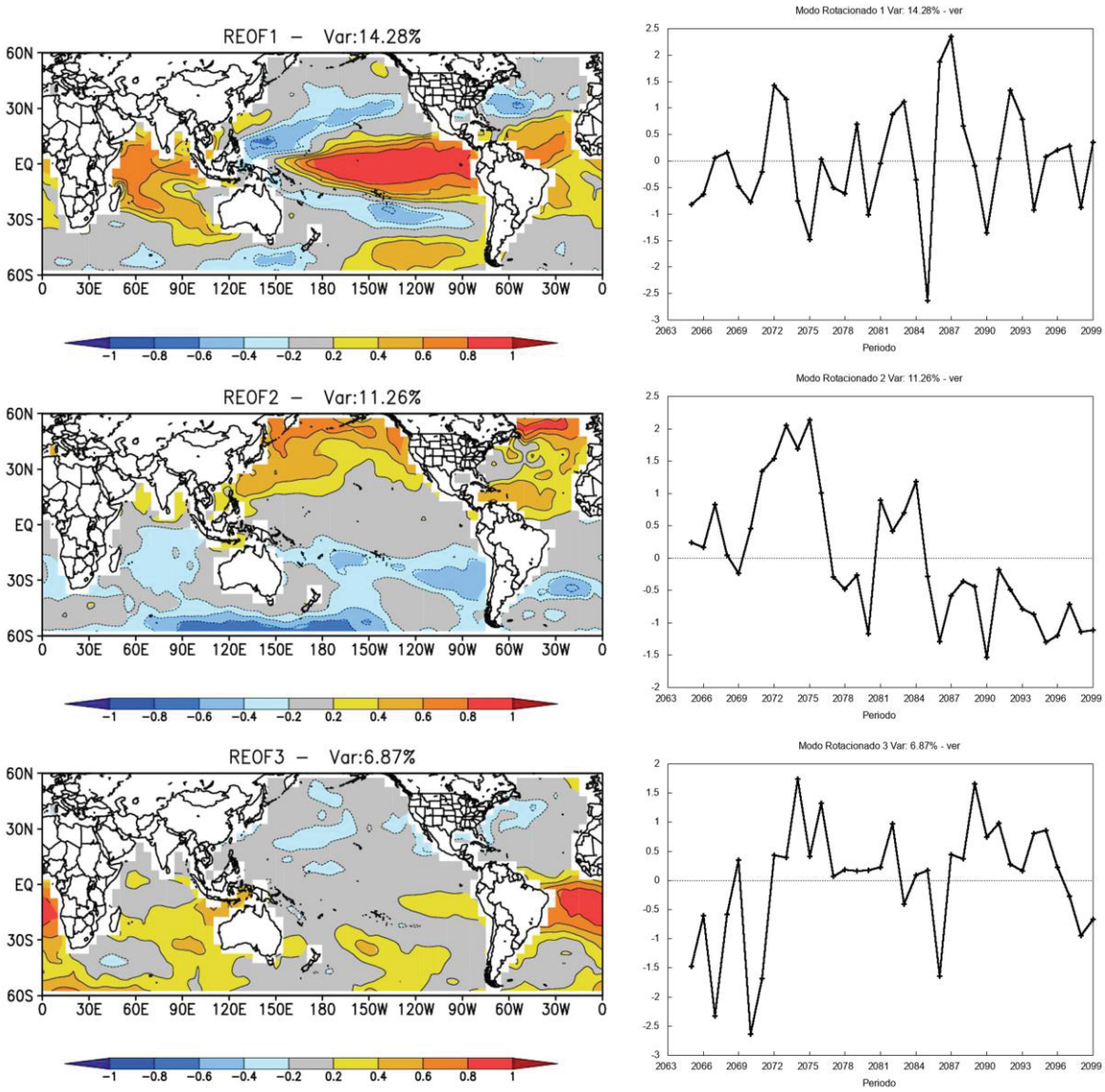
A média do conjunto de todos os 10 modelos que simularam o modo ENOS no clima presente também apresenta como modo principal da primavera e do verão o modo ENOS (FIGURA 111 e FIGURA 112, respectivamente). Nesse modo, as anomalias de TSM no Atlântico tropical e no oceano Índico que aparecem na primavera são intensificadas no verão. Os segundos modos de primavera e verão mostram, de maneira geral, anomalias inversas entre os hemisférios, sendo mais intensas nos extratrópicos no verão austral, indicando tendência de resfriamento no HN e aquecimento no HS. Na primavera, o REOF2 apresenta fortes anomalias no Atlântico Norte, podendo estar relacionado às oscilações características dessa região. Já os terceiros modos de primavera e verão mostram padrões de anomalias similares no Atlântico Sul tropical, com as anomalias próximas à AS se intensificando da primavera para o verão.

FIGURA 111 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE 10 MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 112 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE 10 MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

A TABELA 35 abaixo fornece os anos em que a média do conjunto de todos esses modelos simula os episódios EN e LN na primavera, no verão e os anos com eventos nas duas estações.

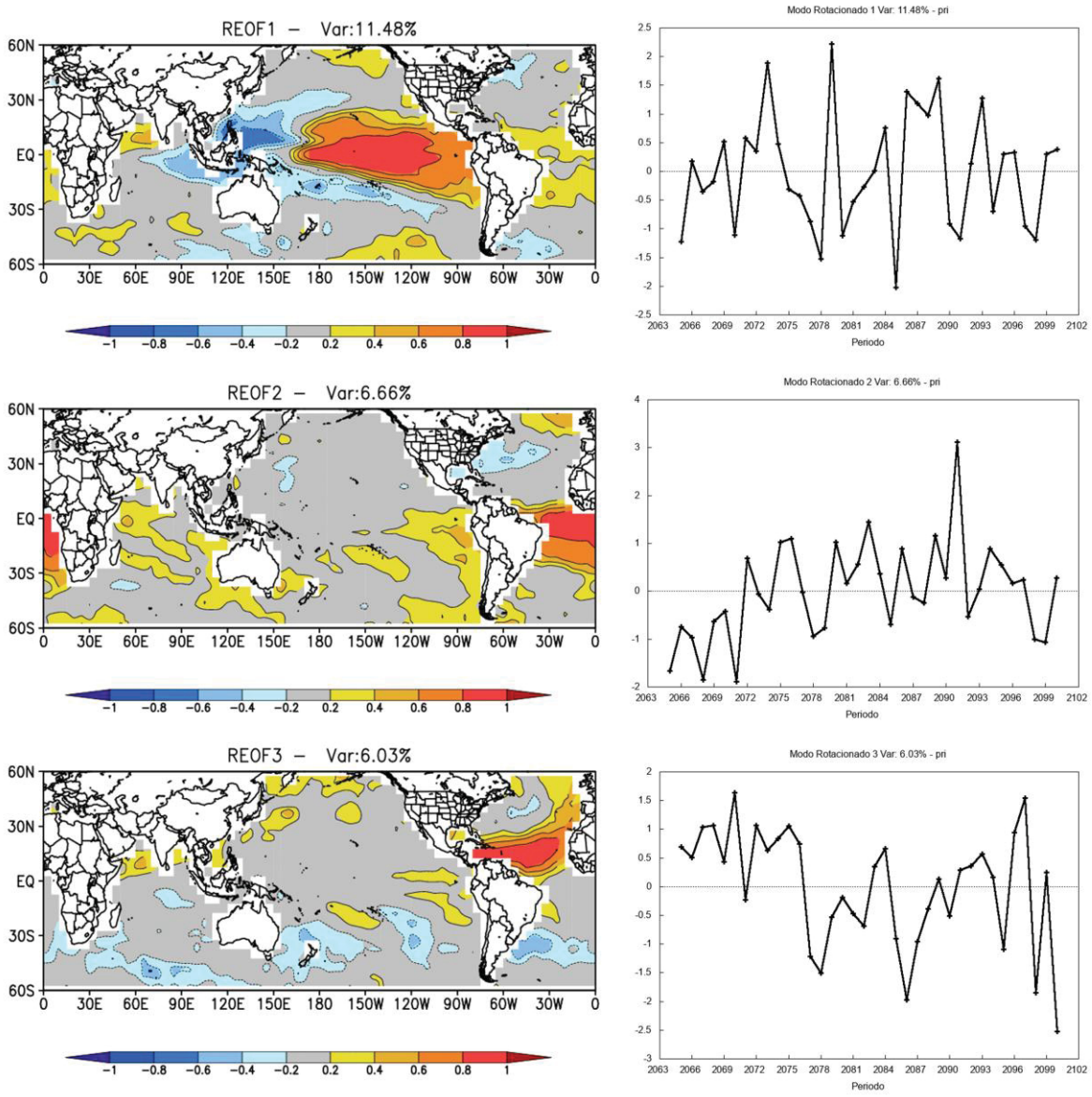
TABELA 35 – LISTAS DE ANOS EN E LN SIMULADOS PELA MÉDIA DO CONJUNTO DE 10 MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NA PRIMAVERA, NO VERÃO E EM AMBAS AS ESTAÇÕES, PARA PROJEÇÕES NO CENÁRIO SSP2-4.5.

Evento	Primavera	Verão	Comum
EN	2072, 2073, 2079, 2082, 2086, 2087, 2088, 2092, 2093	2072, 2073, 2082, 2083, 2086, 2087, 2092, 2093	2072, 2073, 2082, 2086, 2087, 2092, 2093
LN	2065, 2070, 2074, 2075, 2078, 2080, 2085, 2090, 2094	2065, 2070, 2075, 2080, 2085, 2090, 2094, 2098	2065, 2070, 2075, 2080, 2085, 2090, 2094

FONTE: A autora (2022).

Para a média do conjunto dos 7 modelos que apresentaram melhores desempenhos ao simularem o ENOS no clima presente, o modo ENOS também é representado como o primeiro modo de variabilidade da primavera e do verão (FIGURA 113 e FIGURA 114). Para a primavera, as anomalias mais fortes no Pacífico equatorial são deslocadas para o centro do Pacífico. No verão, essas anomalias se concentram próximas ao equador e se estendem até a costa oeste da AS. As anomalias de sinal oposto no oeste do Pacífico e subtrópicos são mais fortes do que na média de conjunto anterior, com 10 modelos. O segundo e terceiro modo da primavera apresentam anomalias de TSM no Atlântico tropical do HS e no Atlântico Norte, respectivamente, se assemelhando ao segundo e terceiro modo apresentados pelo modelo CESM2, também na primavera. No verão, a variabilidade sobre o Atlântico tropical do HS aparece apenas no quinto modo rotacionado (não mostrado) e a variabilidade no Atlântico Norte não aparece entre os seis primeiros modos. Contudo, em REOF2 e REOF3 de verão, são vistas anomalias de sinais opostos entre os hemisférios distribuídas principalmente em médias e altas latitudes. Tanto estes modos como o REOF3 de primavera sugerem aquecimento da TSM nos extratrópicos do HS e resfriamento no HN nestas estações, apesar de as tendências gerais nas séries completas de TSM terem sido retiradas.

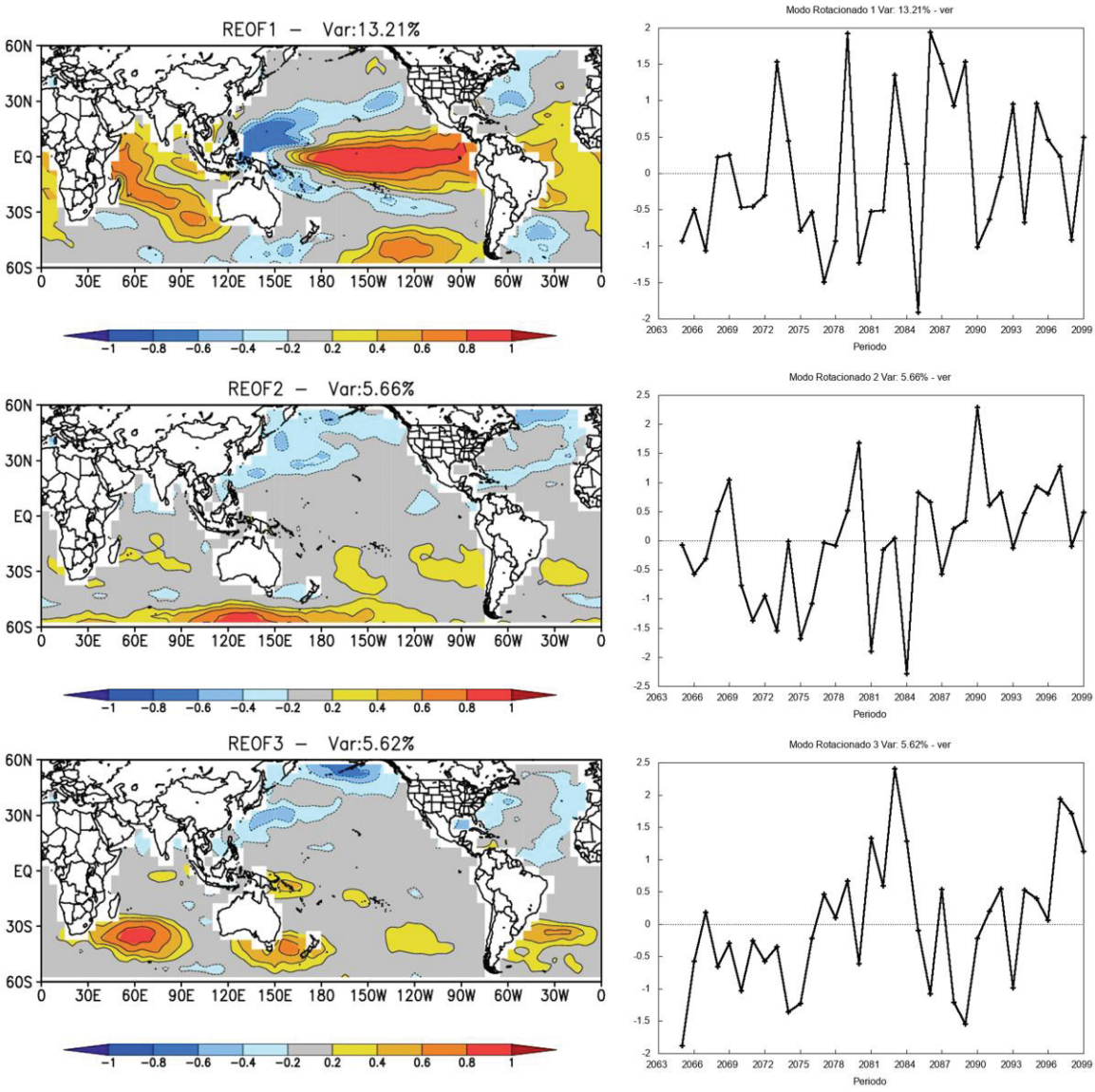
FIGURA 113 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE TIVERAM MELHOR DESEMPENHO AO SIMULAR O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 114 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE TIVERAM MELHOR DESEMPENHO AO SIMULAR O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

A TABELA 36 abaixo fornece os anos em que a média do conjunto dos melhores modelos simula os episódios EN e LN na primavera, no verão e os anos em comum entre as duas estações.

TABELA 36 – LISTAS DE ANOS EN E LN SIMULADOS PELA MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE TIVERAM MELHOR DESEMPENHO AO SIMULAR O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NA PRIMAVERA, NO VERÃO E ANOS EM COMUM ENTRE AS ESTAÇÕES, PARA PROJEÇÕES NO CENÁRIO SSP2-4.5.

Evento	Primavera	Verão	Comum
EN	2073, 2079, 2084, 2086, 2087, 2088, 2089, 2093	2073, 2079, 2083, 2086, 2087, 2088, 2089, 2093, 2095	2073, 2079, 2086, 2087, 2088, 2089, 2093
LN	2065, 2070, 2077, 2078, 2080, 2085, 2090, 2091, 2097, 2098	2065, 2067, 2075, 2077, 2078, 2080, 2085, 2090, 2098	2065, 2077, 2078, 2080, 2085, 2090, 2098

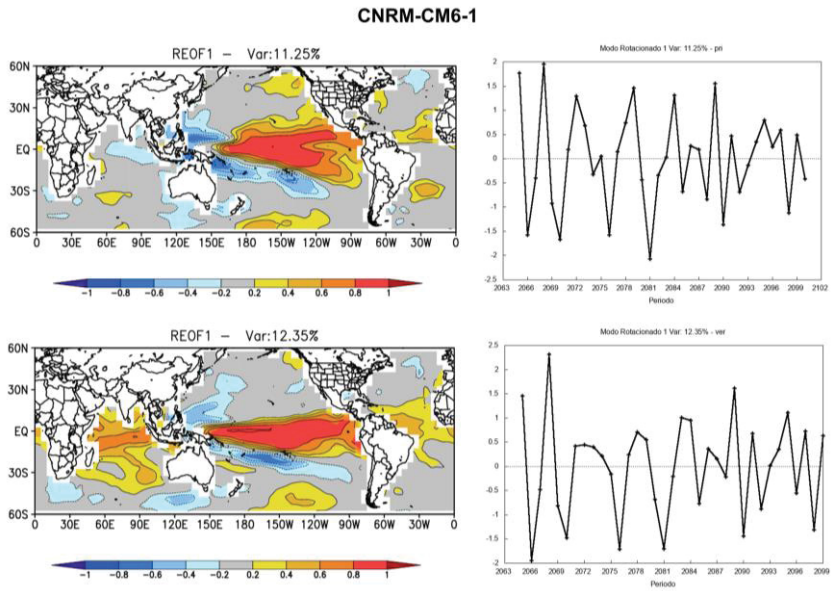
FONTE: A autora (2022).

Os modos de variabilidade foram obtidos também para cada modelo analisado. Contudo, como o objeto de interesse do presente estudo é a simulação da variabilidade associada ao ENOS, apenas os modos que representam o ENOS de cada modelo serão mostrados a seguir.

Uma vez que a simulação dos modos de variabilidade de TSM do modelo CESM2 já foi analisada com mais detalhes, as FIGURAS 115, 116, 117, 118, 119 e 120 a seguir mostram o modo ENOS dos demais modelos que melhor reproduziram o ENOS no clima presente, na primavera e no verão austral para o cenário SSP2-4.5. Para a primavera, o modo ENOS simulado pelos modelos é sempre o principal modo de variabilidade (REOF1). Embora todos os modelos reproduzam as anomalias de TSM no Pacífico central leste equatorial nesse modo, os modelos CNRM-CM6-1, HadGEM3-GC31-LL e MPI-ESM1-2-HR deslocam essas anomalias mais para o centro do Pacífico, fazendo com que anomalias menos intensas prevaleçam na costa oeste da AS, principalmente na primavera. Apesar disso, todos os modelos representam no modo fortes anomalias de sinais opostos às anomalias do Pacífico Leste, no oeste do Pacífico e nos subtrópicos. Ainda para a primavera, os modelos mostram anomalias no sul do Pacífico de mesmo sinal que as anomalias do Pacífico leste equatorial e a maioria mostra anomalias no Atlântico também de mesmo sinal, indicando aumento da TSM nessas regiões em episódios EN. Para o verão, os modelos também simulam o modo ENOS como o principal modo (REOF1), apresentando anomalias de TSM no centro-leste do Pacífico equatorial e anomalias de sinais opostos em torno dessas regiões e no oeste do Pacífico. Contudo, os modelos CNRM-CM6-1 e, principalmente, o MPI-ESM1-2-HR, ainda deslocam as

anomalias do leste do Pacífico equatorial mais para oeste, fazendo com que a costa oeste da AS seja atingida por anomalias menos intensas também no verão. Ainda no verão, os modelos (especialmente o modelo EC-Earth3-Veg) apresentam anomalias fortes no oceano Índico, indicando aumento da TSM em anos EN nessa região. Anomalias de mesmo sinal também ocorrem no sul do Pacífico e no Atlântico tropical, embora o modelo MPI-ESM1-2-HR não apresente fortes anomalias nessa última região.

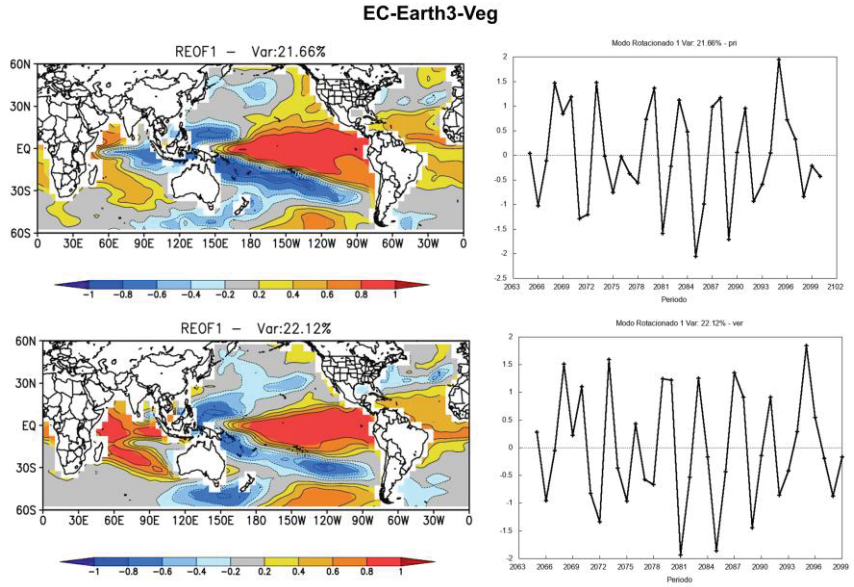
FIGURA 115 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO CNRM-CM6-1 NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).

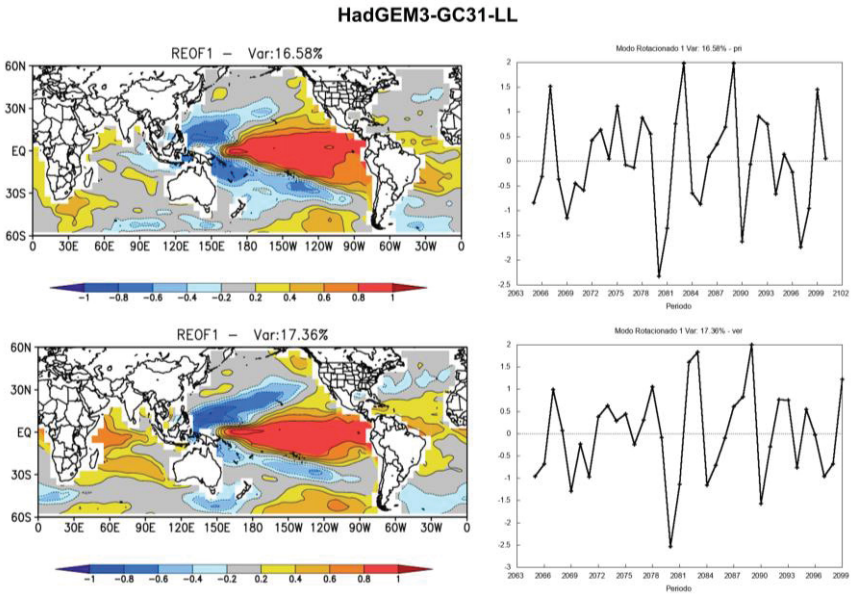
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 116 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO EC-EARTH3-VEG NO CENÁRIO SSP2-4.5.



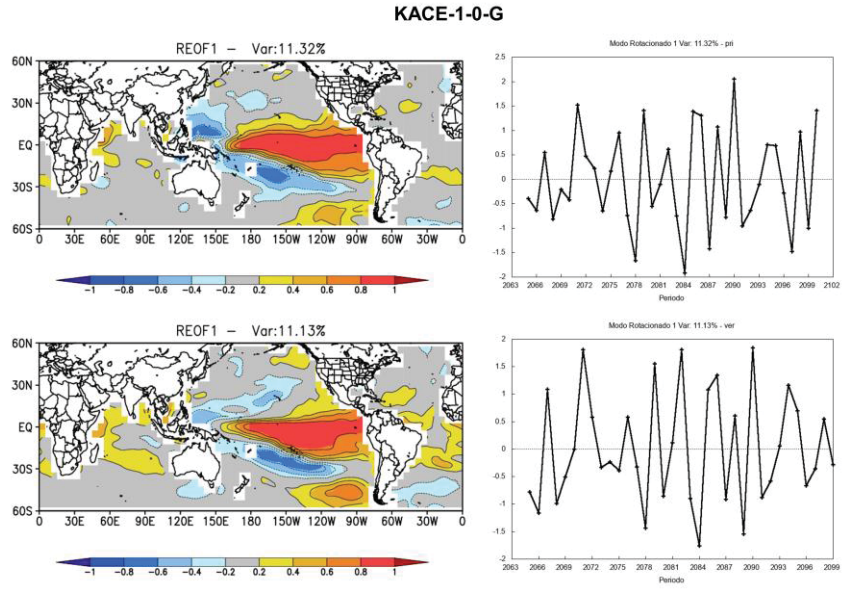
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 117 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

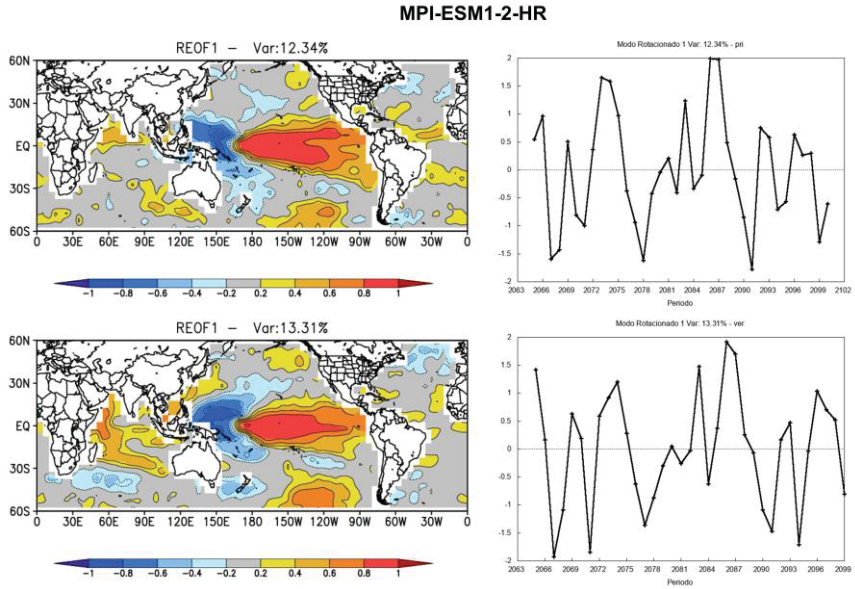
FIGURA 118 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO KACE-1-0-G NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

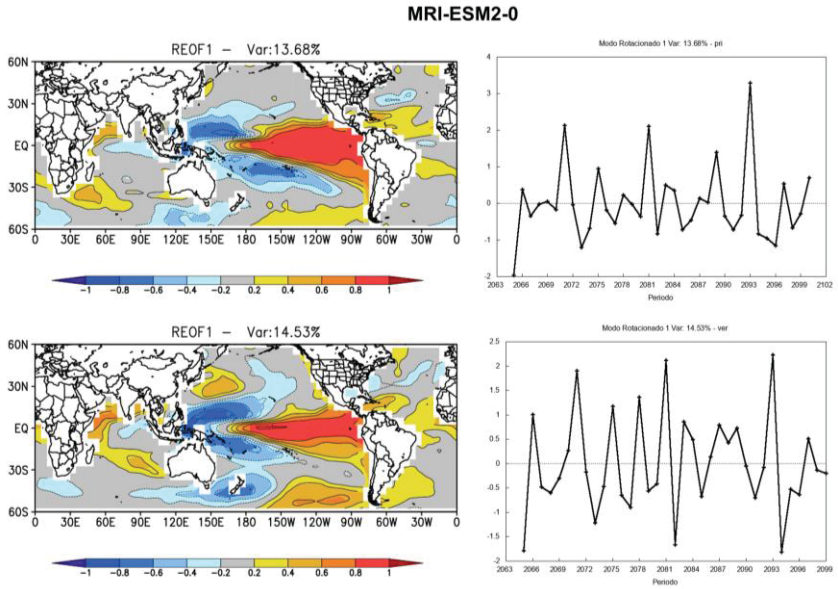
FIGURA 119 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MPI-ESM1-2-HR NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

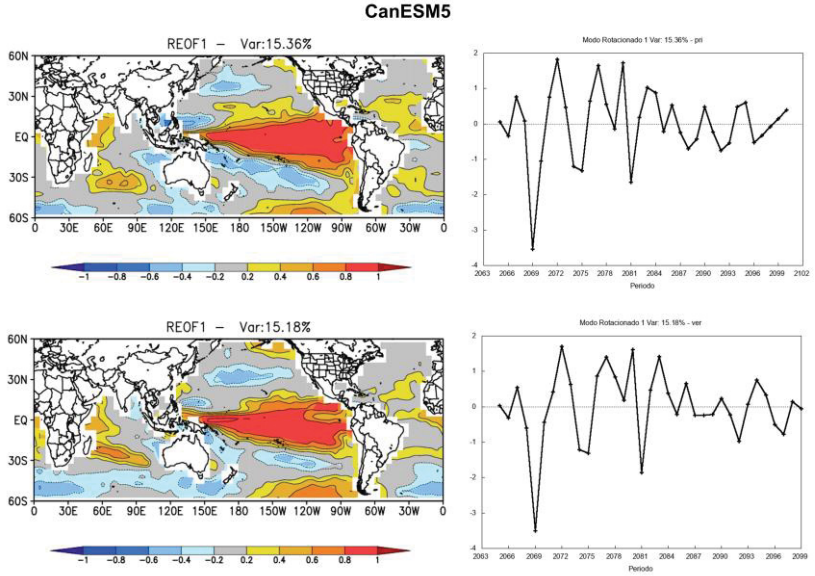
FIGURA 120 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MRI-ESM2-0 NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

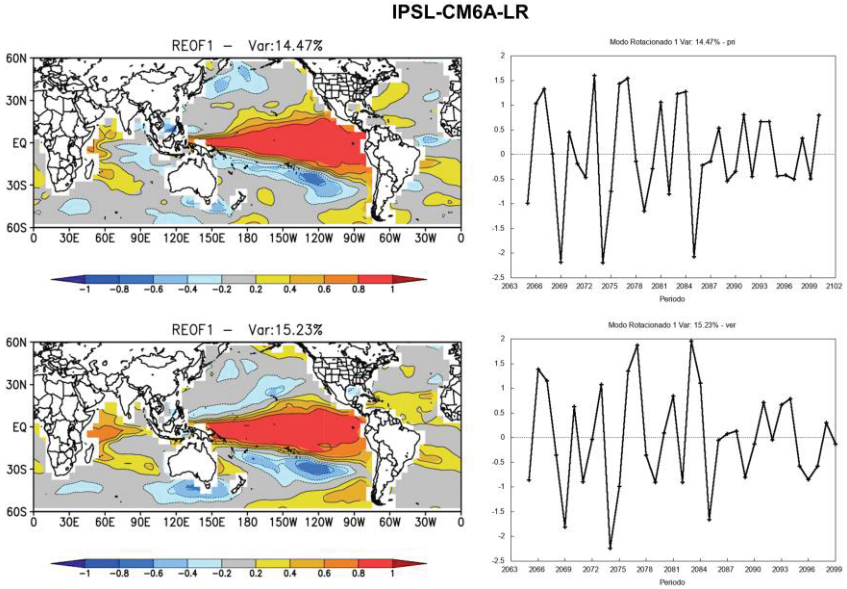
Os modelos CanESM5, IPSL-CM6A-LR e MIROC6 não reproduzem bem o modo ENOS no clima presente. Apesar disso, as FIGURAS 121, 122 e 123 mostram o modo ENOS simulado pelos modelos no clima futuro de acordo com o cenário SSP2-4.5. Os três modelos apresentam na primavera e no verão as anomalias do leste do Pacífico muito prolongadas, chegando a atingirem o oeste do Pacífico. Além disso, as anomalias no oceano Índico, observadas nos demais modelos no verão, são evidentes desde a primavera. Especialmente, o modelo MIROC6 mostra anomalias muito intensas em todo o Pacífico nas duas estações e no Atlântico e Índico no verão, apresentando um alargamento da anomalia no Pacífico central.

FIGURA 121 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO CANESM5 NO CENÁRIO SSP2-4.5.



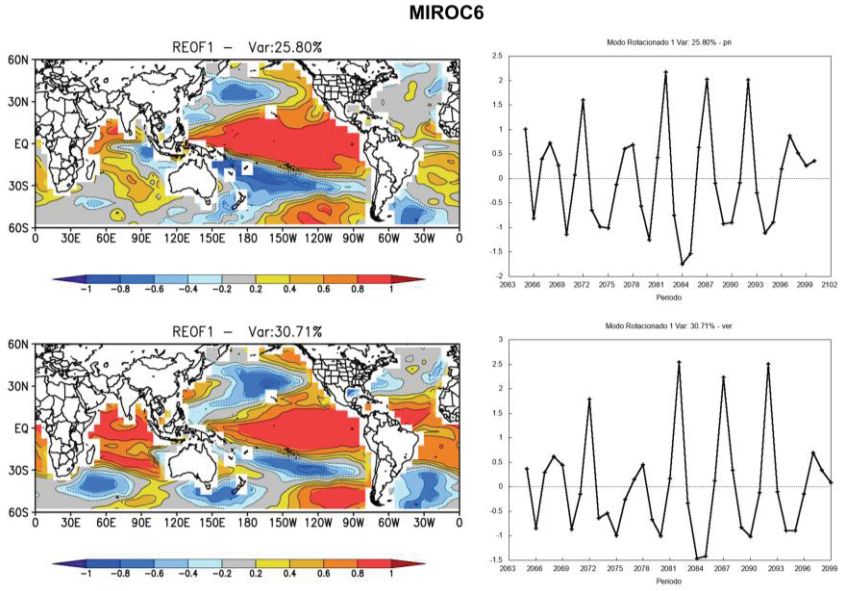
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 122 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 123 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MIROC6 NO CENÁRIO SSP2-4.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

5.5 DIFERENÇAS ENTRE CLIMA FUTURO E CLIMA PRESENTE

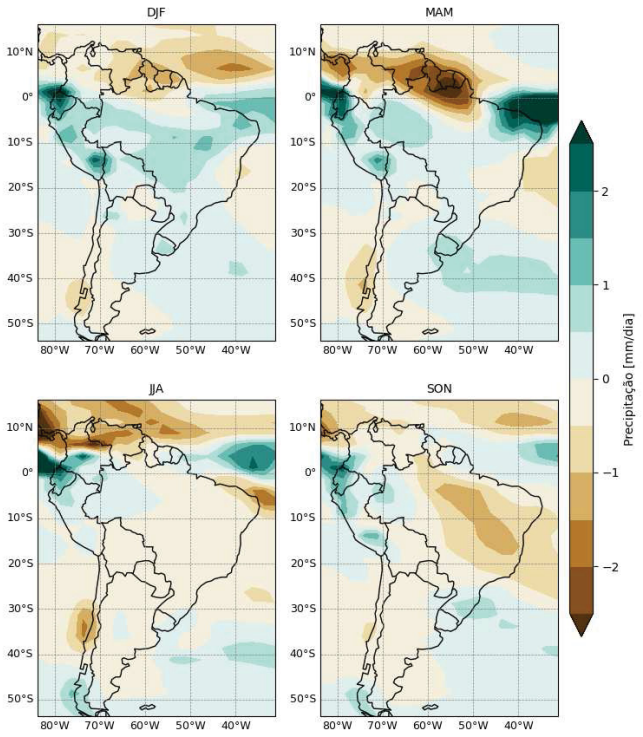
O presente capítulo possui como intuito investigar as principais diferenças entre as rodadas históricas e as projeções no cenário SSP2-4.5. Embora algumas informações já tenham sido dadas a respeito nas seções anteriores deste capítulo, a análise será alargada nesta seção, principalmente em relação à precipitação. Dessa forma, é possível analisar como o clima da AS pode mudar se o planeta seguir o cenário um pouco mais otimista de emissões de GEE.

Após a média do conjunto de todos os modelos, o modelo IPSL-CM6A-LR foi o que apresentou o melhor desempenho ao simular o clima presente. A FIGURA 124 a seguir apresenta as diferenças entre as climatologias sazonais de precipitação projetadas por este modelo no cenário SSP2-4.5 e as simuladas por ele no clima presente.

Está clara a projeção de aumento da precipitação no Nordeste do Brasil, na região Amazônica e nos Andes tropicais, e centro do Brasil no verão austral. No outono, o modelo prevê redução da precipitação no norte da AS e aumento nos Andes, no oeste da região Amazônica e no Nordeste do Brasil, próximo do equador. Durante o inverno, grande parte do continente não mostra fortes alterações. Já na primavera,

o modelo simula diminuição da precipitação em grande parte do Brasil, especialmente no centro-leste, incluindo o Nordeste.

FIGURA 124 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR.



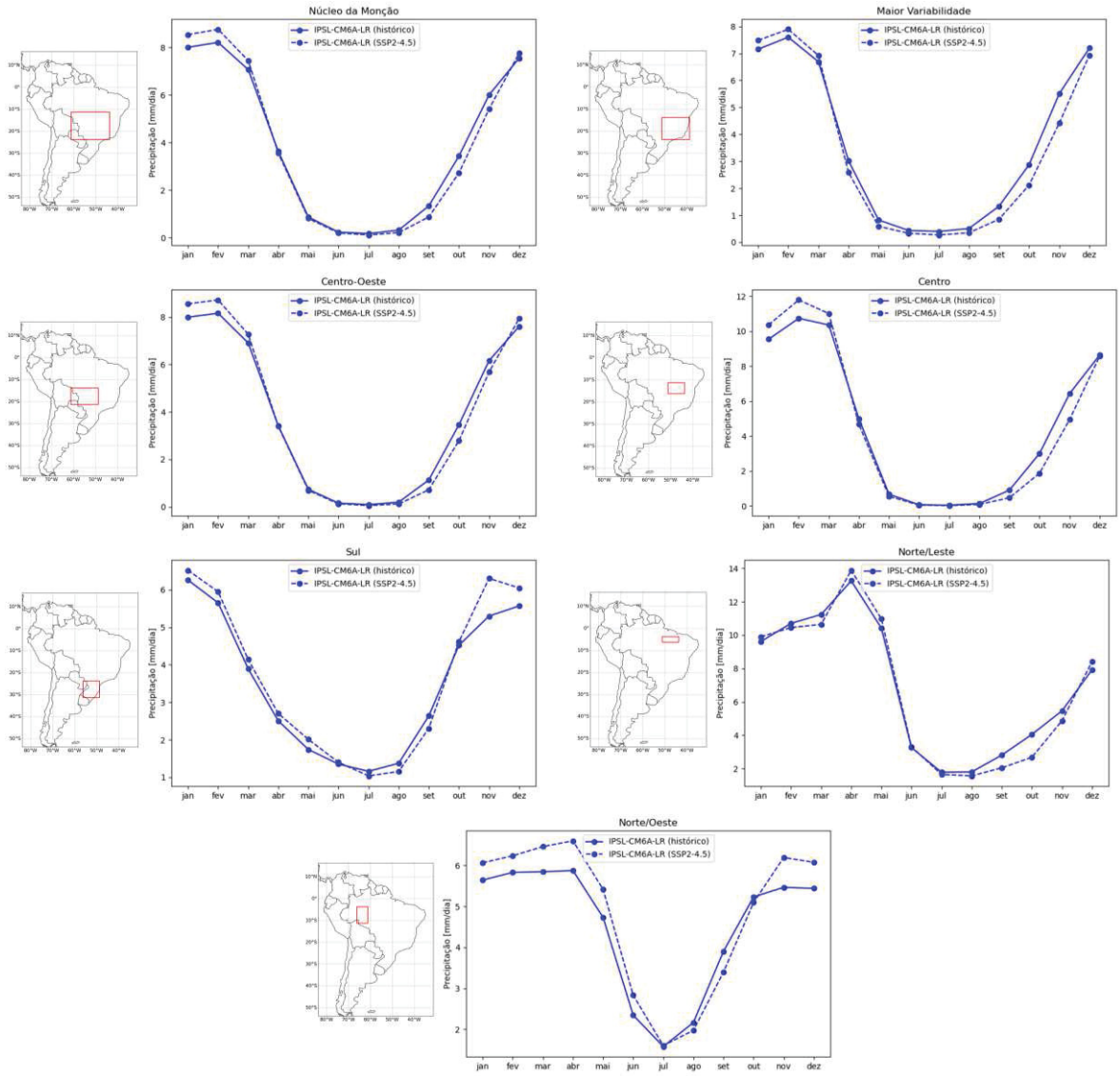
FONTE: A autora (2022).

É possível que na média do domínio total da AS algumas diferenças entre a precipitação projetada para o clima futuro e simulada para o presente não sejam tão evidentes. Assim, a FIGURA 125 mostra a comparação entre os ciclos anuais de precipitação simulados pelo IPSL-CM6A-LR no clima presente (rodadas históricas) e projetados para o clima futuro (cenário SSP2-4.5), em regiões mais específicas afetadas direta ou indiretamente pelo SMAS.

Na região núcleo da monção e Centro-Oeste do Brasil (FIGURA 125, dois painéis superiores à esquerda), o modelo mostra aumento da precipitação de dezembro a março, ou seja, no verão austral, e diminuição na primavera, com relação ao clima presente. Para a região de maior variabilidade da monção, no centro-leste do Brasil e centro (FIGURA 125, dois painéis superiores à direita) o modelo apresenta aumento da precipitação de janeiro a março e redução da precipitação em grande parte do ano, especialmente na primavera, quando é mais forte que nas duas regiões a oeste. No Sul do Brasil (FIGURA 125, painel inferior à esquerda), as projeções

mostram aumento da precipitação na maior parte do ano, especialmente em novembro e dezembro. No Norte/Leste do Brasil (FIGURA 125, painel inferior à direita), as maiores diferenças ocorrem na primavera austral, com redução da precipitação na região. Já no Norte/Oeste (FIGURA 125, painel inferior), o modelo projeta aumento da precipitação em quase todo ano, com exceção do final do inverno e início da primavera austral.

FIGURA 125 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO DO MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP2-4.5 E NAS RODADAS HISTÓRICAS.



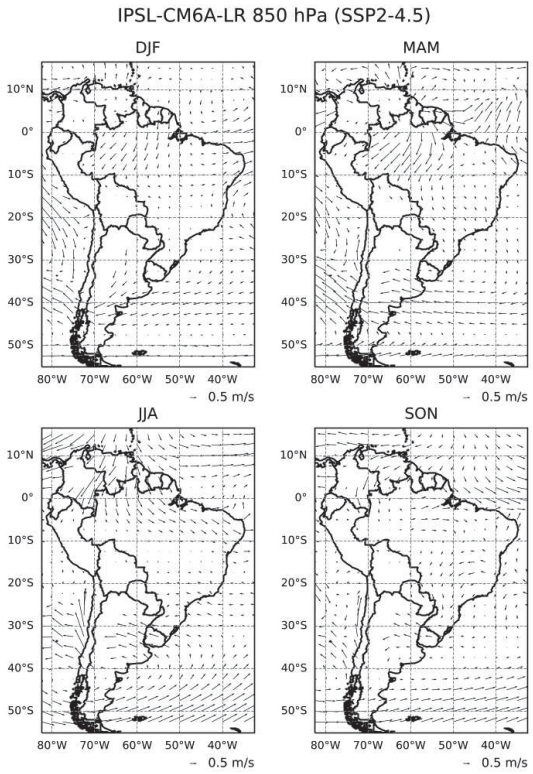
FONTE: A autora (2022).

Ainda para o IPSL-CM6A-LR, mapas de diferenças sazonais da circulação entre clima futuro projetado nesse cenário e o clima presente mostram algumas alterações na velocidade do vento na AS que são coerentes com as alterações

mostradas na precipitação (FIGURA 124). Em baixos níveis (850 hPa) (FIGURA 126), as maiores diferenças concentram-se no norte da AS e na região Amazônica no outono e no inverno austral, mostrando divergência no noroeste da AS, coerente com a diminuição da precipitação, e convergência no Nordeste e Centro do Brasil, consistente com aumento de precipitação. Em altos níveis (200 hPa) (FIGURA 127), as diferenças mais evidentes ocorrem entre 20°S e 35°S em todas as estações. O aumento da circulação ciclônica nos subtrópicos sobre a AS é coerente com o aumento da precipitação no Centro e em SESA.

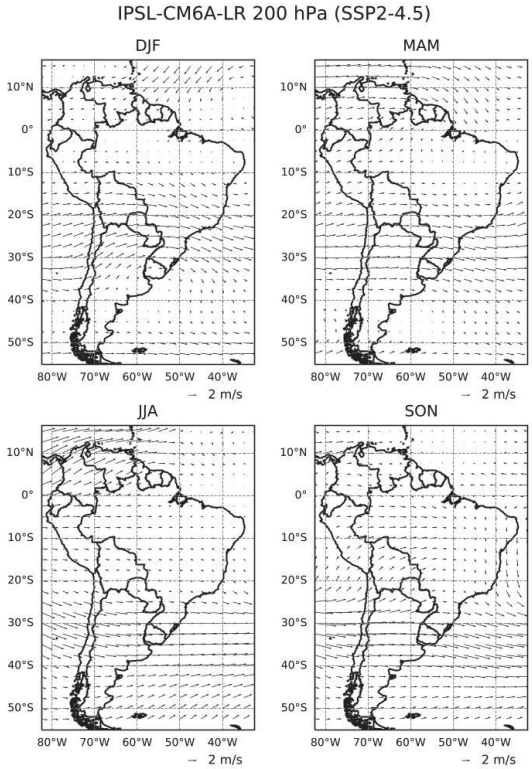
Mapas de diferenças sazonais entre climatologias de TSM simuladas pelo IPSL-CM6A-LR no cenário SSP2-4.5 e no clima presente, mostram, o aumento global da TSM até o final do século (FIGURA 128). De acordo com as projeções, o modelo apresenta aumento da TSM principalmente na região tropical em todo o ano e no HN no inverno e na primavera austral.

FIGURA 126 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR.



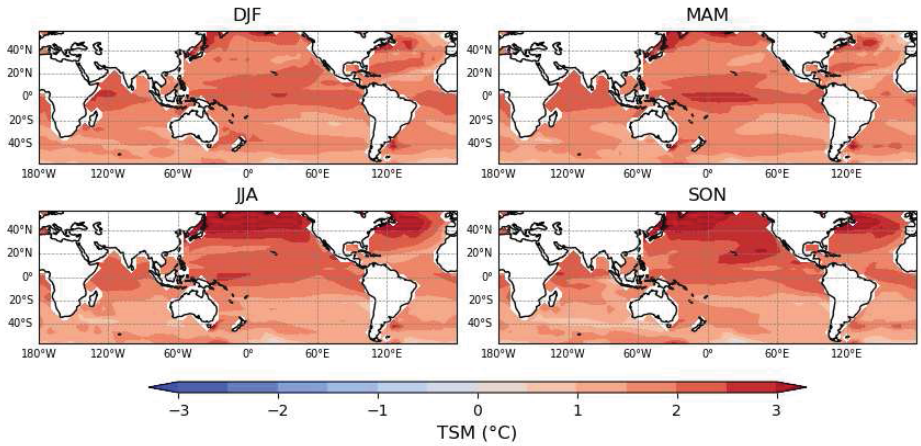
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 127 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS, PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR.



FONTE: A autora (2022).

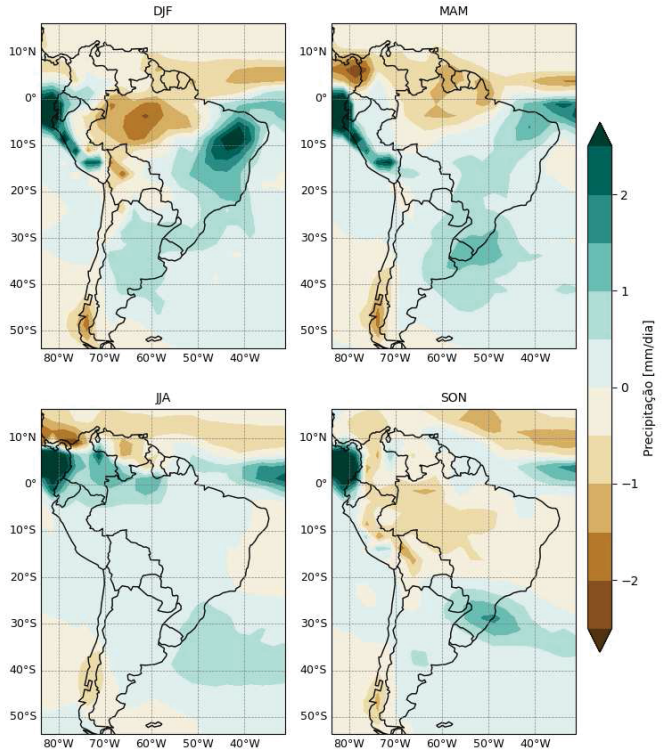
FIGURA 128 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR.



FONTE: A autora (2022).

O modelo CESM2 apresentou o melhor desempenho ao reproduzir o ENOS no clima presente. A FIGURA 129 apresenta as diferenças entre a precipitação simulada pelo modelo no clima futuro no cenário SSP2-4.5, e no clima presente (rodadas históricas).

FIGURA 129 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2.

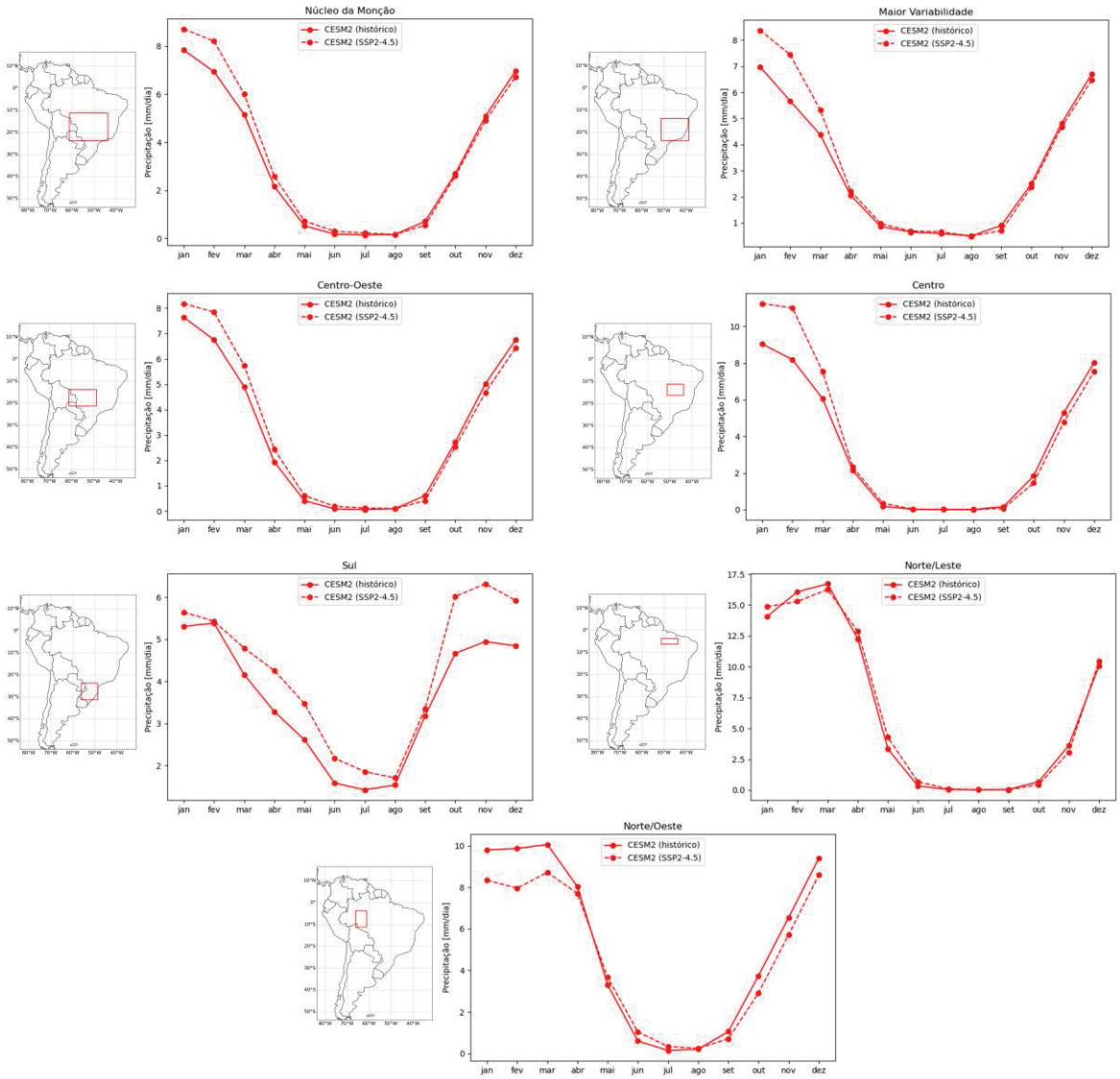


FONTE: A autora (2022).

No verão austral, o modelo mostra aumento da precipitação no centro-leste, Sudeste, Sul e, principalmente, no Nordeste do Brasil. Além disso, apresenta redução da precipitação no noroeste da região Amazônica. No outono, o modelo simula diminuição da precipitação no norte da AS e aumento principalmente no Nordeste do Brasil e em SESA. No inverno, as maiores diferenças encontram-se na região equatorial do noroeste da AS, onde há aumento da precipitação. Já na primavera, projeta-se aumento da precipitação no Sul do Brasil e redução em quase todo o resto do país. Comparando-se as FIGURAS 124 e 129, vê-se que há vários pontos comuns nas diferenças mostradas pelos dois modelos, principalmente no verão e outono

A FIGURA 130 mostra a comparação entre os ciclos anuais de precipitação simulados pelo CESM2 no clima presente (rodadas históricas) e no clima futuro (cenário SSP2-4.5), para regiões específicas da AS.

FIGURA 130 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO DO MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP2-4.5 E NAS RODADAS HISTÓRICAS.



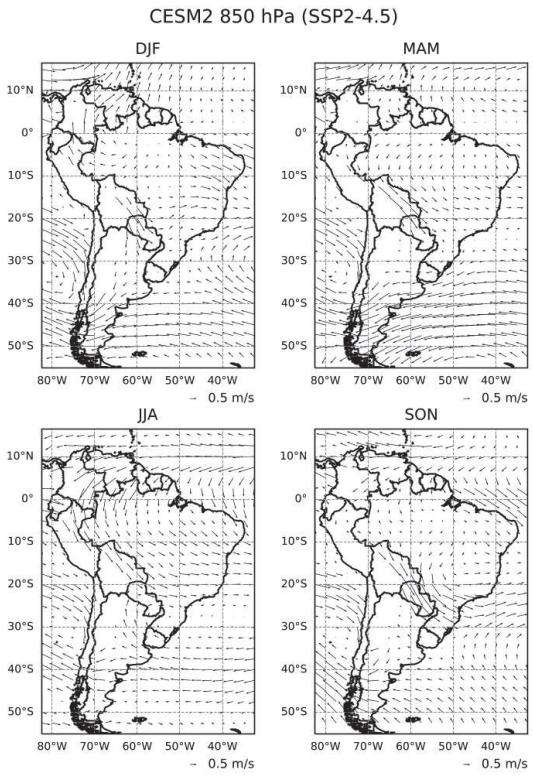
FONTE: A autora (2022).

No núcleo da monção, o modelo simula pouca mudança na precipitação média entre os dois períodos. A alteração mais evidente ocorre entre janeiro e março, mostrando aumento de precipitação no futuro. Esse mesmo comportamento é visto na região de maior variabilidade da monção. No centro-oeste, a projeção mostra aumento da precipitação de janeiro a julho. Após agosto, a precipitação torna-se menor do que no clima presente. Esse comportamento também ocorre no centro do Brasil, mas as diferenças são maiores no início do ano. Para o Sul do Brasil, o CESM2 projeta aumento de precipitação em todo o ano, sobretudo entre outubro e dezembro. Na região norte/leste o modelo não simula grandes diferenças entre os períodos,

enquanto na região norte/oeste há diminuição da precipitação em diversos meses, principalmente no verão e início do outono.

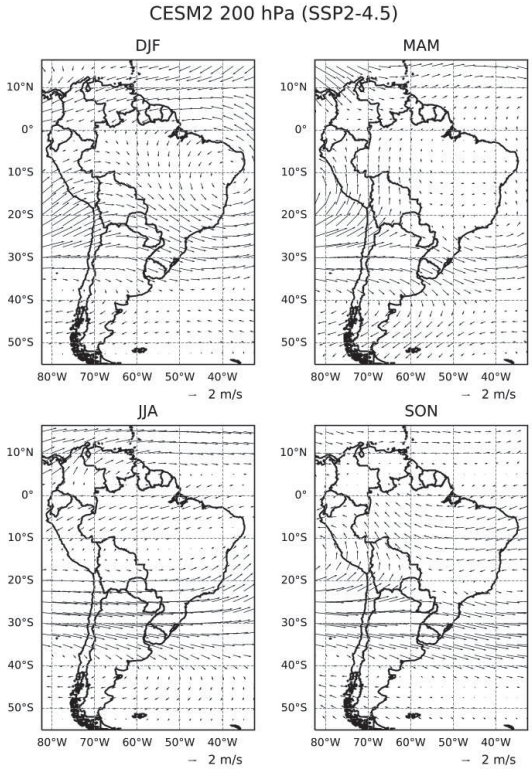
Ainda para o modelo CESM2, os mapas de diferenças sazonais entre os campos de vento nos dois períodos são mostrados nas FIGURAS 131 e 132. Em baixos níveis, as maiores diferenças ocorrem no vento a leste dos Andes em todas as estações, sobretudo na primavera austral. Tal diferença, aumentando o jato de baixos níveis a leste dos Andes, contribui para o aumento de precipitação no Sul do Brasil (FIGURA 129). A convergência aumentada no centro-leste do Brasil no verão e outono contribui para aumento da chuva na região, enquanto a divergência no Norte contribui para sua diminuição. Em altos níveis, as diferenças também são consistentes com a convecção anômala. Por exemplo, o aumento do cavado subtropical em torno de 60°W em DJF favorece mais precipitação a leste dele, no centro-leste do Brasil no verão. Por outro lado, a precipitação aumentada no centro-leste/Nordeste é coerente com circulação anticiclônica sobre a região.

FIGURA 131 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2.



FONTE: A autora (2022).

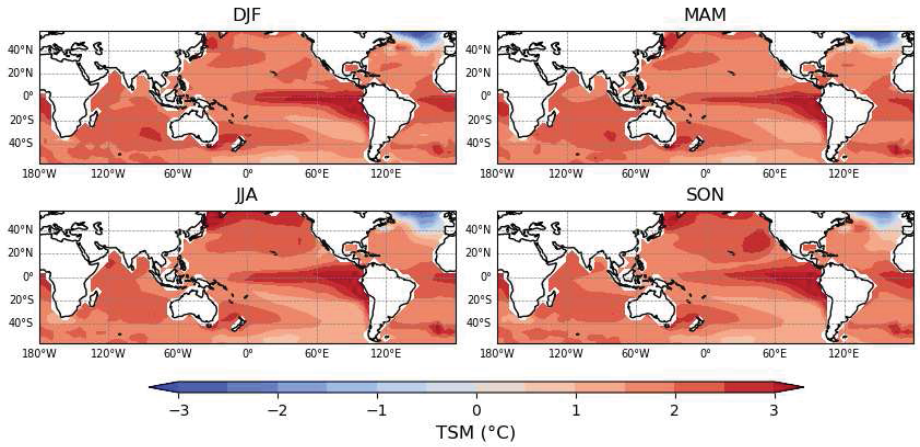
FIGURA 132 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2.



FONTE: A autora (2022).

Mapas das diferenças de TSM simuladas pelo modelo CESM2 mostram o aumento da TSM em todo o globo, exceto em altas latitudes no HN (FIGURA 133). Em todas as estações, o modelo apresenta aumento da TSM no Pacífico central-leste equatorial, principalmente na região mais próxima ao continente, onde a diferença de TSM excede 3°C. Isso indica que, para um futuro com cenário SSP2-4.5, a temperatura média da superfície do mar terá um gradiente longitudinal equatorial menor do que atualmente e que valores máximos de TSM no Pacífico equatorial central-leste durante EN serão maiores. Isso presume que as alterações na precipitação e na circulação mostradas nas FIGURAS 129, 131 e 132, são também consequências de um padrão de TSM futuro mais semelhante ao EN.

FIGURA 133 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2.



FONTE: A autora (2022).

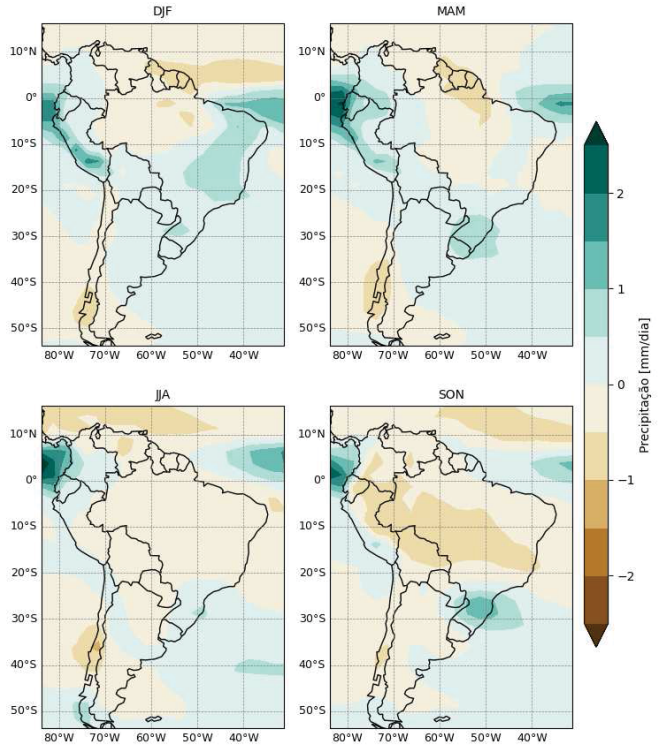
A média do conjunto de todos os modelos apresentou o melhor desempenho na simulação do clima presente. Da FIGURA 134, é possível notar que a média do conjunto não mostra grandes diferenças entre a precipitação simulada no clima presente e a projeção no cenário SSP2-4.5. Isto mostra que há dispersão nos resultados dos modelos. Contudo, notam-se alguns aspectos em comum com os dos dois modelos apresentados. Durante a primavera austral, há diminuição de chuva em quase todo o Brasil (mais forte na região da monção), mas aumento da precipitação no Sul do Brasil. Já no verão, há diminuição no noroeste do Brasil e aumento no centro-leste, Nordeste e Sul, além dos Andes tropicais. No outono, há diminuição no leste da Amazônia e aumento no Nordeste e no Sul. Portanto, pode-se concluir por um início mais tardio da monção, mas um pico mais intenso. Na Região Sul do Brasil haverá mais precipitação, principalmente nas estações de transição, outono e primavera.

Para regiões específicas da AS, foram calculados os ciclos anuais resultantes da média do conjunto de modelos no cenário SSP2-4.5. Na FIGURA 135 é possível comparar esses ciclos com aqueles simulados pela média do conjunto no clima presente.

Para a região núcleo da monção, a média do *ensemble* projeta a diminuição da precipitação entre agosto e novembro e o aumento durante o verão austral, em comparação com o clima presente. Esse padrão de diferenças também acontece para o centro-oeste e centro do Brasil e para a região de maior variabilidade da monção, embora a diferença de precipitação no início do ano seja maior nessas duas últimas

regiões, situadas mais a leste. Para o Sul do Brasil, exceto nos meses de agosto e setembro, a média do conjunto projeta o aumento da precipitação, principalmente entre o final da primavera e início do verão. Nas regiões no leste e no oeste do Norte do Brasil, a média do conjunto projeta redução da precipitação em quase todos os meses, contudo de pequena intensidade.

FIGURA 134 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS.

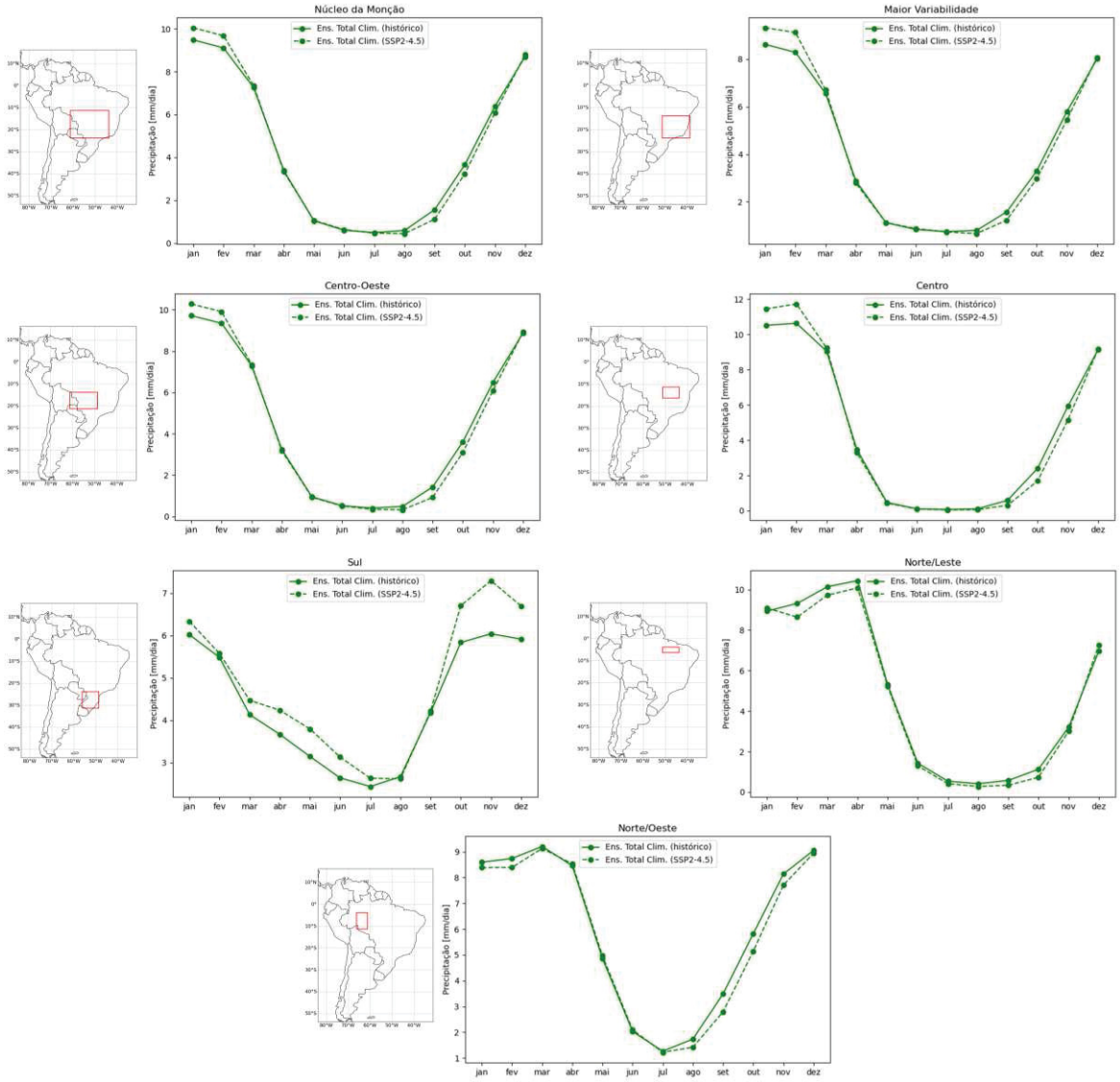


FONTE: A autora (2022).

As diferenças sazonais entre o clima futuro e o clima presente para a circulação atmosférica da média do conjunto de modelos são apresentadas nas FIGURAS 136 e 137. Tanto em baixos como em altos níveis, a média do ensemble não mostra grandes diferenças, sobretudo no centro do continente. As escalas dos mapas mostram que as maiores diferenças em baixos níveis chegam a aproximadamente 0,5 m/s e, em altos níveis, a 4 m/s, o que é muito pouco em comparação com a climatologia. Em todo caso, onde há um padrão visível de diferenças, há coerência com as diferenças de precipitação, como no caso de primavera (SON), quando há divergência de baixos níveis do centro-leste do Brasil e convergência para o Sul, onde também é fortalecida uma circulação ciclônica.

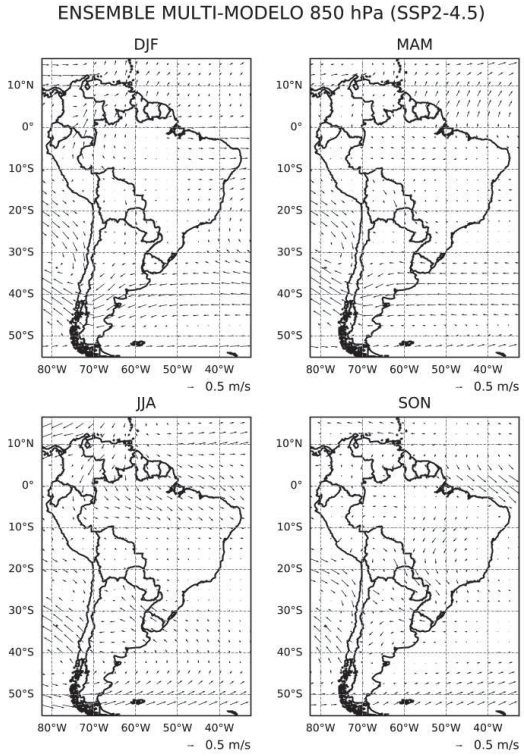
Também jato de baixos níveis a leste dos Andes tende a ser fortalecido. Uma circulação ciclônica em altos níveis um pouco a sudoeste também favorece a maior precipitação verificada no Sul.

FIGURA 135 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS NO CENÁRIO SSP2-4.5 E NAS RODADAS HISTÓRICAS.



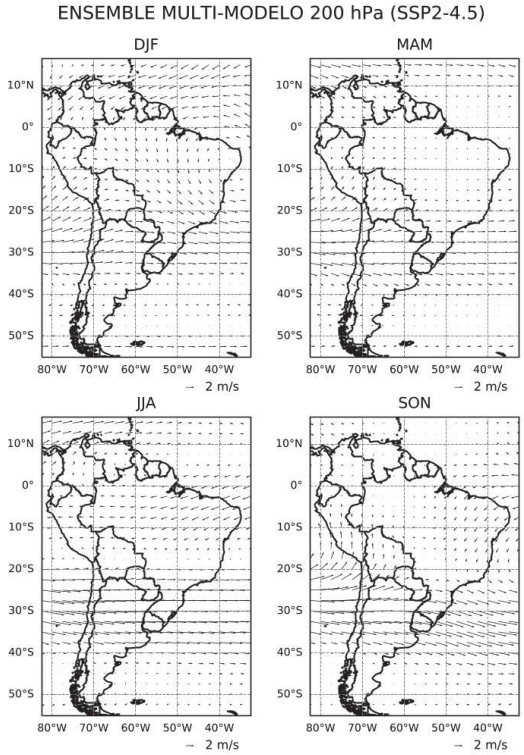
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 136 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS.



FONTE: A autora (2022).

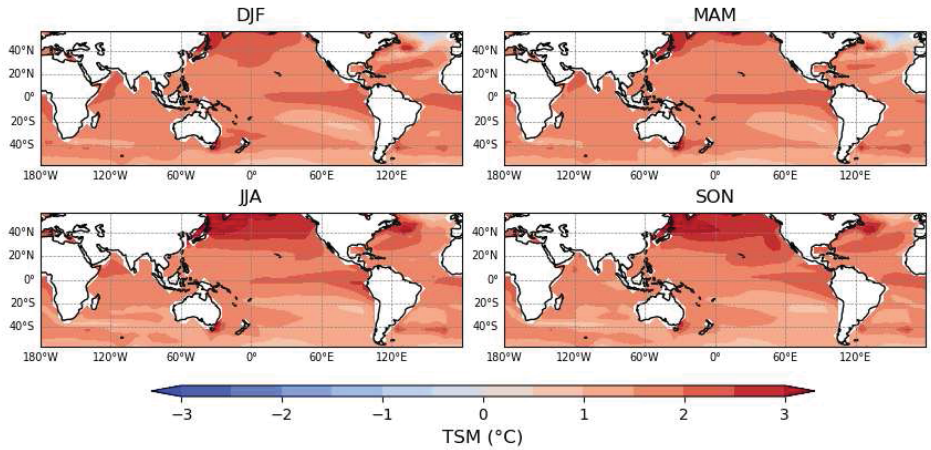
FIGURA 137 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS.



FONTE: A autora (2022).

Com relação à TSM, a média do conjunto de modelos mostra o seu aumento em quase todo o globo, principalmente no HN (FIGURA 138). Assim como os resultados do CESM2, a média do *ensemble* também apresenta o aumento da TSM no Pacífico central-leste equatorial, embora a diferença seja menor nesse caso (entre 2°C e 2,5°C). Isso indica que grande parte dos modelos simulam para o clima futuro o aumento da TSM em um padrão semelhante ao EN.

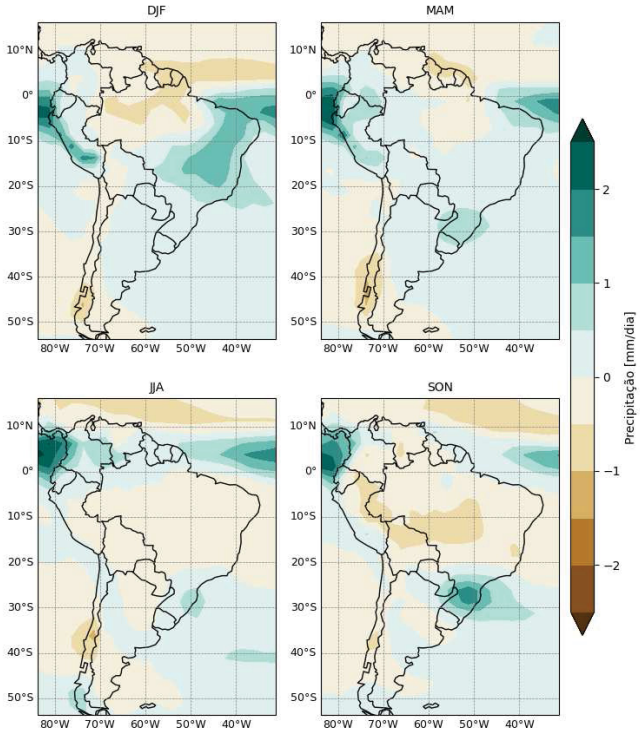
FIGURA 138 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA RESULTADOS DA MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS.



FONTE: A autora (2022).

As análises de diferenças entre simulações no clima presente e futuro (cenário SSP2-4.5) também foram feitas para a média do conjunto dos 7 modelos com melhor desempenho em representar o ENOS no clima presente. Assim, a FIGURA 139 apresenta as diferenças simuladas entre os dois períodos para a precipitação. A média dos melhores modelos projeta para o verão o aumento da precipitação no Nordeste do Brasil e no centro-leste e a redução na região Amazônica, principalmente mais ao norte. No outono e, principalmente, na primavera, as projeções mostram o aumento da precipitação no Sul do Brasil. Ainda na primavera, os resultados exibem a redução da precipitação em quase todo o Brasil, exceto no Sul. Embora os resultados sejam qualitativamente semelhantes aos do conjunto de todos os modelos (FIGURA 134), nota-se maior intensidade nas diferenças, o que enfatiza a importância de que os modelos simulem bem ENOS.

FIGURA 139 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA RESULTADOS DA MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.

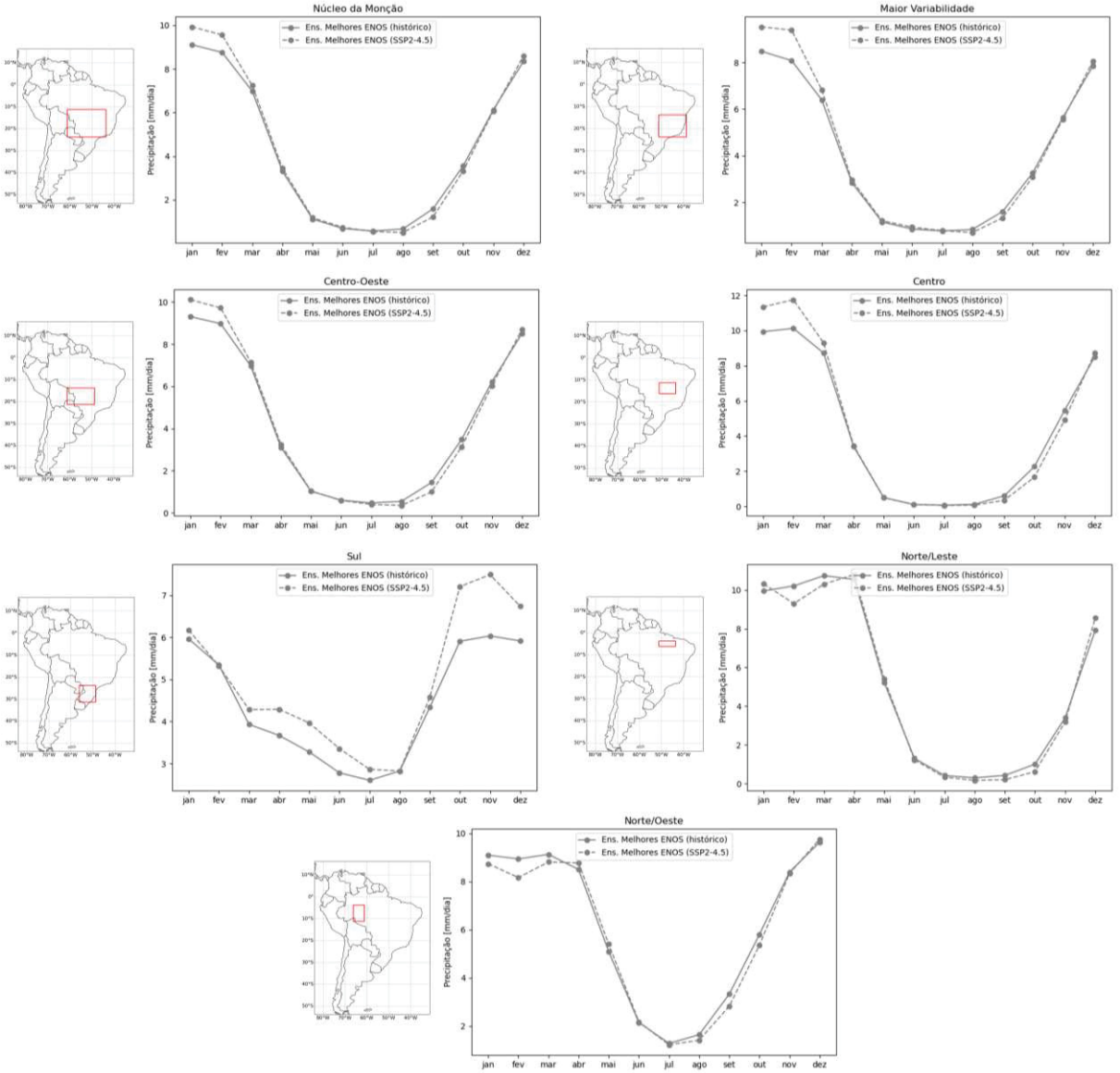


FONTE: A autora (2022).

Para regiões específicas da AS, foram calculados os ciclos anuais de precipitação apresentados na FIGURA 140. Tanto no núcleo quanto na região de maior variabilidade da monção da AS, os ciclos anuais indicam o aumento da precipitação no futuro nos meses de verão, até março. Entre abril e julho, a precipitação futura é bem próxima da simulada no clima presente. Já entre agosto e outubro, as projeções mostram diminuição da precipitação nessas regiões. No centro-oeste e centro do Brasil, os resultados indicam diminuição da precipitação entre agosto e novembro e aumento, entre dezembro e março. Nos demais meses, as projeções são bem próximas das simulações no clima presente. Por outro lado, no Sul do Brasil a precipitação no futuro é maior em quase todos os meses do que a precipitação no clima presente. Os únicos meses que não mostram aumento, apresentam valores iguais para a precipitação nos dois períodos. Especificamente, entre outubro e dezembro as diferenças são ainda maiores. Apesar das regiões Norte/Leste e Norte/Oeste apresentarem ciclos anuais distintos, os padrões de diferenças mostrados para as regiões são bastante similares. Assim, para essas regiões, projeta-se o aumento da precipitação nesse cenário em dezembro, janeiro e

abril. Entre fevereiro e março e entre julho e novembro, as projeções mostram diminuição da precipitação. Já em maio e junho, não há grandes alterações. Embora os resultados sejam qualitativamente semelhantes aos do conjunto de todos os modelos (FIGURA 135), nota-se maior intensidade nas diferenças obtidas da média de conjunto dos 7 modelos que simulam melhor ENOS.

FIGURA 140 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE NO CENÁRIO SSP2-4.5 E NAS RODADAS HISTÓRICAS.



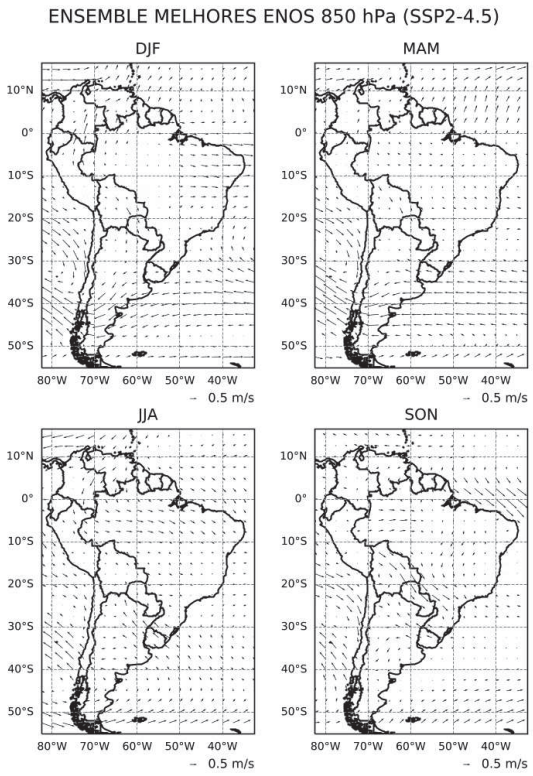
FONTE: A autora (2022).

Para a média do conjunto dos melhores modelos ao simularem o ENOS, os mapas das diferenças entre a circulação no clima futuro (cenário SSP2-4.5) e presente são apresentados nas FIGURAS 141 e 142, para baixos e altos níveis,

respectivamente. Novamente, as projeções não apresentam grandes diferenças na circulação em comparação com o clima presente. Para baixos níveis, as maiores diferenças ocorrem no vento a leste dos Andes na primavera, embora essa diferença fique em torno de 1 m/s. Para altos níveis, as maiores diferenças encontram-se entre 20°S e 40°S no inverno e na primavera austral. No entanto, essas diferenças são de apenas 4 m/s, aproximadamente. Outros comentários são semelhantes aos feitos sobre a média de conjunto de todos os modelos (FIGURA 136 e FIGURA 137).

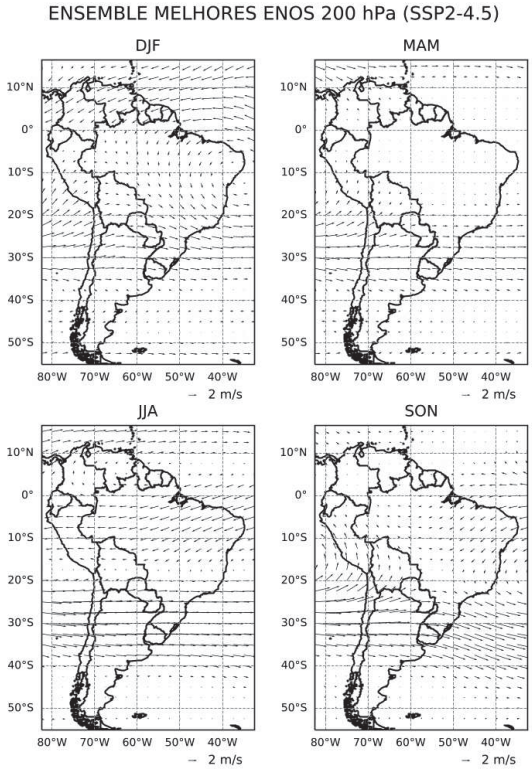
Para as diferenças entre a TSM simulada no clima futuro e presente, a média do conjunto de 7 melhores modelos na simulação de ENOS mostra resultados bastante semelhantes aos da média do conjunto de todos os modelos (FIGURA 138). Assim, de acordo com a FIGURA 143, é projetado o aumento da TSM em todo o globo, exceto próximo ao oceano Ártico. No centro-leste do Pacífico equatorial e também no norte do Pacífico, é mostrado o aumento mais intenso da TSM. Esse padrão no Pacífico central-leste equatorial aponta um clima futuro com características de El Niño.

FIGURA 141 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.



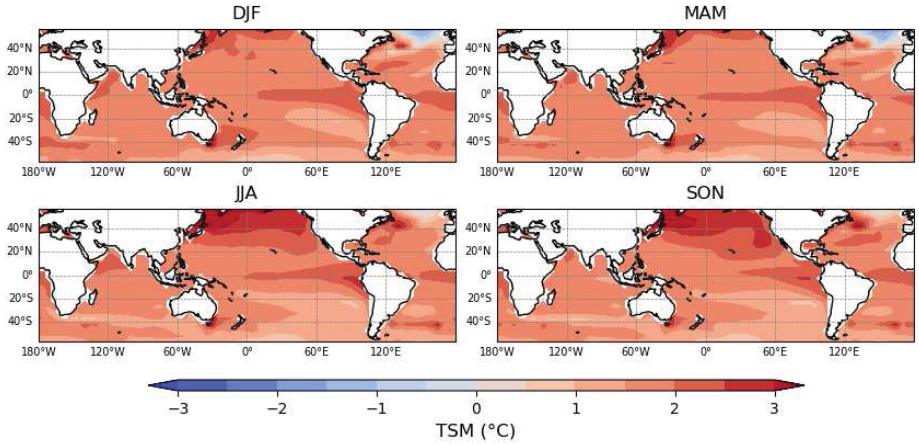
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 142 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 143 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP2-4.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

.

6 PROJEÇÕES DOS MODELOS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5

6.1 PRECIPITAÇÃO

No experimento SSP5-8.5 do CMIP6, as simulações dos modelos climáticos são feitas dentro de um cenário futuro no qual nenhuma ação é tomada a fim de reduzir a emissão de GEE na atmosfera. Para estudar as principais mudanças da precipitação no clima da AS projetadas nesse cenário, foram obtidas climatologias de precipitação a nível mensal e sazonal para os resultados dos 11 modelos (TABELA 1) e para a média do conjunto de modelos, novamente para o período de 2065 a 2100.

A análise das climatologias mensais e sazonais de precipitação mostra que, de maneira geral, todos os modelos projetam no futuro o ciclo anual de precipitação de forma similar ao clima presente. A precipitação no centro do Brasil aumenta a partir de novembro, atinge um pico nos meses do verão austral e decai até o inverno, quando a precipitação total na AS atinge um mínimo e está mais concentrada próximo do equador.

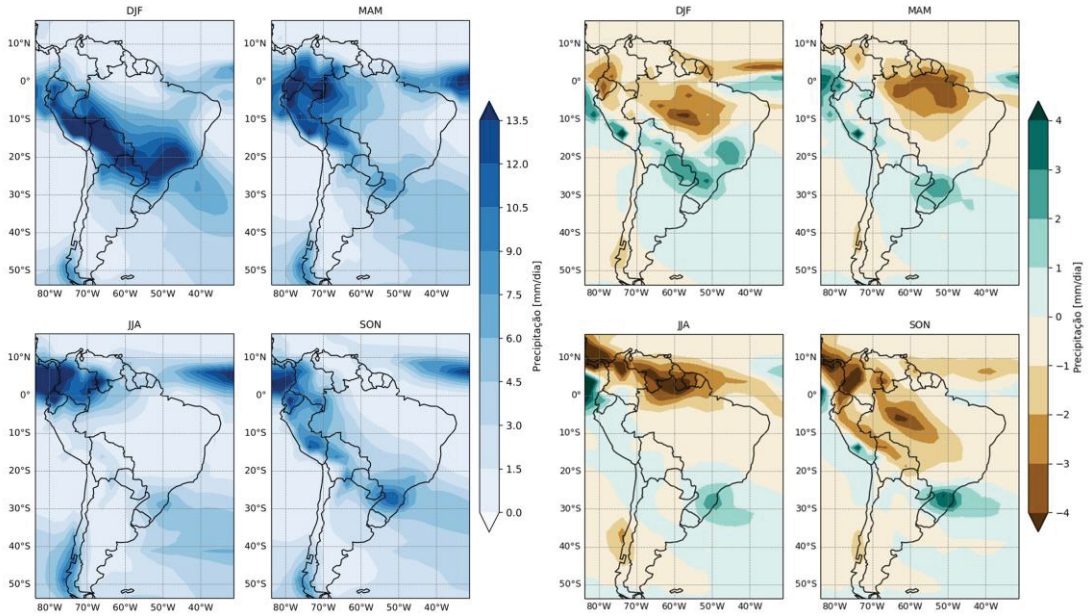
Através da comparação das climatologias de precipitação obtidas nesse cenário com as respectivas climatologias produzidas para o clima presente, verificou-se que as projeções mostram variações na intensidade da precipitação de um período para o outro em um mesmo modelo. Frequentemente essas alterações são mais intensas do que as apresentadas pelas projeções no cenário SSP2-4.5.

O modelo ACCESS-ESM1-5 (FIGURA 144) mostra aumento de precipitação no Sul do Brasil em todas as estações. No verão austral, o modelo mostra aumento também no Paraguai e sudeste do Brasil e diminuição na região Amazônica, em comparação com a simulação do clima presente (FIGURA 13). No outono austral, o ACCESS-ESM1-5 projeta diminuição da precipitação no norte do Brasil e leste da Amazônia. No inverno, mostra bastante redução da precipitação concentrada no norte da AS, próximo do equador. Já na primavera, o modelo mostra diminuição da precipitação na região Amazônica e nos Andes.

Em comparação com a climatologia do período presente (FIGURA 15), o modelo CanESM5 (FIGURA 145) exibe aumento de precipitação nos Andes e em SESA e diminuição no centro-leste do Brasil no verão austral. No outono, o modelo mostra redução de precipitação no Centro e Nordeste do Brasil. No inverno austral, mostra diminuição da precipitação mais intensa, a qual se concentra na região

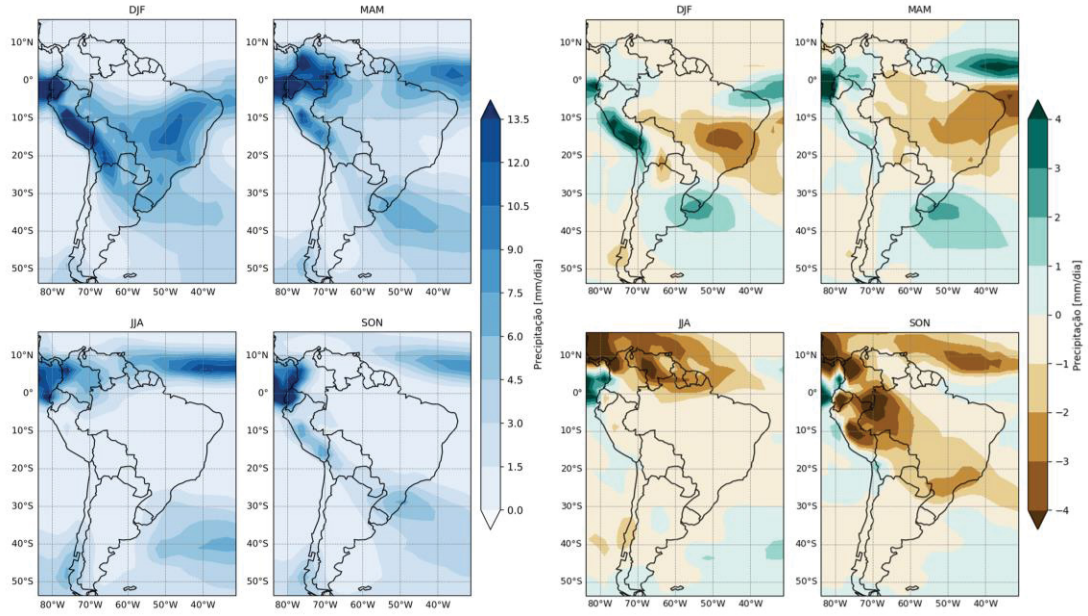
equatorial nesse período. Durante a primavera austral, o CanESM5 projeta diminuição de precipitação em todas as regiões que mostram precipitação no clima presente, principalmente no Noroeste da AS e sudeste do Brasil.

FIGURA 144 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO ACCESS-ESM1-5 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 145 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CANESM5 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.

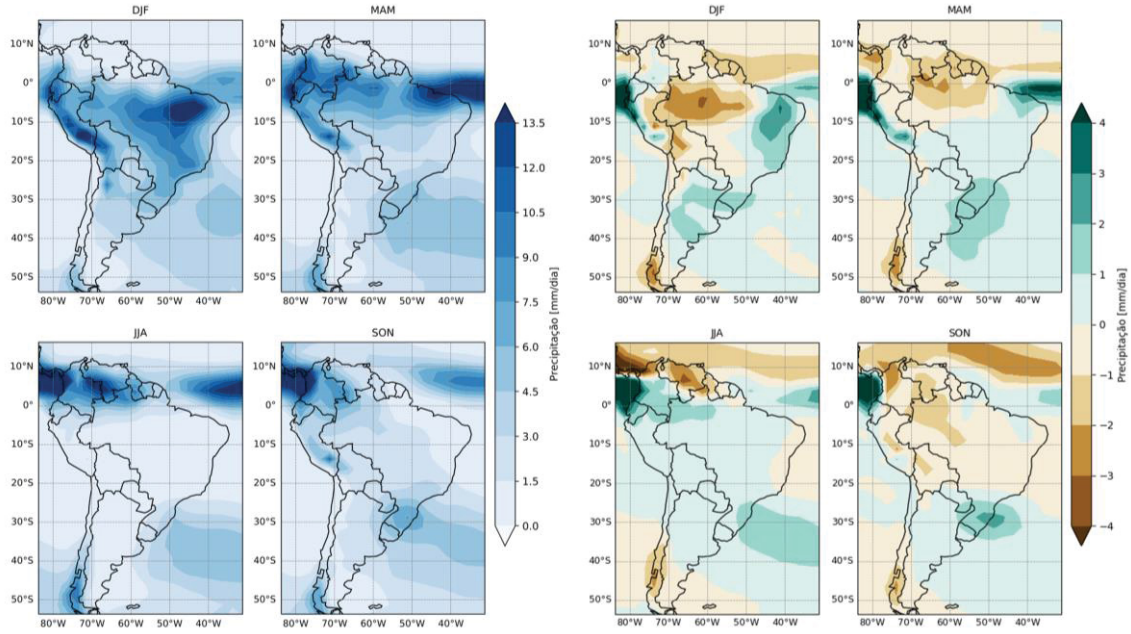


FONTE: A autora (2022).

O modelo CESM2 (FIGURA 146) projeta para o verão aumento de precipitação no nordeste, sul e centro-leste do Brasil e diminuição na região Amazônica, em relação ao clima presente (FIGURA 17). No outono e na primavera austral, o modelo mostra aumento de precipitação no Sul e redução no Norte do Brasil.

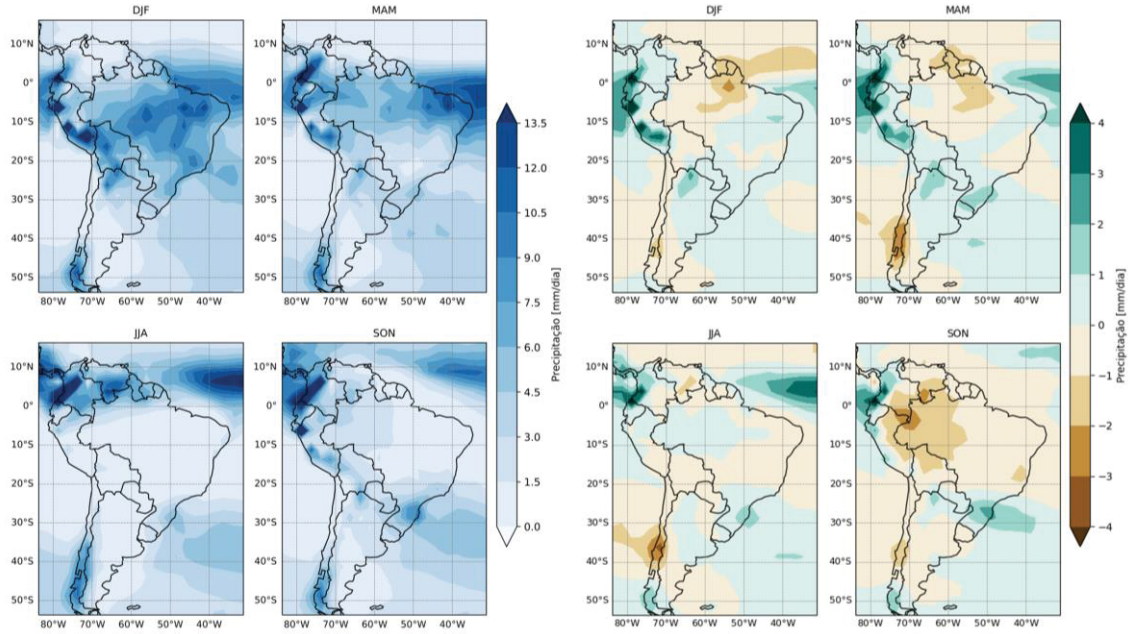
O modelo CNRM-CM6-1 (FIGURA 147), em comparação com a climatologia da FIGURA 18, mostra redução de precipitação na região Amazônica na primavera austral e, assim como os demais modelos avaliados a seguir, projeta no futuro aumento da precipitação nos Andes durante o verão austral. O EC-Earth3-Veg (FIGURA 148) mostra, também para o verão austral, aumento da precipitação no centro-leste do Brasil, com relação ao apresentado pela FIGURA 23 para o clima presente. Já para a primavera austral, o modelo projeta redução de precipitação no noroeste da AS, em uma faixa que se estende até o sudeste do Brasil, e aumento no Sul do Brasil.

FIGURA 146 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.



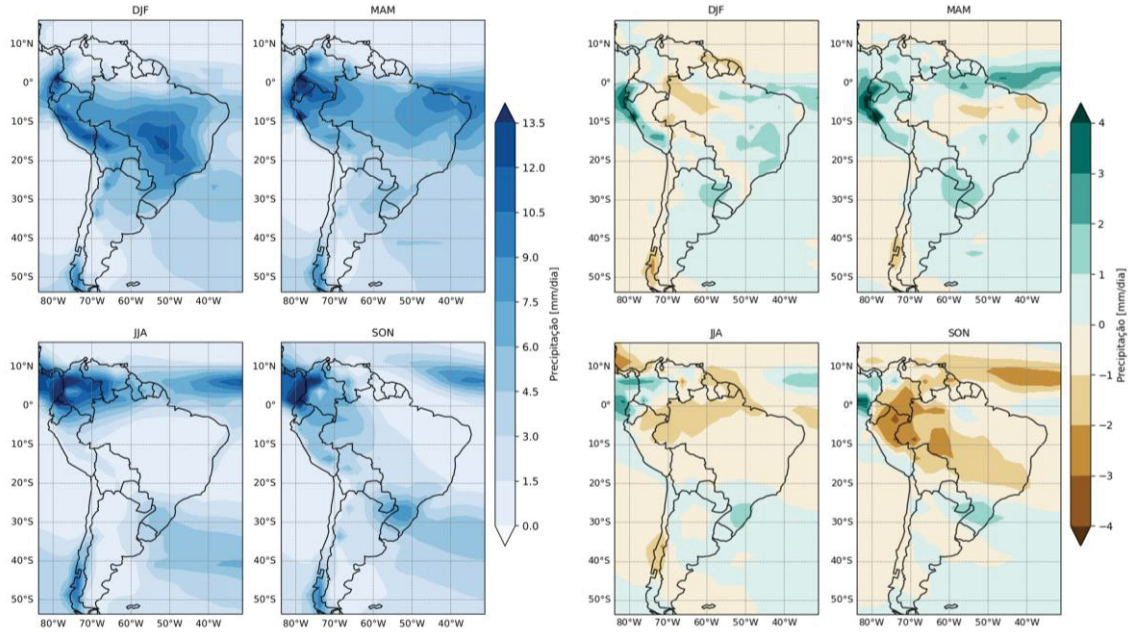
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 147 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CNRM-CM6-1 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 148 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.

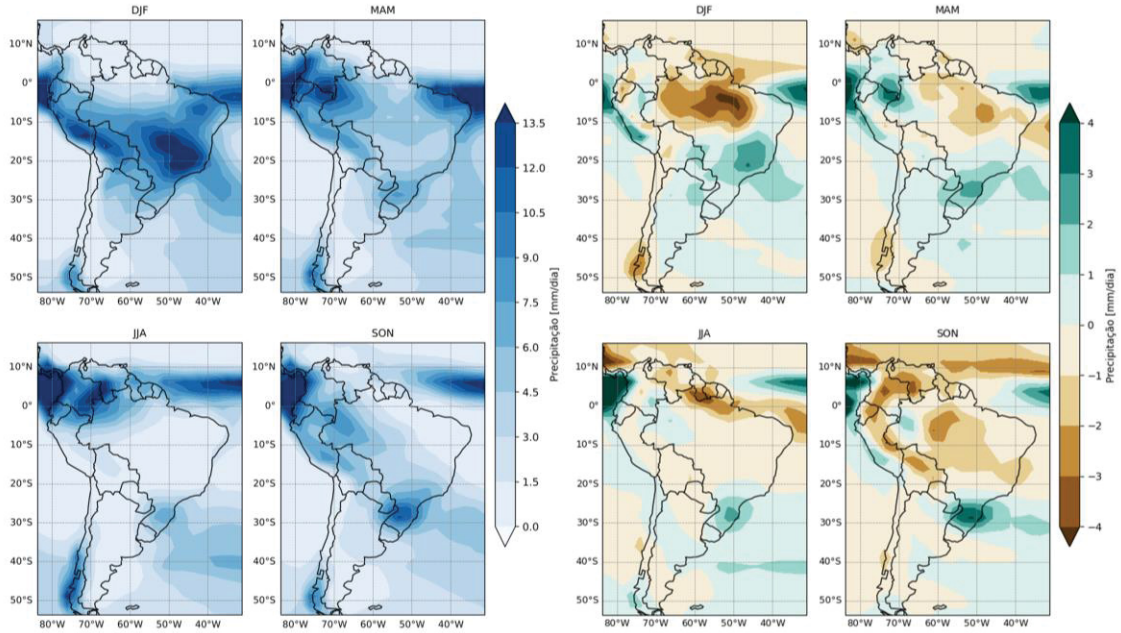


FONTE: A autora (2022).

O modelo HadGEM3-GC31-LL (FIGURA 149), em comparação com a climatologia presente (FIGURA 20), mostra para o verão austral aumento de precipitação no Sudeste do Brasil e diminuição na região Amazônica. Para o outono,

o modelo mostra aumento da precipitação no noroeste da AS e no Sul do Brasil, e redução no Nordeste do Brasil. Já para a primavera austral, o HadGEM3-GC31-LL projeta aumento da precipitação no Sul do Brasil e diminuição na Amazônia, no centro do Brasil e nos Andes.

FIGURA 149 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.



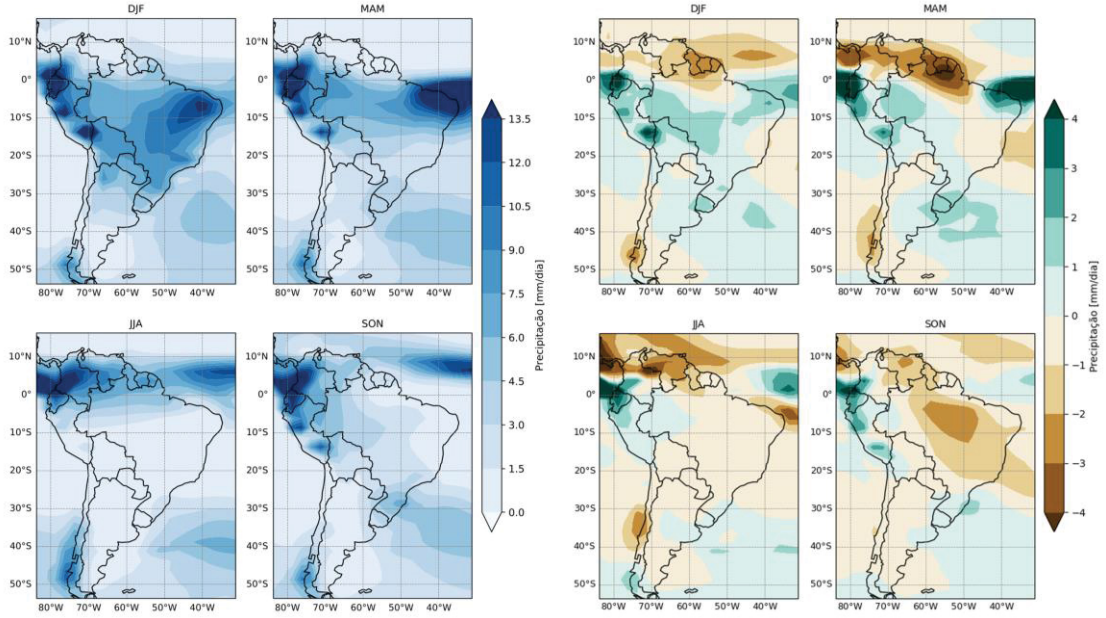
FONTE: A autora (2022).

O modelo IPSL-CM6A-LR (FIGURA 150) simula para o futuro aumento de precipitação sobre o Nordeste do Brasil e sobre a região Amazônica no verão austral, em comparação com o clima presente (FIGURA 19). Por outro lado, o modelo mostra diminuição de precipitação em grande parte do Brasil na primavera austral, principalmente no leste da região Amazônica.

O modelo KACE-1-0-G (FIGURA 151) mostra, para o verão austral, aumento de precipitação no centro-leste e Sul do Brasil. Com relação à climatologia presente (FIGURA 16), o modelo simula para o outono austral aumento da precipitação no noroeste da AS e no sudeste e sul do Brasil. Nessa região, o KACE-1-0-G também apresenta aumento de precipitação durante a primavera austral. Já o modelo MIROC6 (FIGURA 152), quase não mostra alterações entre o clima presente (FIGURA 21) e o clima projetado neste cenário. As mudanças mais evidentes são o aumento da

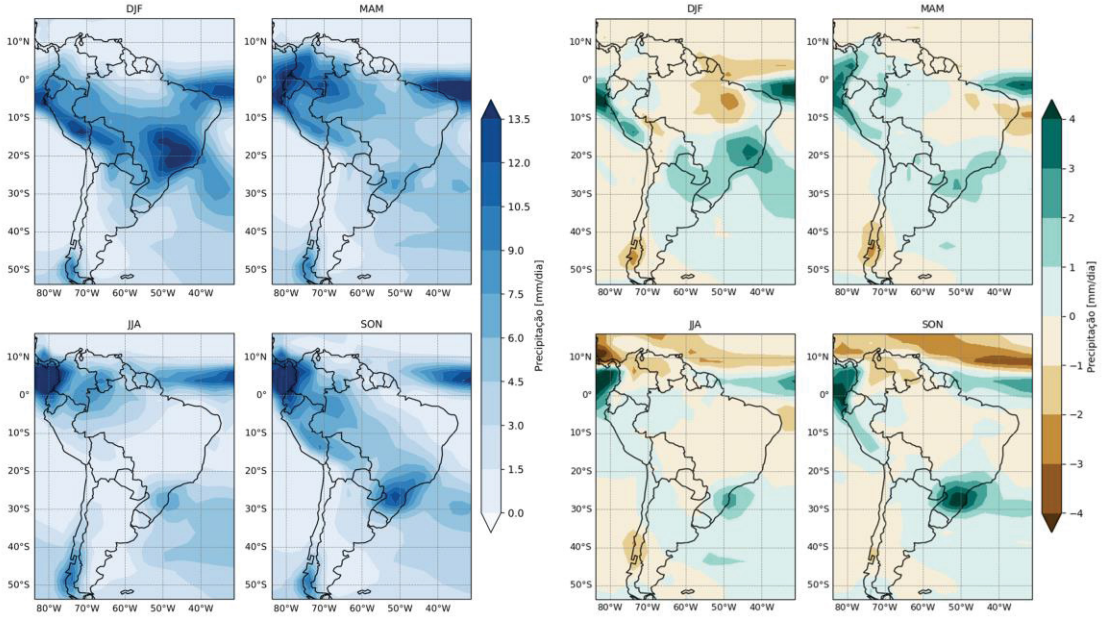
precipitação no noroeste da AS no verão e outono austral e no Sul do Brasil também no outono e na primavera austral.

FIGURA 150 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.



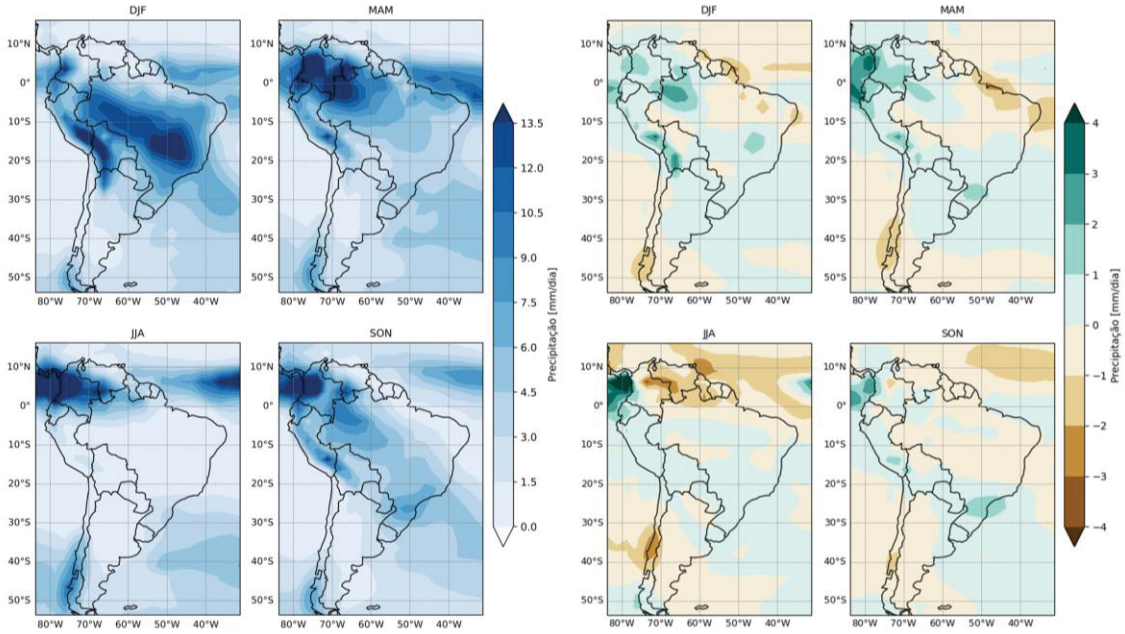
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 151 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO KACE-1-0-G NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

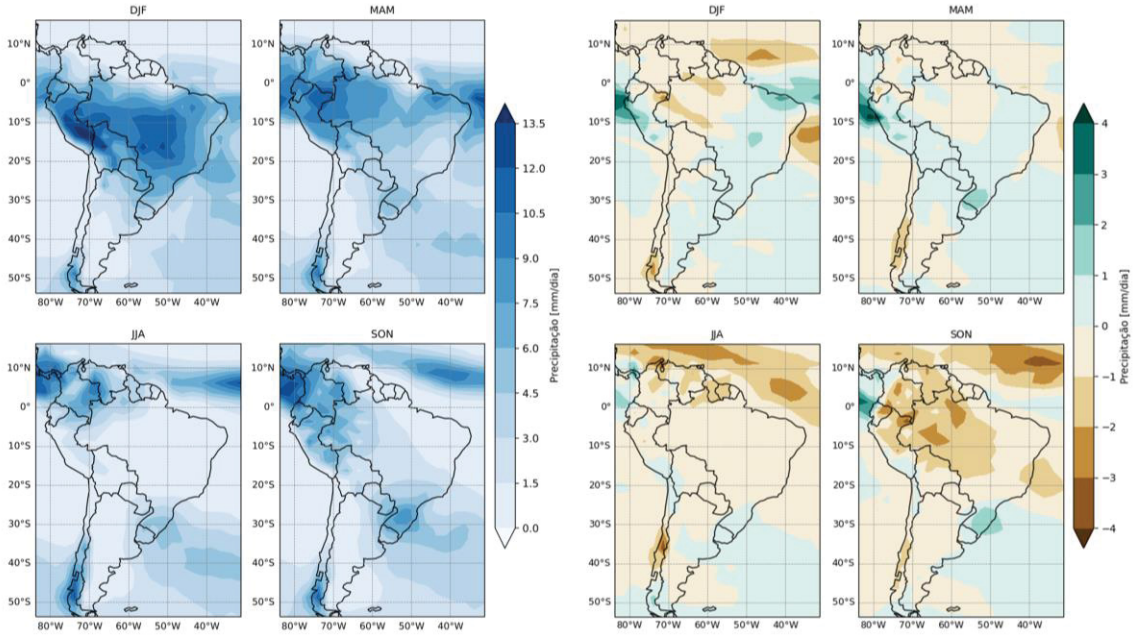
FIGURA 152 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MIROC6 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

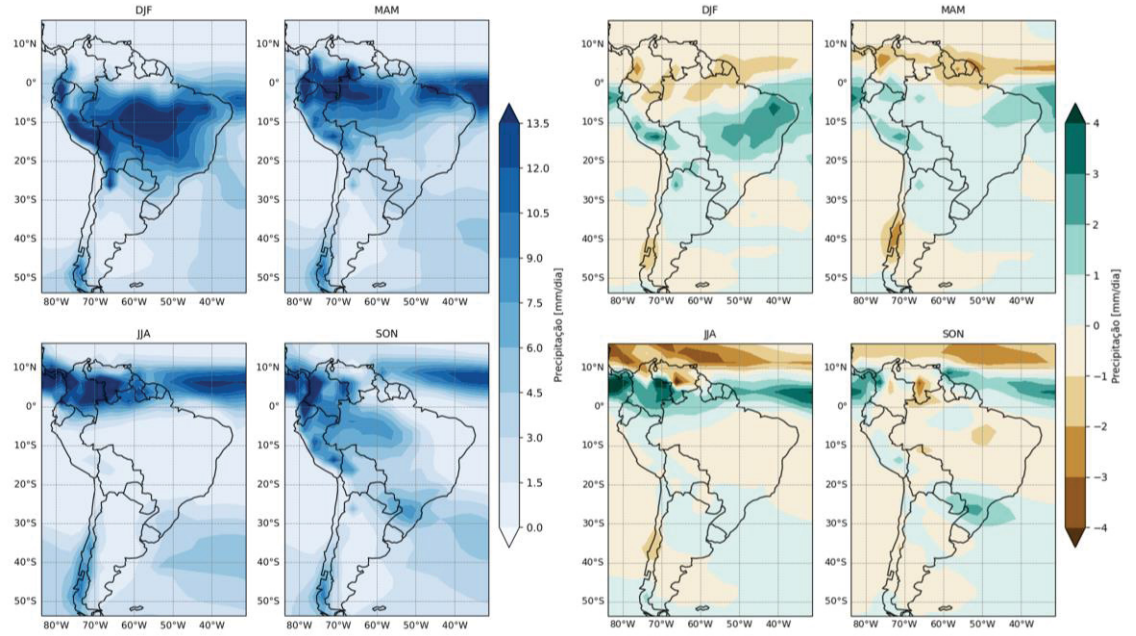
Em comparação com o clima presente (FIGURA 22), o modelo MPI-ESM1-2-HR (FIGURA 153) mostra aumento da precipitação no Sul do Brasil e diminuição na região Amazônica na primavera austral. Ademais, o modelo mostra aumento da precipitação no Sul do Brasil também no outono austral. Já o modelo MRI-ESM2-0 (FIGURA 154) projeta aumento de precipitação sobre o Centro e Nordeste do Brasil no verão austral, em relação à simulação do clima presente (FIGURA 14). No inverno austral, o MRI-ESM2-0 mostra aumento de precipitação no norte da AS, acima do equador. Já na primavera austral, o modelo apresenta aumento da precipitação no Sul do Brasil.

FIGURA 153 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MPI-ESM1-2-HR NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 154 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO MRI-ESM2-0 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.

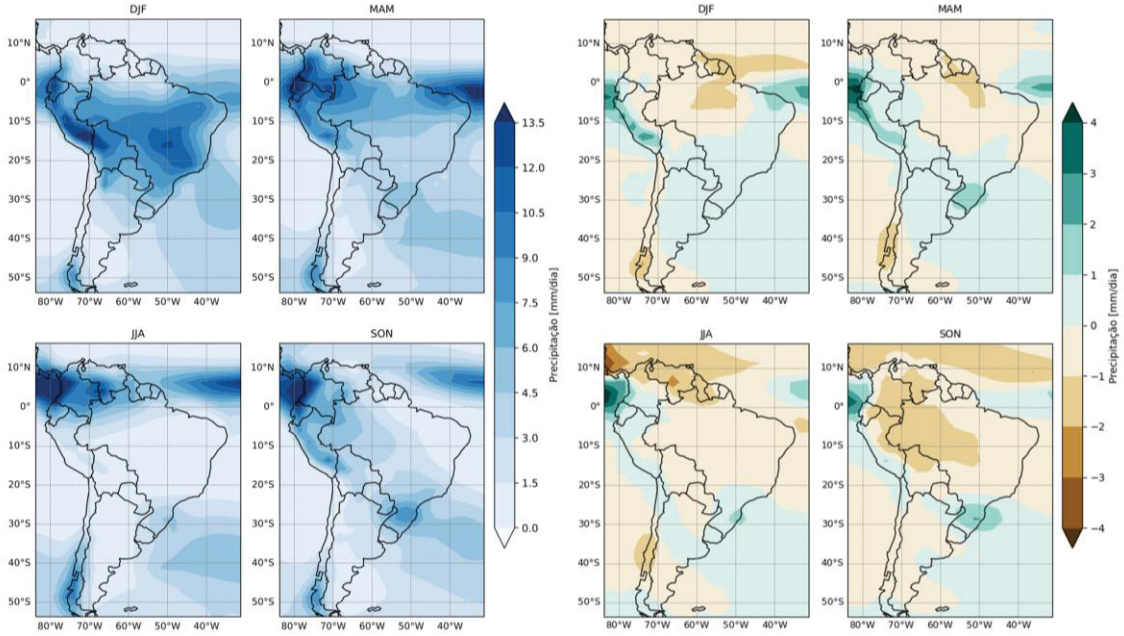


FONTE: A autora (2022).

A média do conjunto de todos os modelos (FIGURA 155) mostra poucas alterações com relação ao clima presente (FIGURA 24). Para o verão austral é projetada redução de precipitação no norte do Brasil. Já na primavera, a média do

ensemble mostra redução de precipitação na região Amazônica e aumento no Sul do Brasil, o qual também ocorre no outono austral.

FIGURA 155 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

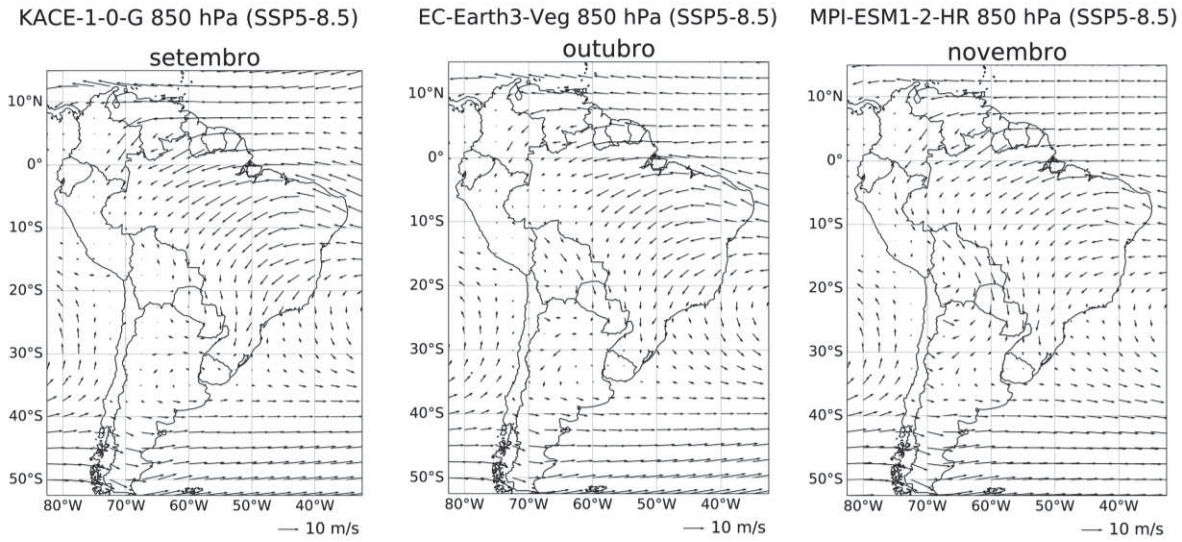
6.2 CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA

Analogamente ao processo realizado anteriormente para o clima presente e para simulações no cenário SSP2-4.5, foram obtidas climatologias da circulação atmosférica em baixos (850 hPa) e altos níveis (200 hPa) para os 11 modelos aqui avaliados e para a média do conjunto desses modelos, no cenário SSP5-8.5. Da mesma forma como as análises anteriores, essas climatologias foram feitas a nível mensal e sazonal.

De maneira geral, em baixos níveis (850 hPa) todos os modelos simulam no clima futuro a mudança na direção do vento equatorial de sudeste/leste no inverno para leste/nordeste no verão austral. Nesse período, ao atingirem os Andes no interior do continente, o vento adquire direção noroeste e se dirige para o sul do Brasil, adquirindo circulação ciclônica em torno da baixa do Chaco. Logo, durante o verão do HS, esse vento é intensificado e o sistema de baixa pressão fortalecido. Com o final do verão, os modelos mostram o enfraquecimento do vento equatorial de nordeste.

Assim como nos dois experimentos anteriores (histórico e SSP2-4.5), as simulações da circulação em baixos níveis feitas pelos modelos e média do conjunto no cenário SSP5-8.5, também mostram variações quanto ao mês em que projetam a mudança na direção do vento equatorial para vento de nordeste. Nesse cenário, o modelo KACE-1-0-G se adianta ao representar em setembro essa mudança na direção do vento (FIGURA 156). Já os demais modelos, simulam em outubro e novembro. Na FIGURA 156 é possível consultar um modelo que representa o início da circulação de monção em baixos níveis em outubro (EC-Earth3-Veg) e outro em novembro (MPI-ESM1-2-HR).

FIGURA 156 – CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS DE MODELOS QUE SIMULAM EM SETEMBRO, OUTUBRO E NOVEMBRO A ALTERAÇÃO NA DIREÇÃO DO VENTO EQUATORIAL QUE INCIDE NO CONTINENTE (CENÁRIO SSP5-8.5).



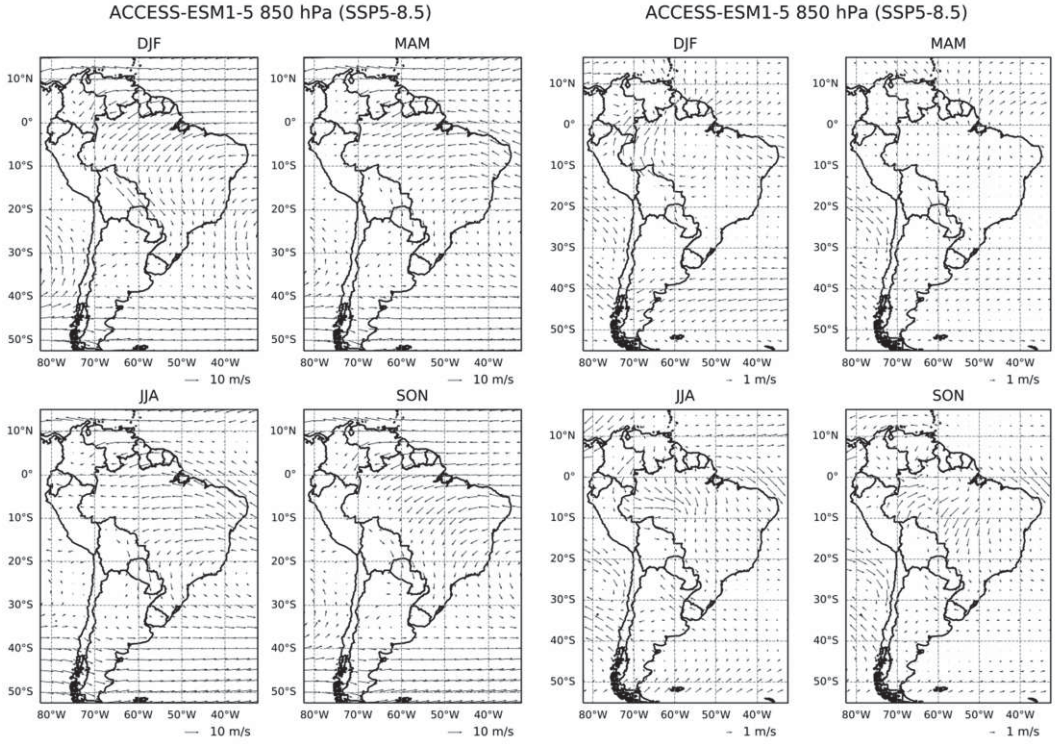
FONTE: A autora (2022).

De modo geral, em baixos níveis, os modelos não apresentam grandes variações na velocidade do vento sobre a AS ao se comparar as climatologias obtidas no cenário SSP5-8.5 com as resultantes do clima presente. Contudo, a maioria dos modelos projeta redução da velocidade do vento sobre a Amazônia no inverno austral. Os modelos ACCESS-ESM1-5 e HadGEM3-GC31-LL também mostram alterações no verão e na primavera austral (FIGURA 157 e FIGURA 158), semelhantes às mudanças apresentadas pelos modelos no cenário SSP2-4.5 (FIGURA 96 e FIGURA 97). As diferenças mostram para o verão divergência sobre a região Amazônica, explicando a redução da precipitação nessa região simulada pelos modelos (FIGURA 144 e FIGURA 149). Para a primavera, as diferenças também mostram convergência

dos ventos em baixos níveis no Sul do Brasil, onde os modelos projetam aumento da precipitação neste cenário. As variações na velocidade do vento apresentadas por esses modelos estão relacionadas às variações na intensidade da precipitação de um cenário para o outro. Os campos de vento sazonais em baixos níveis simulados por todos os modelos neste cenário podem ser consultados no Anexo 2.

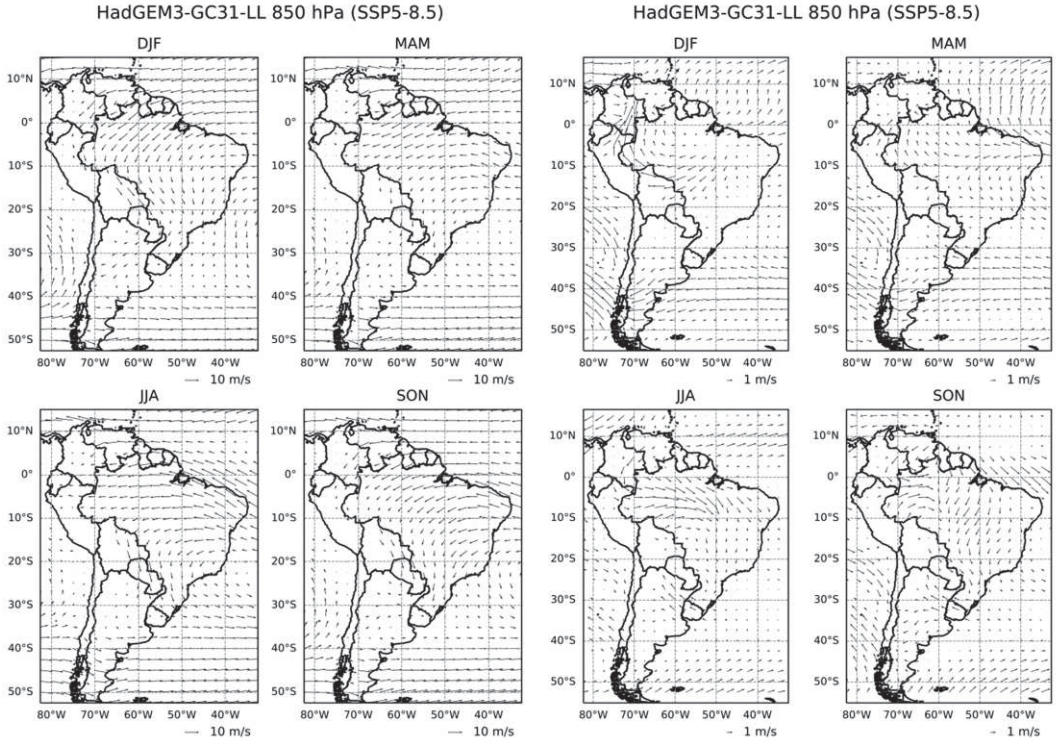
Em altos níveis (200 hPa), os modelos e a média do conjunto de modelos mostram no futuro a alta sobre a Amazônia na primavera austral e no verão austral, representam a Alta da Bolívia. Com o final do verão, mostram o deslocamento da circulação anticiclônica para norte e seu enfraquecimento no outono.

FIGURA 157 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS (850 hPa) PARA O MODELO ACCESS-ESM1-5 NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

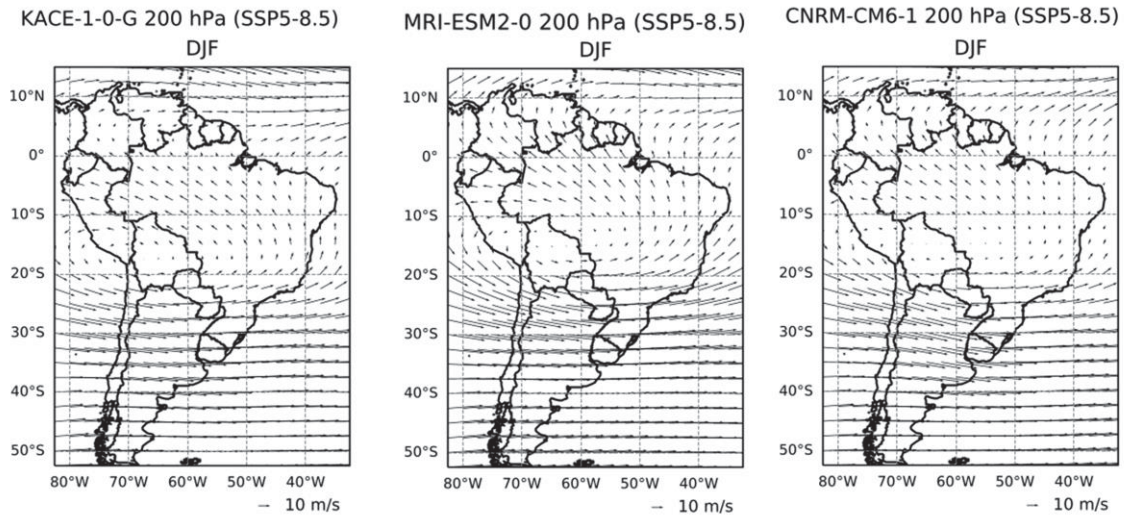
FIGURA 158 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS (850 hPa) PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

Assim como nas análises anteriores, os modelos representam a Alta da Bolívia em 200 hPa no verão centrada sobre este país. Porém cada modelo pode representá-la um pouco diferente, dependendo da posição da máxima precipitação no verão e de sua intensidade (FIGURA 159). O KACE-1-0-G simula neste cenário a máxima precipitação de verão no sudeste do Brasil (FIGURA 151), onde a circulação anticiclônica mostra curvatura. O modelo MRI-ESM2-0, diferentemente do KACE-1-0-G, mostra o centro da AB mais para norte e a precipitação de verão apresentada pelo modelo neste cenário é bastante intensa sobre o noroeste da AS (FIGURA 154). Já o modelo CNRM-CM6-1, em comparação com os outros dois modelos, mostra circulação mais fraca em todo Brasil e a precipitação de verão simulada pelo modelo também é menos intensa (FIGURA 147).

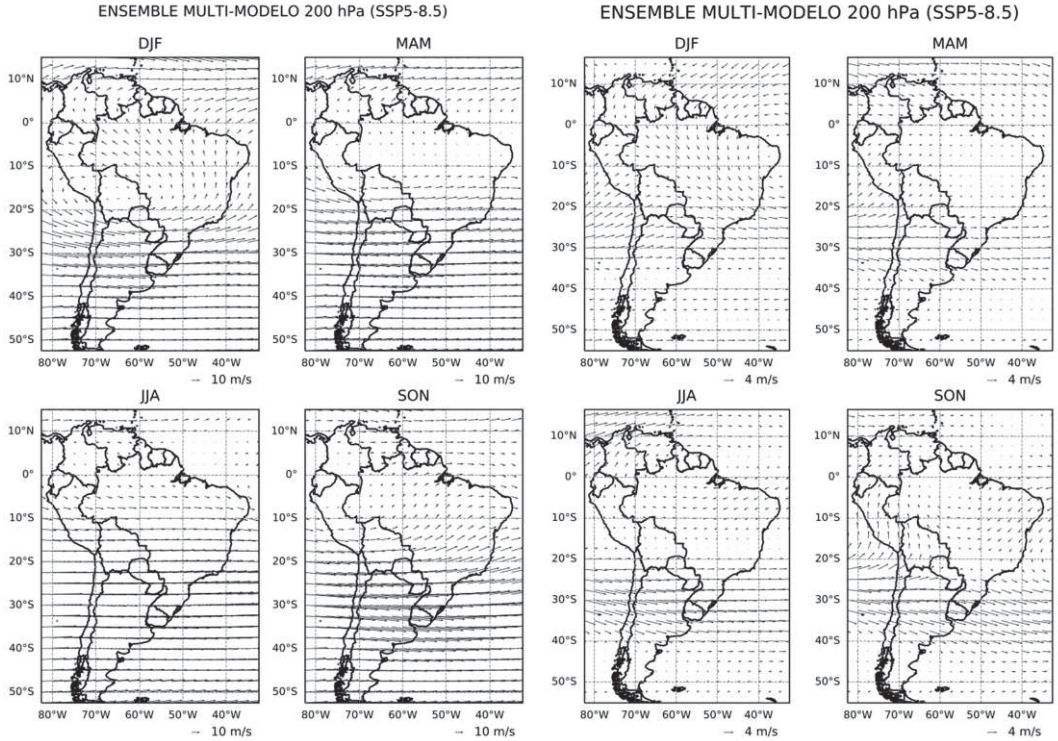
FIGURA 159 – EXEMPLOS DE CAMPOS DE VENTO EM ALTOS NÍVEIS DE MODELOS QUE MOSTRAM ALTERAÇÕES NA CIRCULAÇÃO ANTICILÔNICA NO VERÃO AUSTRAL, NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).

Em geral, os modelos e a média do conjunto de modelos não mostram para altos níveis grandes alterações na velocidade do vento em comparação com o clima presente. No entanto, frequentemente apresentam aumento da velocidade do vento no norte da Argentina, Uruguai, Paraguai e Sul do Brasil, sobretudo no inverno e na primavera austral. Durante o verão austral, projetam redução da velocidade do vento no Norte e Nordeste do Brasil. Esse comportamento pode ser verificado na FIGURA 160, que mostra as diferenças entre as climatologias da média do conjunto de modelos para o cenário SSP5-8.5 e o clima presente. Os campos de ventos em altos níveis simulados por cada modelo neste cenário a nível sazonal podem ser consultados no Anexo 2.

FIGURA 160 – PAINÉIS À ESQUERDA: CLIMATOLOGIA SAZONAL DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS (200 hPa) PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS NO CENÁRIO SSP5-8.5. PAINÉIS À DIREITA: DIFERENÇAS ENTRE AS CLIMATOLOGIAS PARA O CENÁRIO SSP5-8.5 E O CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

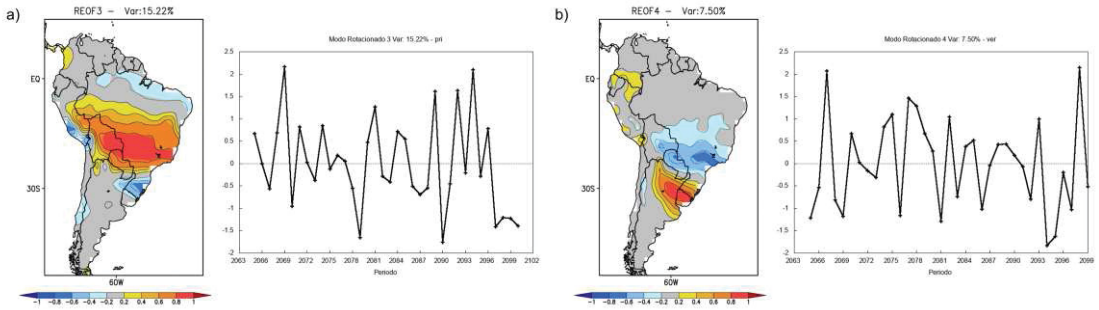
6.3 MODOS DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO

Modos de variabilidade de precipitação foram calculados também para os modelos no cenário mais pessimista SSP5-8.5, para o período de 2065 a 2100. Analogamente ao que foi mostrado para os dois experimentos anteriores (histórico e SSP2-4.5), essas análises foram feitas a fim de verificar possíveis diferenças nos principais modos de variabilidade interanual da primavera e do verão simulados pelos modelos entre o clima futuro e o clima presente.

De maneira geral, os resultados dos modelos para cenário futuro SSP5-8.5 concordam com os resultados mostrados no clima presente e no cenário SSP2-4.5. Alguns modelos mostram modos de primavera e verão com fortes anomalias em CESA e mais fracas de sinais opostos em SESA. A maioria dos modelos os mostram com fortes anomalias em CESA estendidas por uma grande área além do centro-leste do Brasil e com anomalias fracas em SESA. Além disso, praticamente metade dos modelos simulam um modo tipo dipolo em apenas uma das estações.

O modelo ACCESS-ESM1-5 apresenta modos tipo dipolo na primavera e no verão austral bem similares aos mostrados nas projeções do cenário SSP2-4.5. Na primavera, o modelo apresenta como o terceiro modo rotacionado um dipolo com uma forte anomalia espalhada pelo centro da AS e anomalia de sinal oposto no Sul do Brasil (FIGURA 161a). No verão, o modelo mostra um modo com anomalias tipo dipolo no Sudeste/Centro-oeste do Brasil e em SESA, sendo esse o quarto modo rotacionado (REOF4) (FIGURA 161b).

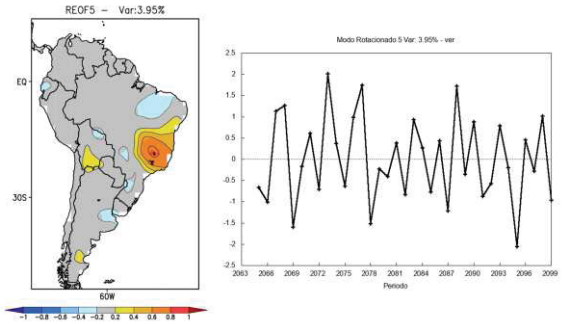
FIGURA 161 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO ACCESS-ESM1-5 NO CENÁRIO SSP5-8.5. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

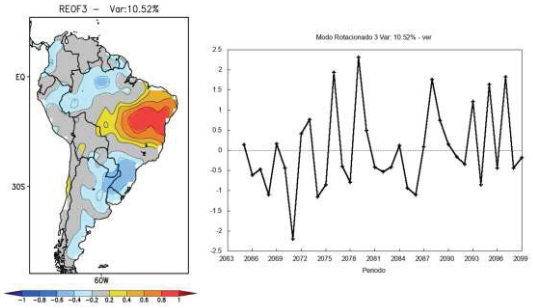
O modelo CanESM5 não apresenta entre os primeiros modos um modo tipo dipolo na primavera. Apenas no verão austral o modelo representa anomalias em CESA no quinto modo rotacionado (REOF5), e anomalias de sinal oposto a essas no Nordeste do Brasil e em SESA, embora muito fraca nessa região (FIGURA 162). Assim como o CanESM5, o modelo CNRM-CM6-1 também não mostra um modo tipo dipolo na primavera. Contudo, o REOF3 de verão representa um modo dipolo com anomalias de precipitação de sinais opostos no centro-leste e Nordeste do Brasil e em SESA. Além disso, anomalias de mesmo sinal que em SESA são mostradas no Norte do Brasil, noroeste da AS e no sul da Argentina (FIGURA 163).

FIGURA 162 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO CANESM5 NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

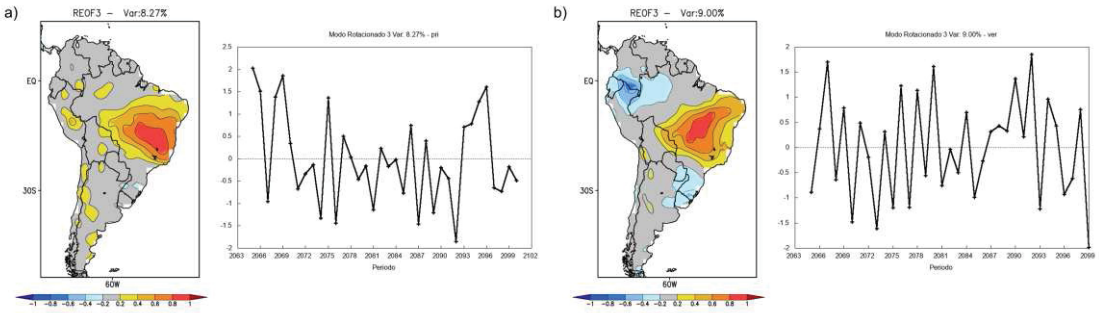
FIGURA 163 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO CNRM-CM6-1 NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

O CESM2, assim como os dois modelos anteriores, não apresenta um modo tipo dipolo na primavera austral. O modelo mostra na primavera um modo contendo anomalias de precipitação em CESA bastante extensas, atingindo o Nordeste do Brasil, mas não apresenta anomalias de sinais opostos (FIGURA 164a). Já no verão, o modelo mostra em REOF3 anomalias tipo dipolo no centro do Brasil (se estendendo para nordeste e sudeste) e em SESA, além de anomalias no noroeste da AS de mesmo sinal que em SESA (FIGURA 164b).

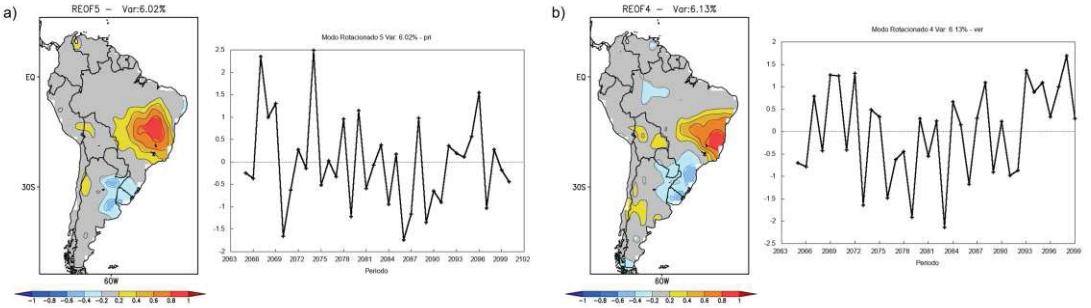
FIGURA 164 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO TERCEIRO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO PRIMAVERA PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP5-8.5. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

O modelo EC-Earth3-Veg mostra na primavera e no verão modos tipo dipolo com anomalias de sinais opostos em CESA e em SESA (FIGURA 165).

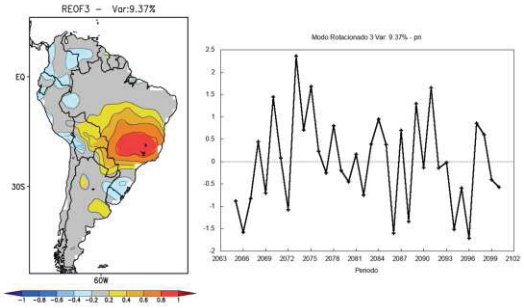
FIGURA 165 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO EC-EARTH3-VEG NO CENÁRIO SSP5-8.5. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

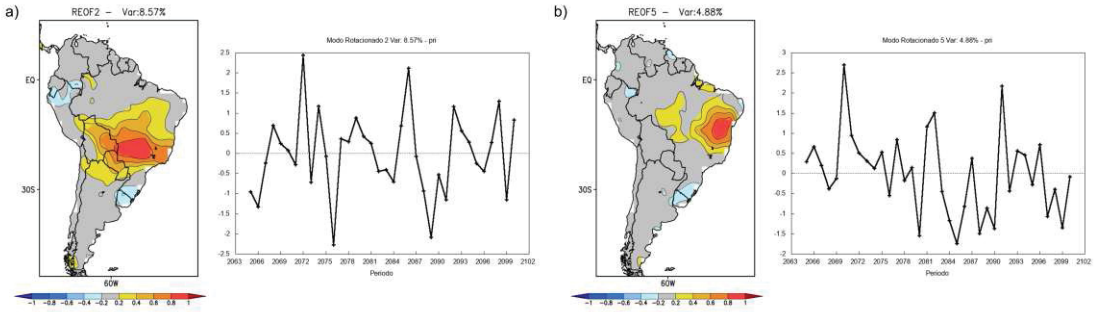
O HadGEM3-GC31-LL não apresenta um modo tipo dipolo no verão, contudo, o modelo mostra em REOF3 da primavera um dipolo com anomalias de sinais opostos em CESA e em SESA (FIGURA 166). Já o modelo KACE-1-0-G, mostra na primavera anomalias de precipitação espalhadas pelo centro do continente e anomalia de sinal oposto em SESA (FIGURA 167a). No verão, o modelo apresenta anomalias de sinais opostos no Nordeste do Brasil e em SESA (FIGURA 167b).

FIGURA 166 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

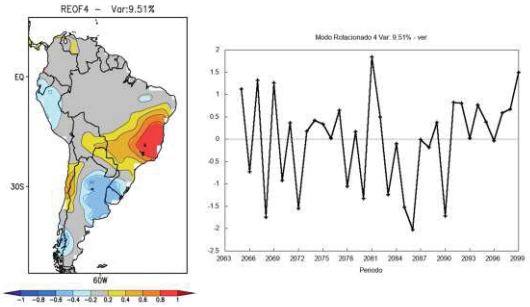
FIGURA 167 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO KACE-1-0-G NO CENÁRIO SSP5-8.5. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

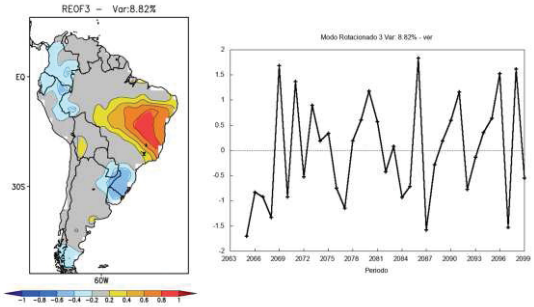
Os modelos IPSL-CM6A-LR, MIROC6 e MPI-ESM1-2-HR não simulam no futuro modos tipo dipolo na primavera austral. No entanto, esses modelos mostram modos dipolo no verão, com anomalias em CESA e anomalias de sinais opostos em SESA (FIGURA 168, FIGURA 169 e FIGURA 170). Especificamente, o modelo MPI-ESM1-2-HR mostra anomalias mais intensas em SESA em comparação com os outros modelos.

FIGURA 168 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP5-8.5.



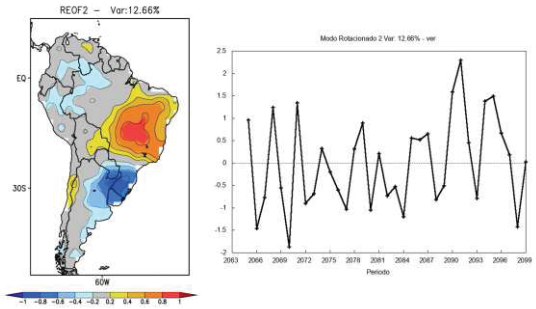
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 169 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO MIROC6 NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

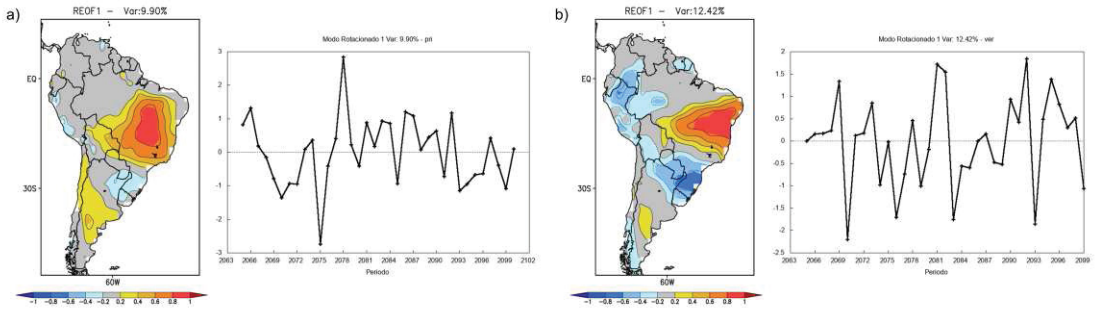
FIGURA 170 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NO VERÃO PARA O MODELO MPI-ESM1-2-HR NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

O modelo MRI-ESM2-0 mostra no principal modo da primavera um padrão tipo dipolo com anomalias de sinais opostos no centro do Brasil, se estendendo até CESA, e em SESA. Anomalias de mesmo sinal que em CESA também são mostradas no Chile e Argentina (FIGURA 171a). No verão, o modelo também representa no principal modo de variabilidade um dipolo com anomalias de sinais opostos em CESA, se estendendo até o Nordeste do Brasil, e em SESA, a qual se estende para o oeste e noroeste da AS (FIGURA 171b).

FIGURA 171 – A) DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINEL À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINEL À DIREITA) DO MODO DE VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO QUE FORMA UM PADRÃO TIPO DIPOLO NA PRIMAVERA PARA O MODELO MRI-ESM2-0 NO CENÁRIO SSP5-8.5. B) MESMO QUE (A), MAS PARA O VERÃO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

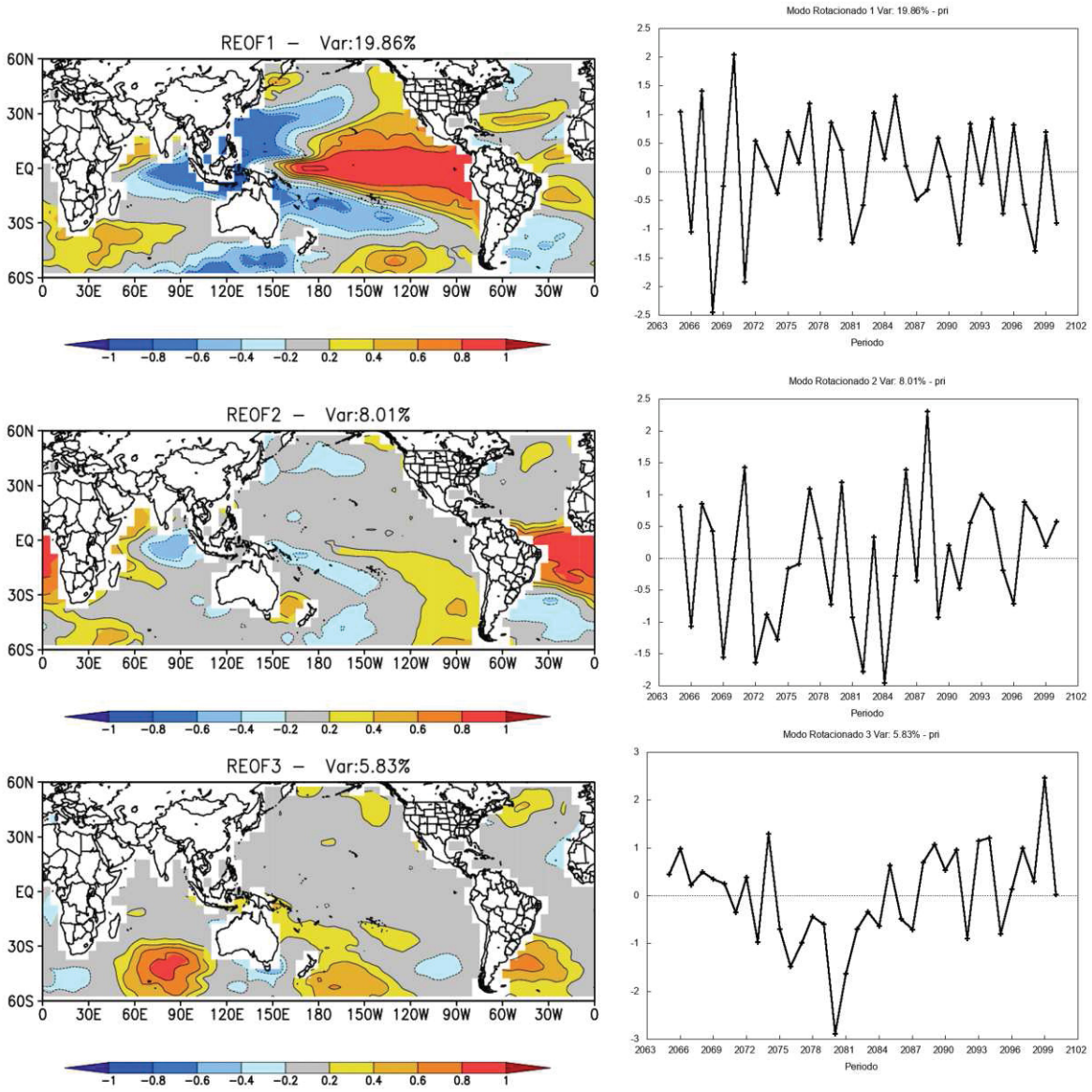
6.4 MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM

Modos de variabilidade de TSM foram obtidos também para os resultados dos modelos no cenário SSP5-8.5. Assim como nos casos anteriores, os cálculos foram realizados para cada modelo, para a média do conjunto de modelos que tiveram melhor desempenho na simulação de ENOS no clima presente e para a média do conjunto de todos os modelos que foram capazes de representar o modo ENOS no clima presente. Isso foi feito a fim de manter a consistência das análises e possibilitar a comparação entre os diferentes períodos.

As FIGURAS 172 e 173 mostram os três primeiros modos de variabilidade calculados para a primavera e o verão, respectivamente, com resultados do modelo CESM2, que apresentou o melhor desempenho ao simular o ENOS no clima presente. Tanto na primavera como no verão, o principal modo de variabilidade (REOF1) está associado ao ENOS. Esse modo mostra fortes anomalias de TSM no Pacífico central-

leste equatorial, as quais tem mais extensão latitudinal na primavera e estão mais concentradas na região equatorial no verão. Em torno dessas anomalias, ocorrem anomalias de sinal oposto, e também sobre o oeste do Pacífico. O modelo simula anomalias no Oceano Atlântico tropical de mesmo sinal que as anomalias do Pacífico Leste, que são mais intensas no verão que na primavera. Anomalias de mesmo sinal ocorrem também no sul do Pacífico, próximo da AS. O segundo modo da primavera representa uma forte anomalia no Atlântico tropical do HS, com anomalias de sinal contrário ao sul, e mostra anomalias de mesmo sinal, porém menos intensas, no sudeste do Pacífico. Em REOF2 e REOF3 de verão são mostrados dois sinais mais fortes de anomalias no Pacífico Norte de polaridades inversas. Enquanto em REOF2 essas anomalias ocorrem no oeste do Pacífico, em REOF3 ocorrem mais para leste.

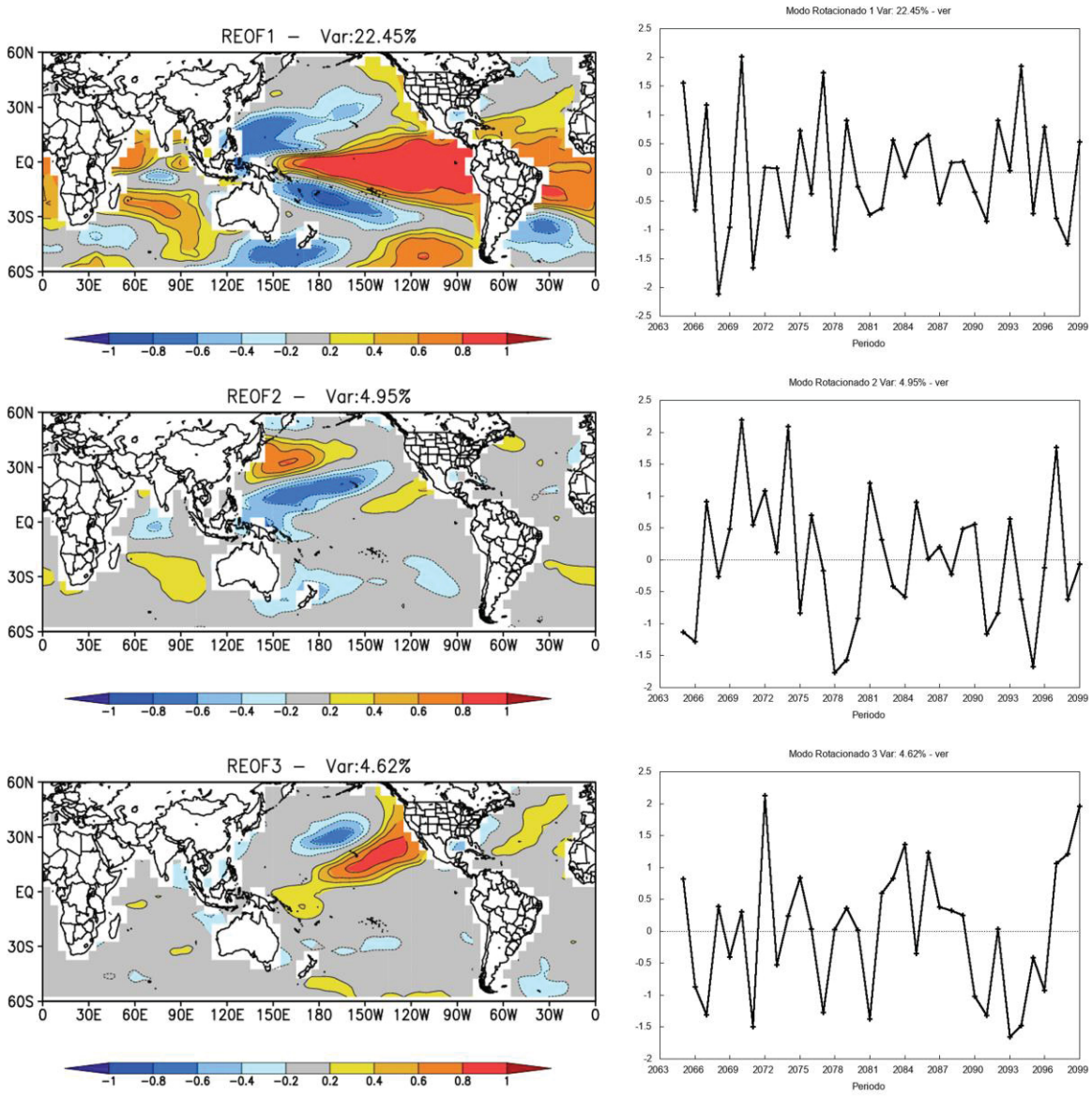
FIGURA 172 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 173 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

Os eventos EN e LN são identificados a partir dos anos em que a série de FS do modo ENOS excede em ±0,75σ. Assim, a TABELA 37 fornece os anos em que esses eventos foram simulados pelo modelo CESM2 neste cenário.

TABELA 37 – LISTAS DE ANOS EN E LN SIMULADOS PELO MODELO CESM2 NA PRIMAVERA, NO VERÃO E EM AMBAS AS ESTAÇÕES, PARA PROJEÇÕES NO CENÁRIO SSP5-8.5.

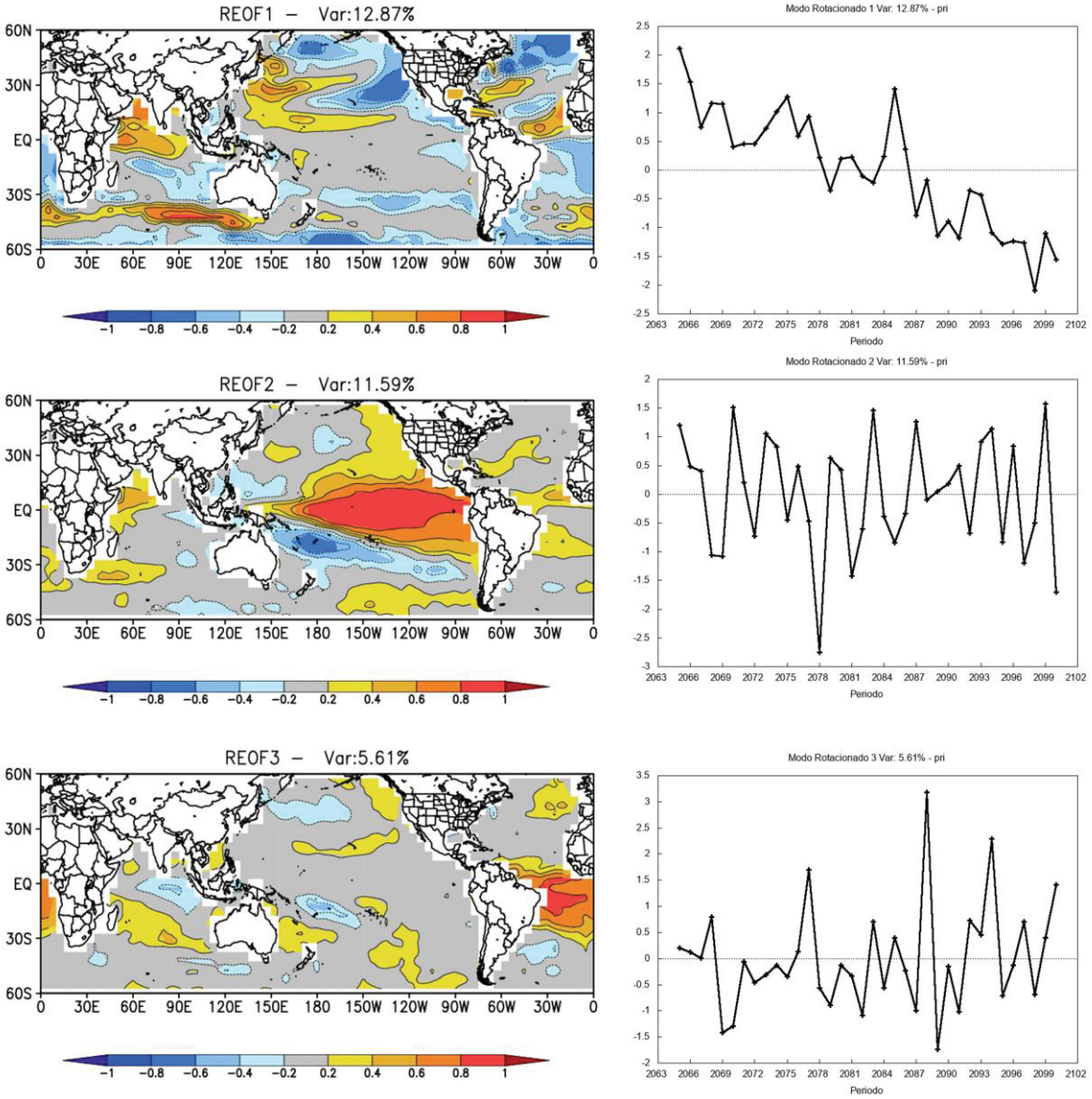
Evento	Primavera	Verão	Comum
EN	2065, 2067, 2070, 2077, 2079, 2083, 2085, 2092, 2094, 2096	2065, 2067, 2070, 2077, 2079, 2092, 2094, 2096	2065, 2067, 2070, 2077, 2079, 2092, 2094, 2096
LN	2066, 2068, 2071, 2078, 2081, 2091, 2098, 2100	2068, 2069, 2071, 2074, 2078, 2091, 2097, 2098	2068, 2071, 2078, 2091, 2098

FONTE: A autora (2022).

As FIGURAS 174 e 175 apresentam os três primeiros modos de variabilidade de TSM da primavera e do verão, respectivamente, para resultados da média do conjunto de todos os 10 modelos que foram capazes de simular o ENOS no clima presente. Para este conjunto, o modo ENOS nesse cenário é o segundo modo rotacionado (REOF2) em ambas as estações. Além disto, comparando estas figuras com as FIGURAS 172 e 173, é possível ver que o melhor modelo (CESM2) é melhor do que a média do conjunto ao simular os modos de variabilidade interanual, tendo em vista sua melhor representação do modo ENOS, principalmente quanto às anomalias de sinal contrário àquelas do Pacífico central-leste equatorial. No modo ENOS da primavera e do verão, a média do *ensemble* apresenta anomalias de TSM no Pacífico central leste equatorial, se estendendo mais para o oeste do Pacífico. No leste do Pacífico, as anomalias se estendem menos ao longo da costa oeste da AS. Da primavera para o verão, ocorre o fortalecimento de anomalias de mesmo sinal presentes no oceano Índico e no Atlântico, mas a intensidade também é menor que no CESM2. Embora a tendência linear da série total tenha sido retirada dos dados originais, é possível que os dados sem a tendência total acabem apresentando tendência negativa (positiva) em relação à média de dada estação do ano, se a tendência naquela estação for menor (maior) que a tendência da série total (com todas as estações). Portanto, estes modos de TSM com tendência não devem ser interpretados de forma absoluta. Para ver a variação absoluta entre TSM no clima futuro e no clima presente em cada estação do ano, deve-se consultar as diferenças já apresentadas no capítulo anterior para o cenário futuro mais otimista e que serão apresentadas mais ao final deste capítulo para o cenário futuro mais pessimista.

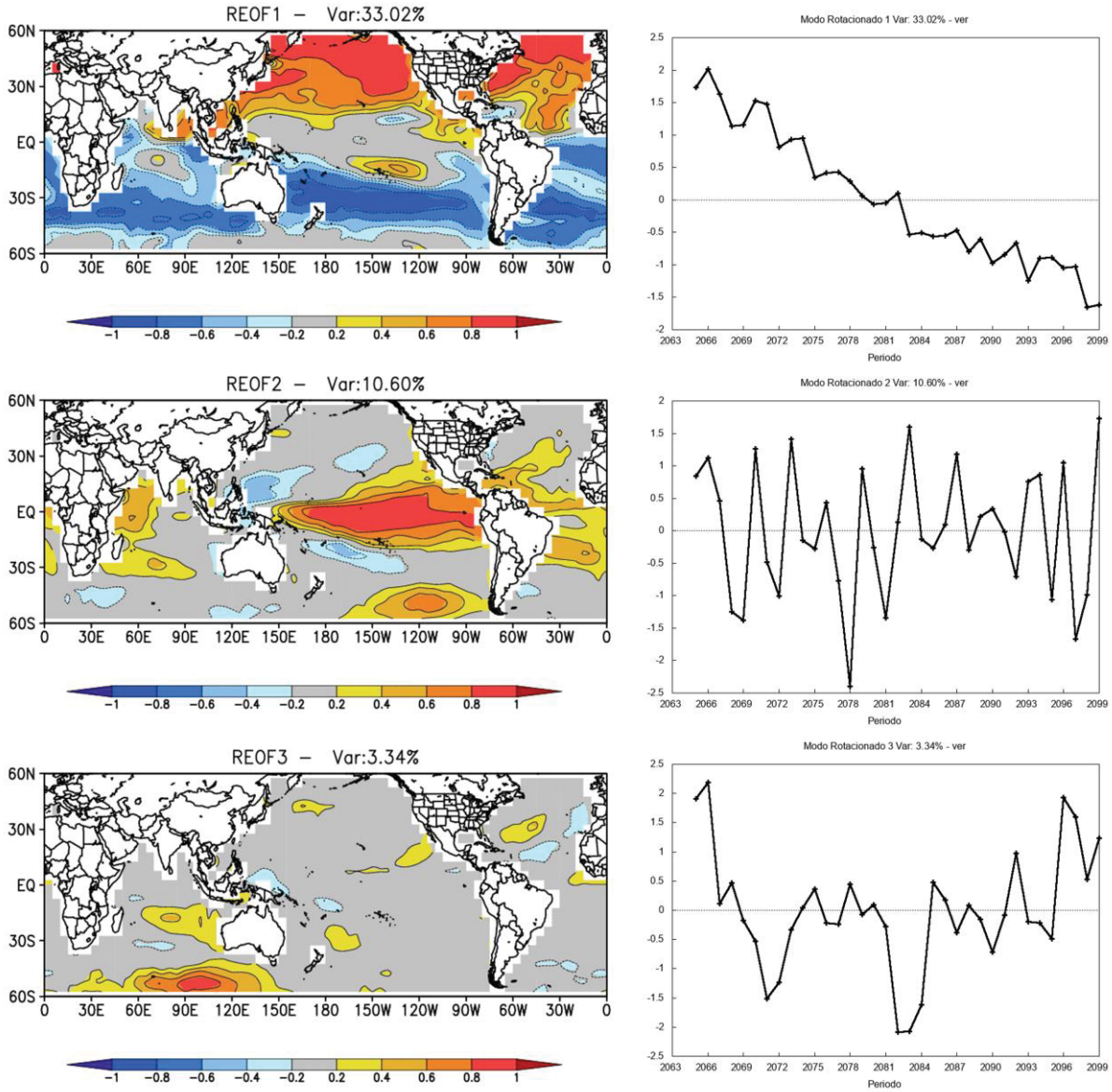
A TABELA 38 fornece os anos em que a média do conjunto de modelos simula os episódios EN e LN na primavera, no verão e em ambas as estações.

FIGURA 174 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE 10 MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 175 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE 10 MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

TABELA 38 – LISTAS DE ANOS EN E LN SIMULADOS PELA MÉDIA DO CONJUNTO DE 10 MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NA PRIMAVERA, NO VERÃO E EM AMBAS AS ESTAÇÕES, PARA PROJEÇÕES NO CENÁRIO SSP5-8.5.

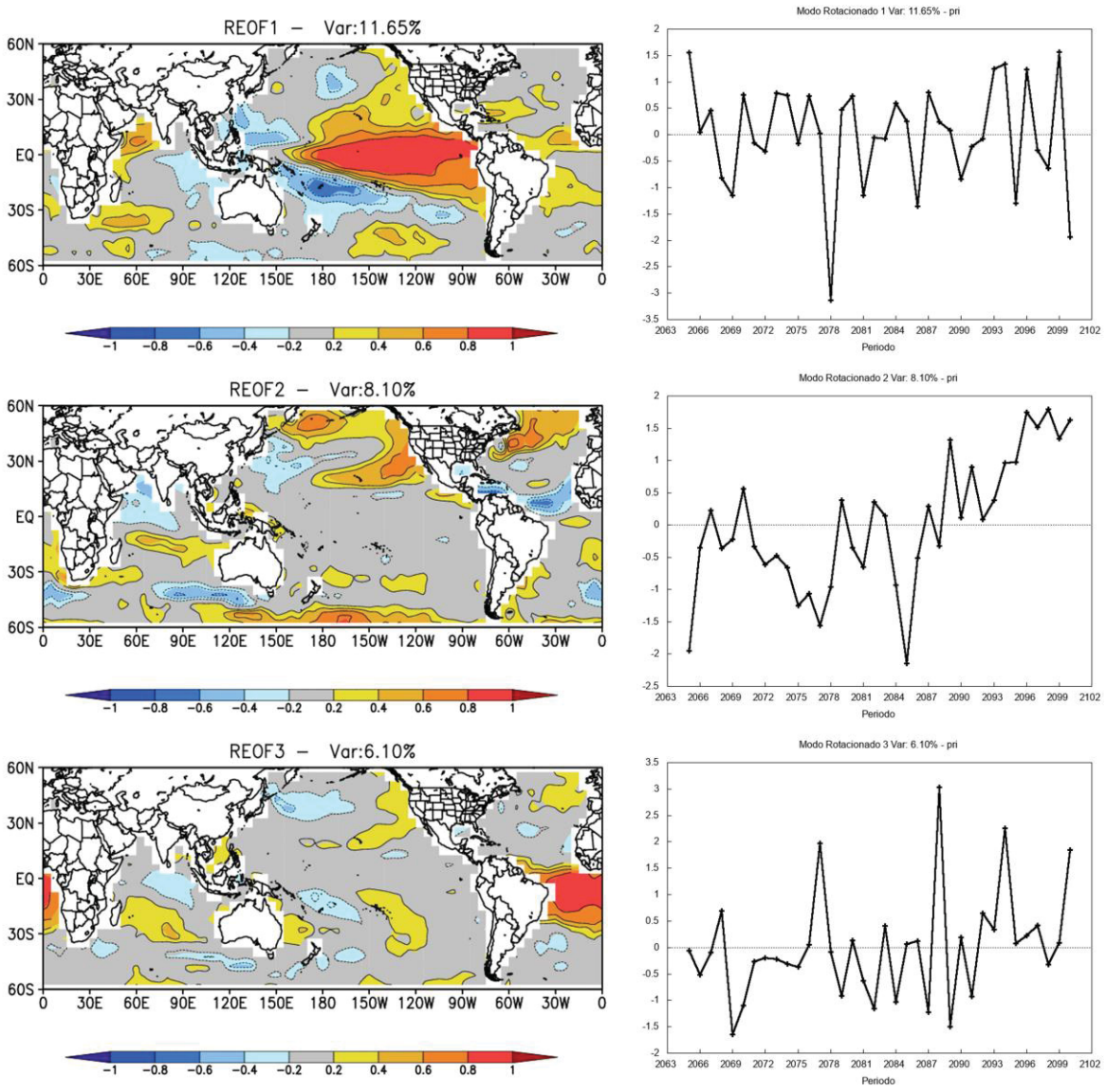
Evento	Primavera	Verão	Comum
EN	2065, 2070, 2073, 2074, 2083, 2087, 2093, 2094, 2096, 2099	2065, 2066, 2070, 2073, 2079, 2083, 2087, 2093, 2094, 2096, 2099	2065, 2070, 2073, 2083, 2087, 2093, 2094, 2096, 2099
LN	2068, 2069, 2078, 2081, 2085, 2095, 2097, 2100	2068, 2069, 2072, 2077, 2078, 2081, 2095, 2097, 2098	2068, 2069, 2078, 2081, 2095, 2097

FONTE: A autora (2022).

Os três primeiros modos de variabilidade de TSM resultantes da média do conjunto dos 7 melhores modelos que simulam o ENOS no clima presente são apresentados nas FIGURAS 176 e 177, para a primavera e o verão, respectivamente. Embora haja padrões similares aos apresentados nas FIGURAS 174 e 175 para o conjunto dos 10 modelos que simulam ENOS, este conjunto de 7 modelos representa mais fielmente as características de ENOS, já mencionadas anteriormente.

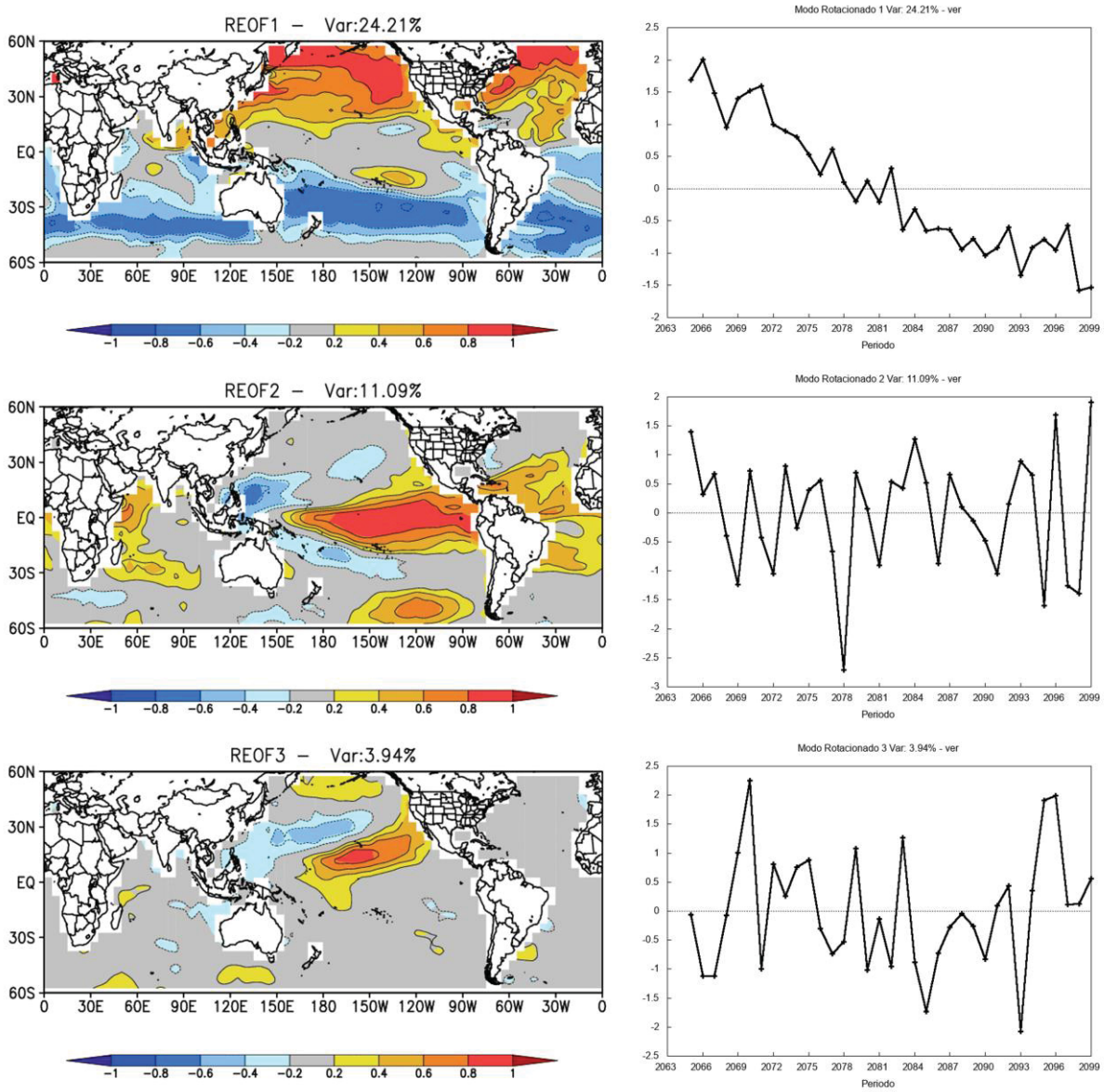
A TABELA 39 fornece os anos em que a média do conjunto dos 7 melhores modelos simula os episódios EN e LN na primavera, no verão e em ambas as estações.

FIGURA 176 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DA PRIMAVERA PARA RESULTADOS DA MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE TIVERAM MELHOR DESEMPENHO AO SIMULAR O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 177 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS TRÊS PRIMEIROS MODOS DE VARIABILIDADE DE TSM DO VERÃO PARA RESULTADOS DA MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE TIVERAM MELHOR DESEMPENHO AO SIMULAR O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

TABELA 39 – LISTAS DE ANOS EN E LN SIMULADOS PELA MÉDIA DO CONJUNTO DE 7 MODELOS QUE TIVERAM MELHOR DESEMPENHO AO SIMULAR O MODO ENOS NO CLIMA PRESENTE, NA PRIMAVERA, NO VERÃO E EM AMBAS AS ESTAÇÕES, PARA PROJEÇÕES NO CENÁRIO SSP5-8.5.

Evento	Primavera	Verão	Comum
EN	2065, 2070, 2073, 2087, 2093, 2094, 2096, 2099	2065, 2073, 2084, 2093, 2096, 2099	2065, 2073, 2093, 2096, 2099
LN	2068, 2069, 2078, 2081, 2086, 2090, 2095, 2100	2069, 2072, 2078, 2081, 2086, 2091, 2095, 2097, 2098	2069, 2078, 2081, 2086, 2095

FONTE: A autora (2022).

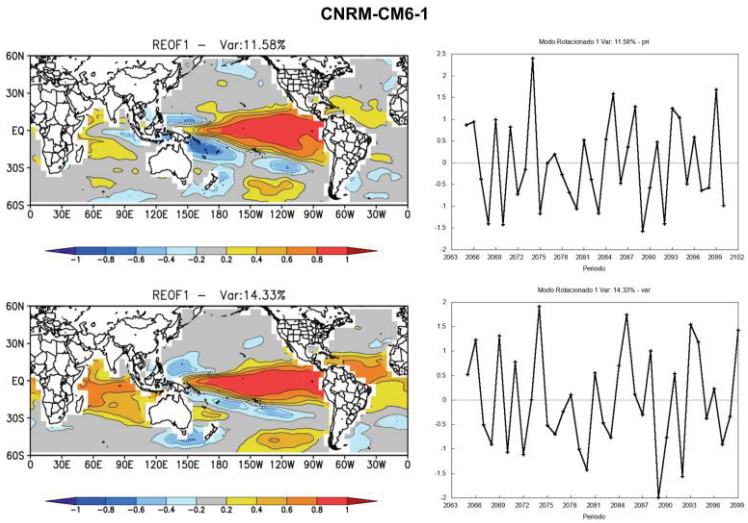
Os modos de variabilidade foram obtidos também para cada modelo analisado. Contudo, como o objeto de interesse do presente estudo é a simulação da variabilidade associada ao ENOS, apenas os modos que representam o ENOS de cada modelo serão mostrados a seguir.

Uma vez que os modos apresentados pelo modelo CESM2 já foram analisados com mais detalhes, as FIGURAS 178, 179, 180, 181, 182 e 183 a seguir mostram o modo ENOS dos demais modelos que melhor reproduziram o ENOS no clima presente, na primavera e no verão austral, para o cenário SSP5-8.5. Tanto na primavera como no verão, estes modelos representam o ENOS como o principal modo de variabilidade.

Na primavera, esses modos apresentam fortes anomalias no Pacífico central-leste equatorial, porém, os modelos EC-Earth3-Veg, HadGEM3-GC31-LL e MPI-ESM1-2-HR deslocam essa anomalia para o centro do Pacífico, fazendo com que anomalias menos intensas ocorram na costa oeste da AS. Ainda na primavera, os modelos mostram anomalias de mesmo sinal que essas no sul do Pacífico e no Atlântico tropical, entretanto, nessa última região, os modelos KACE-1-0-G e MPI-ESM1-2-HR representam anomalias mais fracas. No oeste do Pacífico e em torno da região da mais forte anomalia no centro-leste do Pacífico equatorial, os modelos simulam anomalias de sinais opostos, indicando o resfriamento dessas regiões em anos EN, embora alguns modelos estendam as anomalias do centro leste muito para oeste. Para o verão, tais aspectos se repetem, de forma geral. Apenas os modelos HadGEM3-GC31-LL e MPI-ESM1-2-HR deslocam a anomalia mais forte para o centro do Pacífico, de modo que não chega a atingir a costa oeste da AS. Os modelos

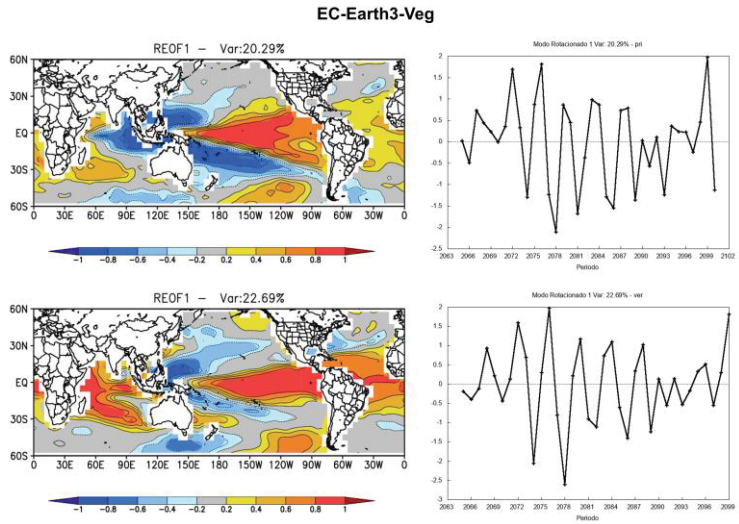
simulam anomalias de mesmo sinal que esse no Oceano Índico, no sul do Pacífico e no Atlântico tropical. Especificamente, o modelo EC-Earth3-Veg mostra anomalias mais intensas nessas regiões nesta estação.

FIGURA 178 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO CNRM-CM6-1 NO CENÁRIO SSP5-8.5.



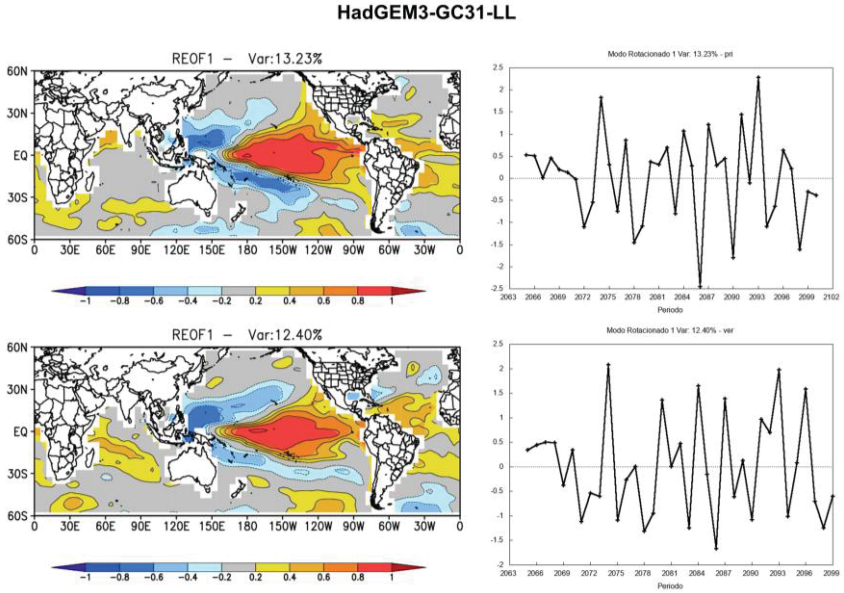
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 179 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO EC-EARTH3-VEG NO CENÁRIO SSP5-8.5.



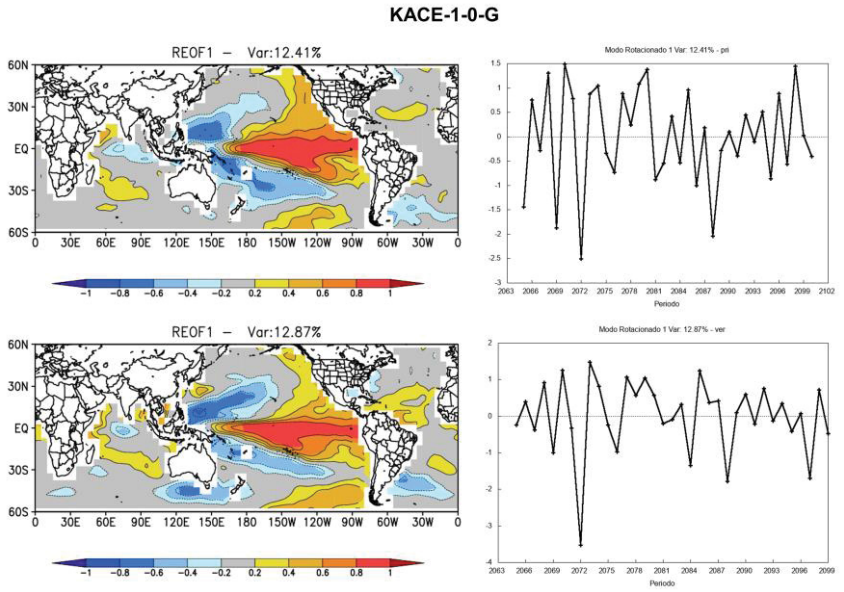
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 180 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO HADGEM3-GC31-LL NO CENÁRIO SSP5-8.5.



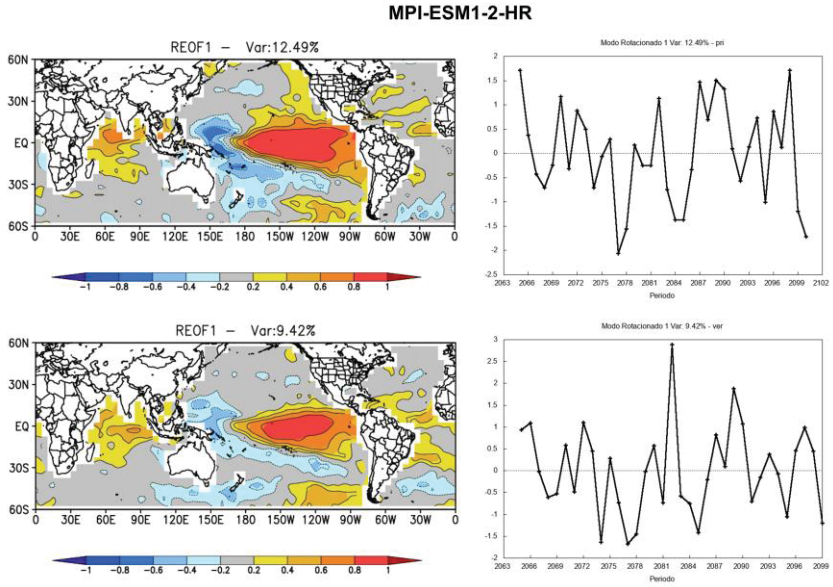
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 181 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO KACE-1-0-G NO CENÁRIO SSP5-8.5.



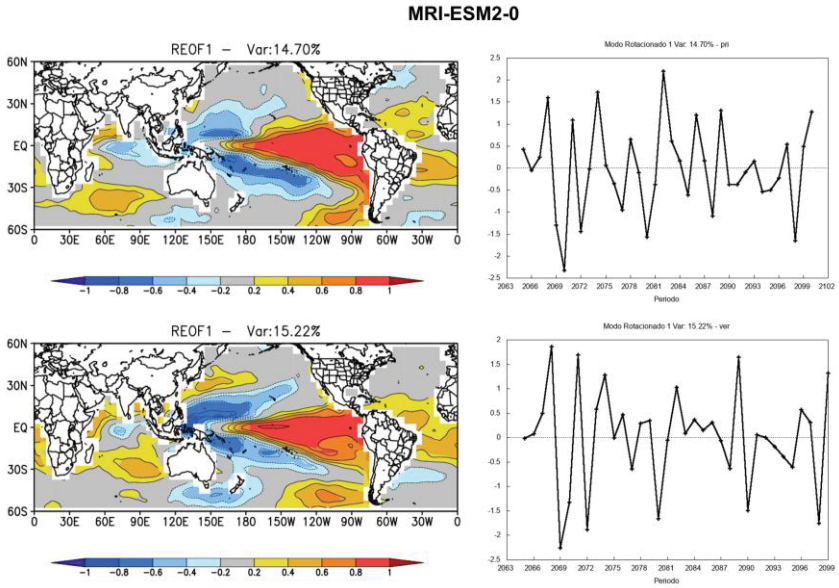
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 182 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS ABAIXO) SIMULADOS PELO MODELO MPI-ESM1-2-HR NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

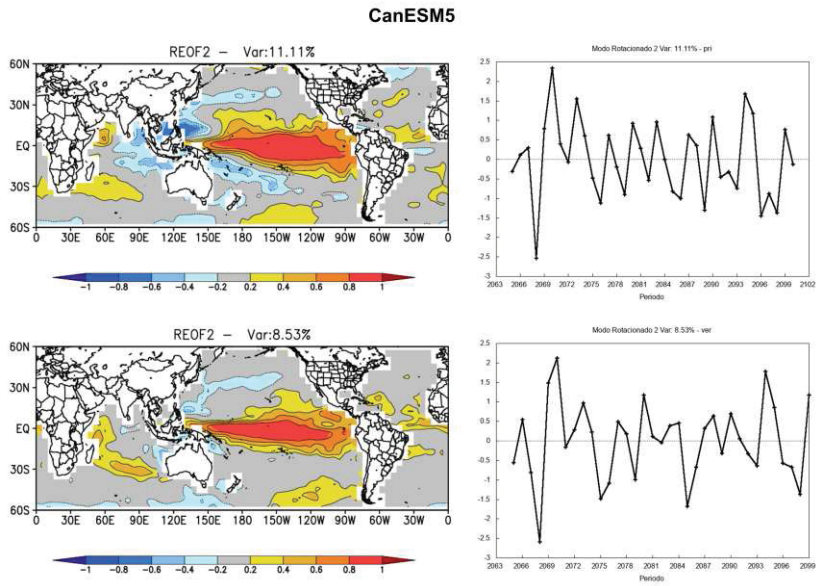
FIGURA 183 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MRI-ESM2-0 NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

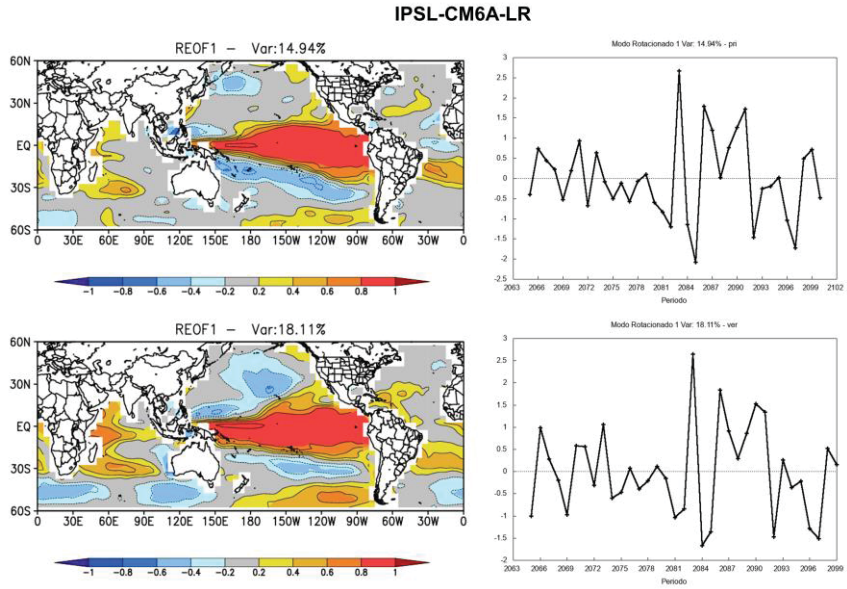
As FIGURAS 184, 185 e 186 apresentam os modos de variabilidade associados ao ENOS resultantes dos modelos CanESM5, IPSL-CM6A-LR e MIROC6, que mostraram baixo desempenho ao simular o ENOS no clima presente. Para os modelos CanESM5 (primavera e verão) e MIROC6 (apenas verão), o modo ENOS é representado como o segundo modo rotacionado. Semelhantemente aos resultados obtidos no cenário SSP2-4.5, os modelos apresentam na primavera e no verão as anomalias do leste do Pacífico bastante alongadas, chegando a atingirem o oeste do oceano. Além disso, o modelo CanESM5 representa as anomalias nessa região mais deslocadas para o centro do Pacífico, fazendo com que a costa oeste da AS não seja afetada por anomalias mais intensas. O modelo MIROC6 mostra anomalias bastante intensas em diversas regiões, mas, principalmente, no Pacífico tropical na primavera e no Atlântico no verão.

FIGURA 184 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO CANESM5 NO CENÁRIO SSP5-8.5.



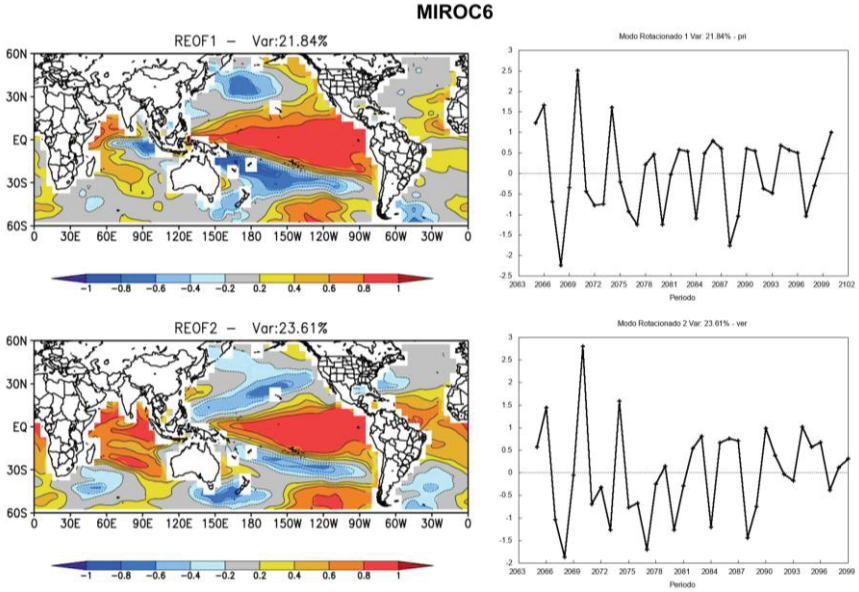
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 185 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP5-8.5.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

FIGURA 186 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (PAINÉIS À ESQUERDA) E EVOLUÇÃO TEMPORAL (PAINÉIS À DIRETA) DOS MODOS DE VARIABILIDADE QUE REPRESENTAM ENOS NA PRIMAVERA (PAINÉIS SUPERIORES) E VERÃO (PAINÉIS INFERIORES) SIMULADOS PELO MODELO MIROC6 NO CENÁRIO SSP5-8.5.



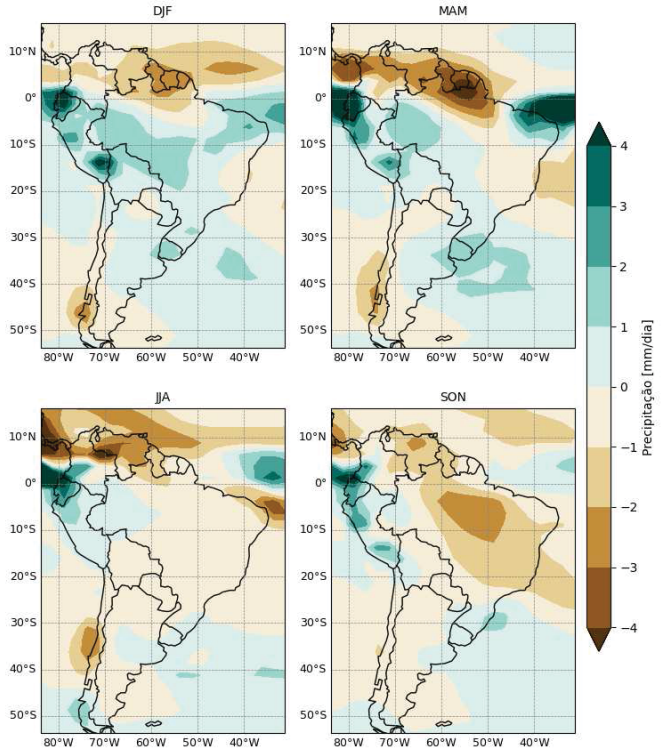
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: A variância explicada por cada modo é mostrada sobre cada painel. O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0.

6.5 DIFERENÇAS ENTRE CLIMA FUTURO E CLIMA PRESENTE

O presente capítulo possui como intuito investigar as principais diferenças entre as rodadas históricas e as projeções simuladas no cenário SSP5-8.5. Dessa forma, é possível verificar como o clima da AS pode mudar se o planeta seguir por um caminho de altas taxas de emissões de GEE.

Após a média do conjunto de todos os modelos, o modelo IPSL-CM6A-LR foi o que apresentou o melhor desempenho ao simular o clima presente. Por esse motivo, serão analisadas as principais diferenças entre as simulações históricas e as projeções desse modelo no cenário SSP5-8.5. A FIGURA 187 mostra as diferenças entre as climatologias sazonais de precipitação projetadas e as simuladas pelo modelo no clima presente.

FIGURA 187 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR.



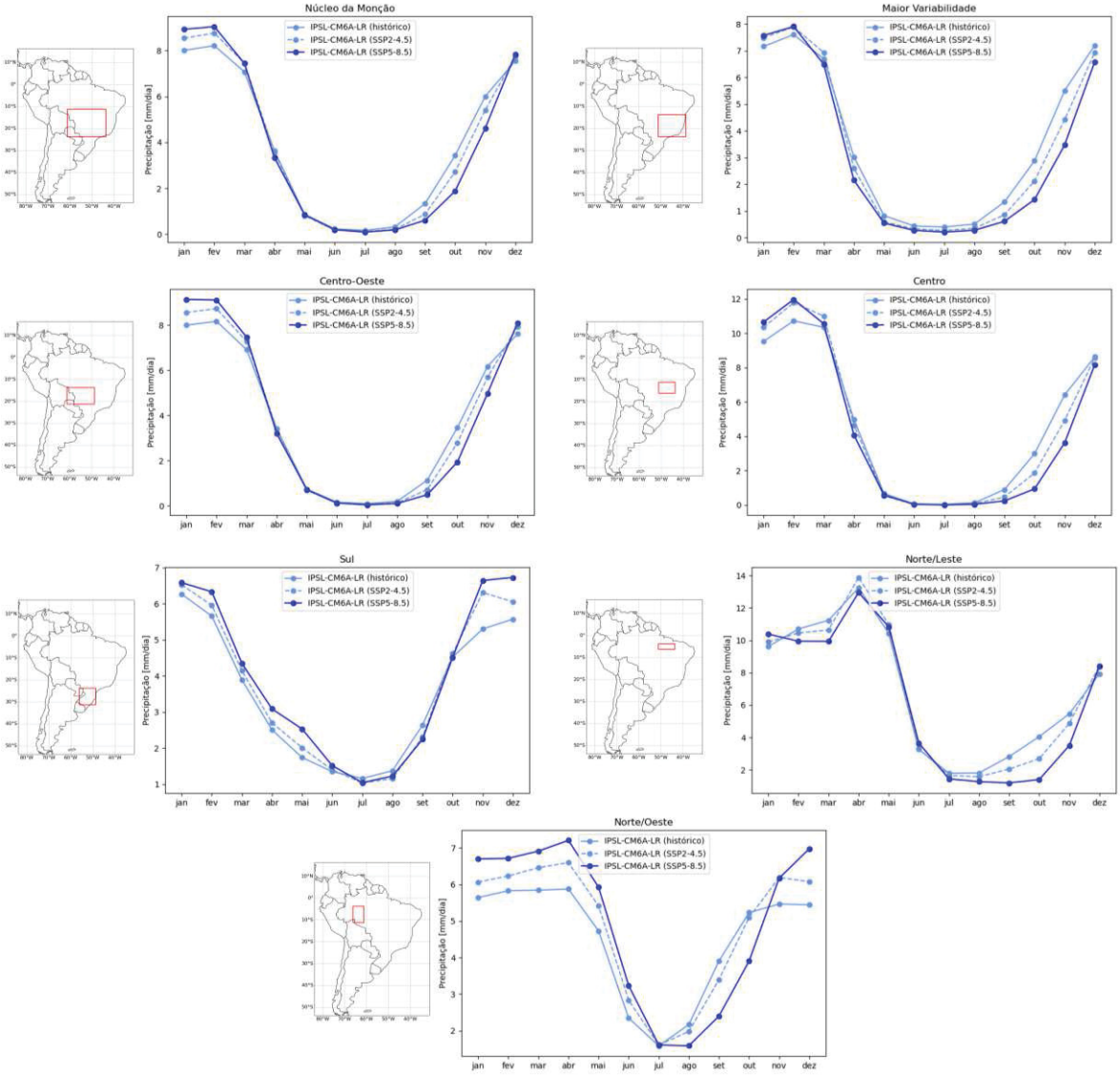
FONTE: A autora (2022).

O modelo IPSL-CM6A-LR estima para o verão aumento da precipitação no Nordeste do Brasil, na região Amazônica, nos Andes tropicais e no Centro-oeste do Brasil no verão austral. No outono, o modelo prevê redução da precipitação no norte da AS e aumento nos Andes, no oeste da região Amazônica, no Sul e Nordeste do

Brasil, próximo do equador. Durante o inverno, o modelo mostra alterações apenas no noroeste da AS, no HN. Na primavera, o IPSL-CM6A-LR apresenta aumento da precipitação nos Andes tropicais e diminuição em grande parte do Brasil, principalmente no leste da região Amazônica. Em relação às projeções no cenário SSP2-4.5 (FIGURA 124), neste cenário as diferenças entre as simulações são maiores, excedendo 4 mm/dia em algumas regiões, embora não ocorram muitas mudanças nos padrões das diferenças. Para este cenário, também foram calculados os ciclos anuais em regiões específicas (FIGURA 188), a fim de verificar se ocorrem diferenças entre as simulações nessas regiões mesmo que essas diferenças não apareçam na média do domínio total da AS. Na figura, os resultados para este cenário aparecem em azul escuro.

Para a região núcleo da monção (e uma região em seu extremo sudoeste, aqui denominada centro-oeste), o IPSL-CM6A-LR mostra redução de precipitação entre agosto e novembro e aumento de precipitação entre dezembro e março. Nos demais meses, o modelo apresenta valores bem próximos aos simulados no clima presente e no cenário SSP2-4.5. A leste, na região de maior variabilidade da monção (e numa região em sua parte norte, aqui denominada centro), o modelo mostra diminuição da precipitação em quase todos os meses, exceto em janeiro e fevereiro, quando apresenta valores bem próximos ao cenário mais otimista. Nestas regiões a leste a diminuição da precipitação na primavera é maior que nas regiões a oeste. Para o Sul do Brasil, o modelo apresenta aumento da precipitação de novembro a junho, enquanto de julho a outubro os valores presentes e futuros não mostram muita diferença. Na região Norte/Leste, exceto em dezembro e janeiro, o modelo mostra redução da precipitação em todos os meses, mais intensa no cenário mais pessimista. Na região Norte/Oeste, a precipitação aumenta de novembro a junho (principalmente na estação mais chuvosa), em julho os valores presentes e futuros são iguais e de agosto a outubro é projetada a redução da precipitação na região.

FIGURA 188 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR NO CENÁRIO SSP5-8.5 (AZUL ESCURO), NO CENÁRIO SSP2-4.5 (AZUL CLARO TRACEJADO) E NAS RODADAS HISTÓRICAS (AZUL CLARO CONTÍNUO).



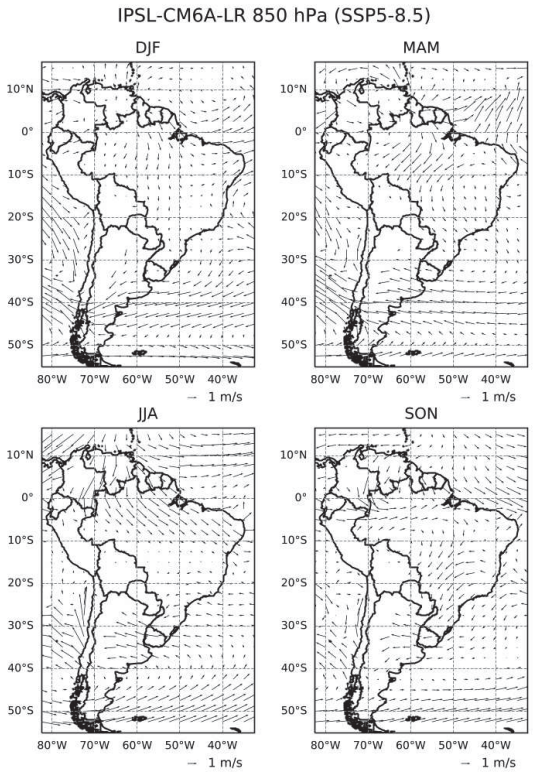
FONTE: A autora (2022).

Ainda para o IPSL-CM6A-LR, mapas de diferenças sazonais da circulação entre o clima futuro projetado nesse cenário e o clima presente mostram poucas alterações na velocidade do vento na AS (FIGURA 189 e FIGURA 190). Contudo, em comparação com os resultados apresentados no cenário SSP2-4.5 (FIGURA 126 e FIGURA 127), as diferenças na velocidade do vento são maiores neste cenário. Em baixos níveis (FIGURA 189), as principais alterações ocorrem na região Amazônica no verão, outono e inverno austral, mostrando diferenças em torno de 2 m/s, com divergência do vento correspondendo à diminuição da precipitação no norte desta região. Na primavera, há divergência no centro-leste/nordeste, com vento dirigindo-se para sul, onde aumenta a circulação ciclônica. Isto é coerente com diminuição da

precipitação na primeira região e aumento na segunda. Já em altos níveis, há aumento de circulação ciclônica sobre a primeira e aumento de um cavado a oeste da segunda, ambos também coerentes com as diferenças de precipitação. As maiores diferenças em altos níveis ocorrem nos ventos de oeste nos subtrópicos, no inverno e na primavera, o que é coerente com o aumento do gradiente latitudinal de temperatura na superfície, que é mostrado nos mapas de diferença de TSM a seguir (FIGURA 191). Nestes mapas é claro o aumento de tal gradiente, pois o aquecimento na faixa equatorial é maior do que no extratrópicos no HS.

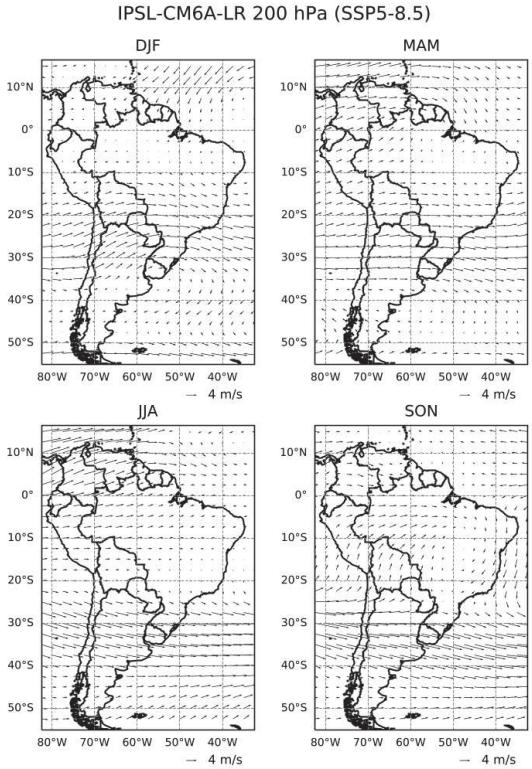
Para o futuro, o IPSL-CM6A-LR projeta o aumento da TSM em todo o globo, especialmente no Pacífico equatorial e em altas latitudes no HN no inverno e na primavera (FIGURA 191). Durante o verão e o outono austral, o modelo mostra o aumento da TSM em mais de 2,5°C em quase todas as regiões sendo que no Pacífico equatorial, esse aumento excede 4°C.

FIGURA 189 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR.



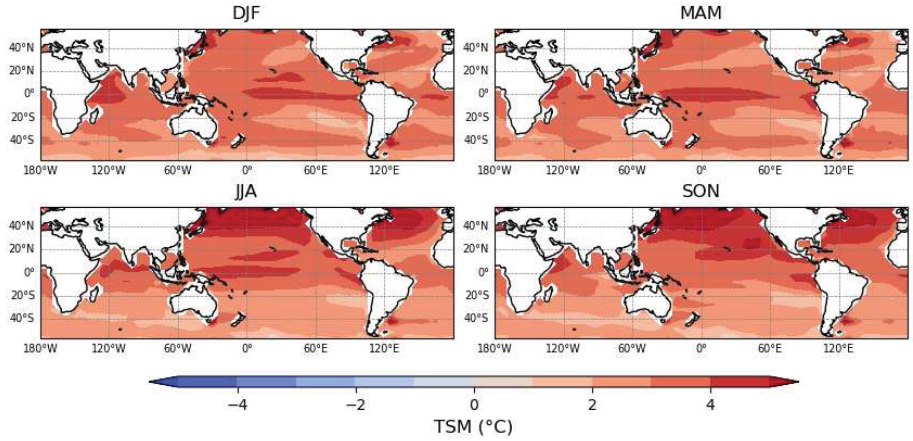
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 190 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR.



FONTE: A autora (2022).

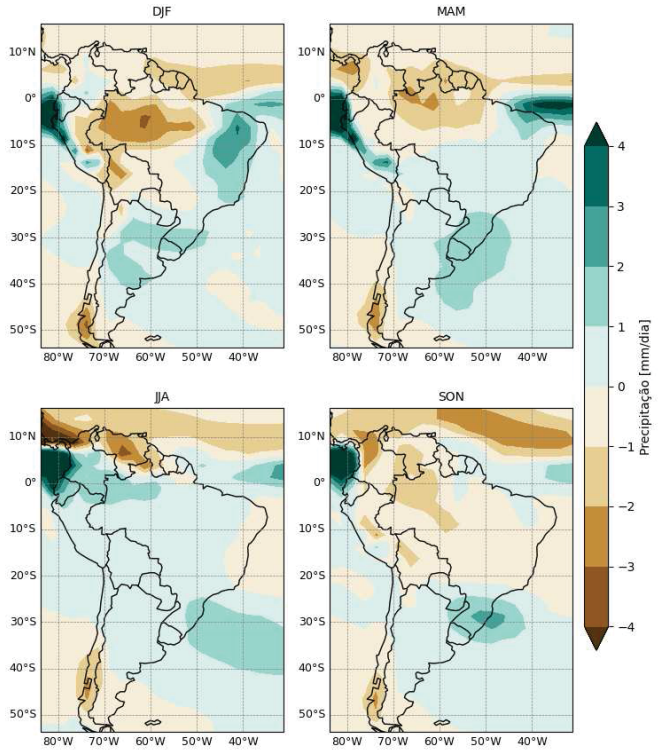
FIGURA 191 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO IPSL-CM6A-LR.



FONTE: A autora (2022).

O modelo CESM2 apresentou o melhor desempenho ao simular o ENOS no clima presente. A FIGURA 192 a seguir mostra as diferenças sazonais entre as climatologias de precipitação do modelo no cenário futuro SSP5-8.5 e as climatologias de precipitação simuladas no clima presente.

FIGURA 192 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2.

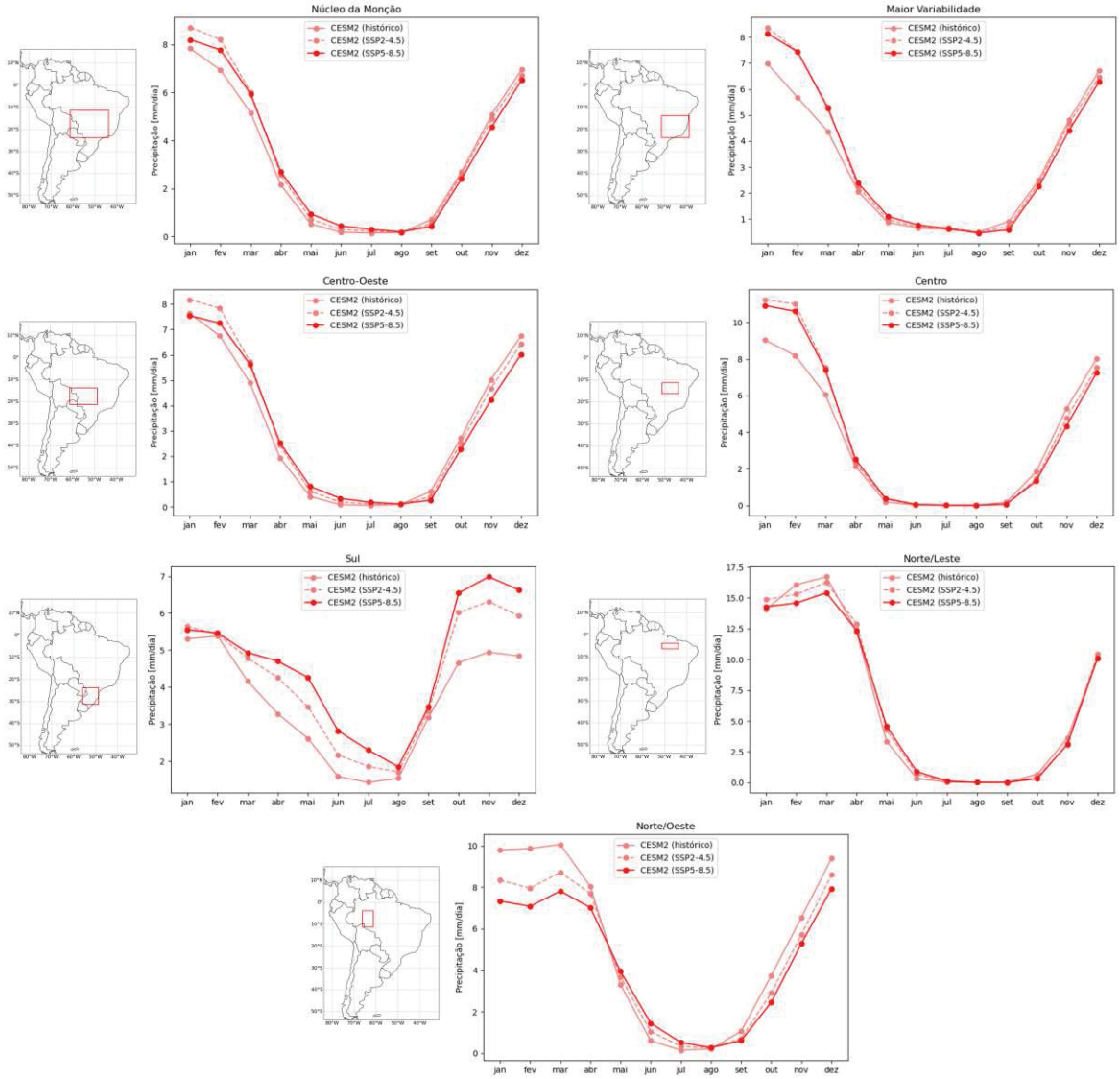


FONTE: A autora (2022).

Para o verão austral, o CESM2 mostra aumento da precipitação no centro-leste/Nordeste do Brasil, no Sul do Brasil e norte da Argentina, e redução na região Amazônica de mais de 2 mm/dia. No outono, o modelo apresenta aumento da precipitação em SESA e redução no norte da AS e, na primavera, mostra o aumento da precipitação no Sul do Brasil e redução no norte da AS e região Amazônica. Há discrepâncias visíveis entre as diferenças mostradas pelo IPSL-CM6A-LR (FIGURA 187) e as mostradas pelo CESM2 (FIGURA 192), especialmente no noroeste do Brasil e centro-leste no verão, a maior parte do Brasil na primavera e Sul do Brasil no inverno e na primavera.

Os ciclos anuais em regiões específicas da AS, simulados pelo modelo CESM2, são mostrados na FIGURA 193. Para facilitar a comparação com os demais experimentos, os resultados das projeções nesse cenário são mostrados em vermelho escuro.

FIGURA 193 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP5-8.5 (VERMELHO ESCURO), NO CENÁRIO SSP2-4.5 (VERMELHO CLARO TRACEJADO) E NAS RODADAS HISTÓRICAS (VERMELHO CLARO CONTÍNUO).



FONTE: A autora (2022).

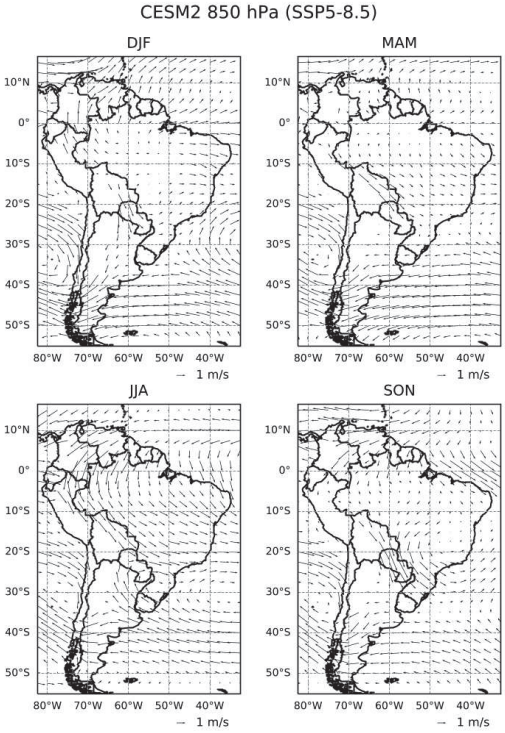
Para a região núcleo da monção (e a região na sua parte sudoeste, aqui chamada centro-oeste), as projeções nesse cenário mostram redução da precipitação de setembro a dezembro. Em janeiro está próxima ao valor do clima presente, porém entre janeiro e julho as projeções no cenário SSP5-8.5 mostram sempre o aumento da precipitação com relação ao clima presente, com redução com relação às projeções no cenário SSP2-4.5 para janeiro e fevereiro. Em março, abril e agosto, os valores nos 2 cenários futuros são bem próximos. Na primavera, há menos chuva no cenário futuro, principalmente na região mais a oeste (centro-oeste). Na região de maior variabilidade da monção (e na região na sua parte norte, aqui denominada centro), o modelo simula aumento da precipitação entre janeiro e junho e redução

entre setembro e dezembro. Nessas regiões de monção mais a leste há maior aumento futuro de precipitação no verão do que naquelas mais a oeste. No Sul do Brasil é mostrado o aumento da precipitação em todos os meses do ano, principalmente no outono e primavera, com maior diferença no cenário mais pessimista, exceto em janeiro. Na região Norte/Leste, as principais diferenças concentram-se no auge na estação chuvosa, com redução da precipitação principalmente em fevereiro e março. Para a região Norte/Oeste, também há projeção de maior redução na estação chuvosa, sobretudo no final do verão e início do outono austral, embora já se inicie na primavera. Há pequeno aumento da precipitação entre maio e junho.

Diferenças entre as climatologias sazonais de circulação simuladas no cenário SSP5-8.5 e no clima presente para resultados do modelo CESM2 são apresentadas nas FIGURAS 194 e 195. Em baixos níveis (FIGURA 194), o modelo apresenta aumento de circulação ciclônica no Pacífico sudeste e sudoeste da AS, ajudando a aumentar a circulação de norte para SESA, coerente com o aumento de precipitação na região. Esta é uma das características de circulação durante eventos EN, que não apareceu na análise dos resultados do IPSL-CM6A-LR (FIGURA 189). Em altos níveis (FIGURA 195), aparece forte convergência no norte da AS, principalmente na primavera, verão e outono, coerente com diminuição da precipitação, o que também é uma característica de EN.

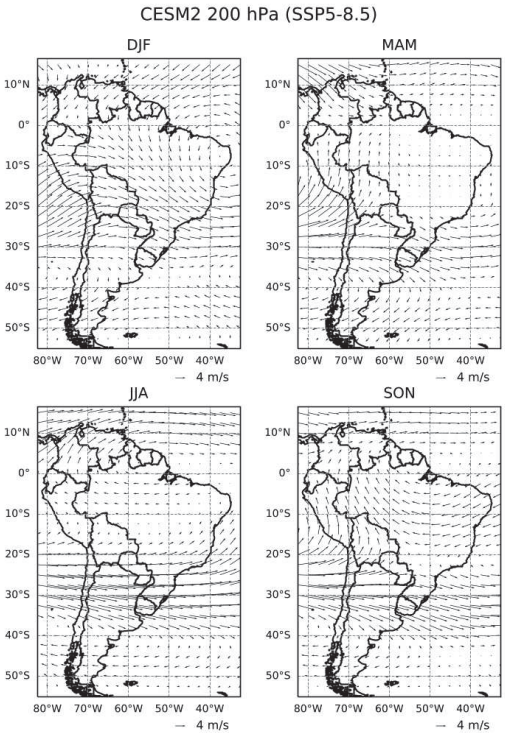
O modelo CESM2 também simula no cenário SSP5-8.5 o aumento da TSM em quase todo o globo, de maneira ainda mais intensa do que as projeções no cenário SSP2-4.5. De acordo com a FIGURA 196, ocorrerá um aumento de mais de 2,5°C em diversas regiões e, no Pacífico central-leste equatorial, esse aumento será de mais de 4°C. Isso indica que até o final do século, a TSM irá aumentar em um padrão similar ao El Niño.

FIGURA 194 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2.



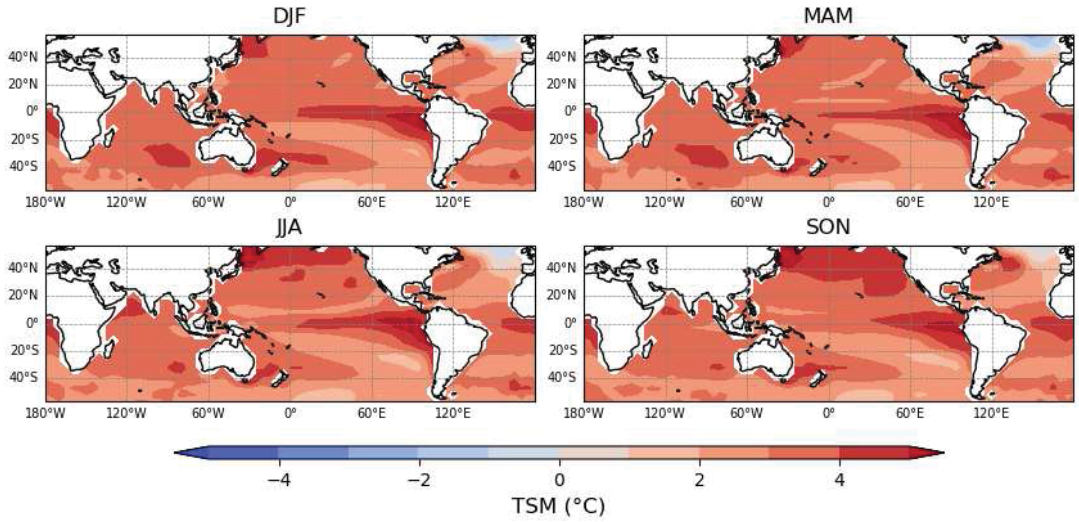
FONTE: A autora (2022).

FIGURA 195 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 196 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA O MODELO CESM2.

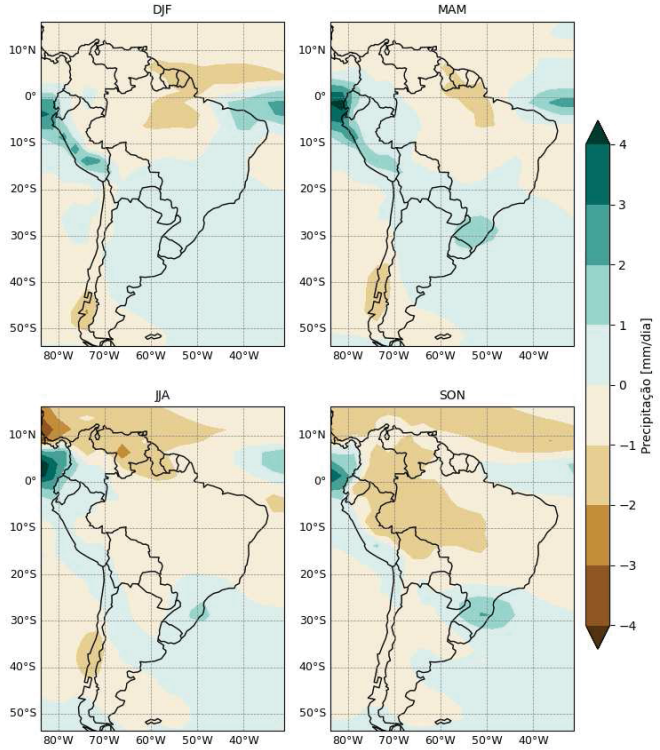


FONTE: A autora (2022).

A média do conjunto de todos os modelos apresentou o melhor desempenho ao reproduzir o clima presente da AS. A FIGURA 197 mostra as diferenças entre as climatologias de precipitação resultantes da média do conjunto no clima futuro (cenário SSP5-8.5) e presente (rodadas históricas).

Para o verão, a média do conjunto de modelos projeta aumento de precipitação nos Andes tropicais e no Nordeste do Brasil, e diminuição na região Amazônica, principalmente a leste. O aumento da precipitação nos Andes também ocorre para o outono austral, bem como o aumento no Sul do Brasil. No inverno, as maiores diferenças são vistas no norte da AS, no HN, onde a média do conjunto mostra diminuição da precipitação. Para a primavera, há aumento da precipitação no Sul do Brasil e a diminuição na região Amazônica, principalmente na parte oeste.

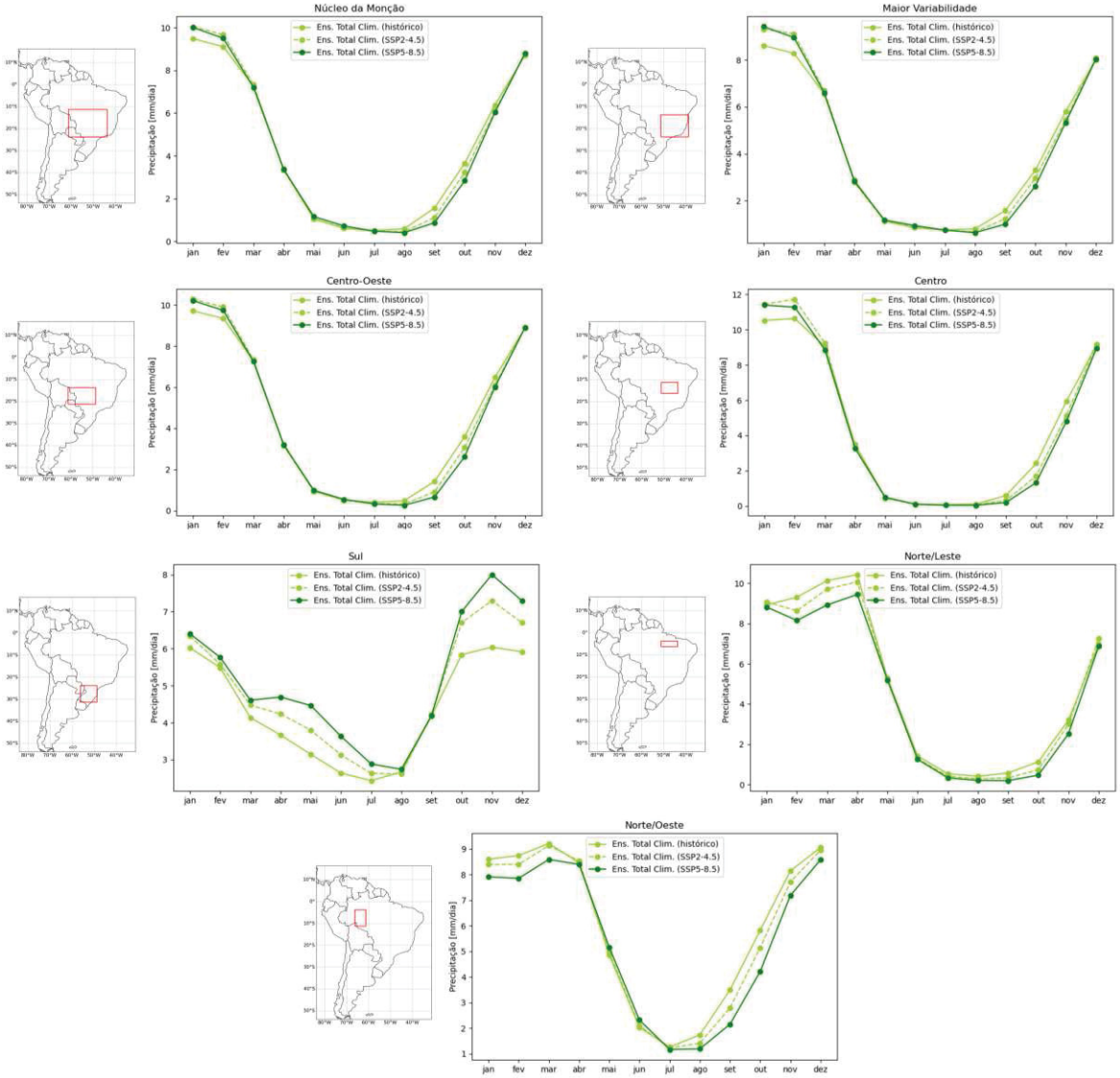
FIGURA 197 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS.



FONTE: A autora (2022).

Os ciclos anuais de precipitação também foram obtidos para a média do conjunto de modelos. A FIGURA 198, apresenta as projeções do ciclo anual em cada região no cenário SSP5-8.5. Para esse cenário, os resultados são mostrados pelas curvas em verde mais escuro.

FIGURA 198 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS NO CENÁRIO SSP5-8.5 (VERDE ESCURO), NO CENÁRIO SSP2-4.5 (VERDE CLARO TRACEJADO) E NAS RODADAS HISTÓRICAS (VERDE CLARO CONTÍNUO).



FONTE: A autora (2022).

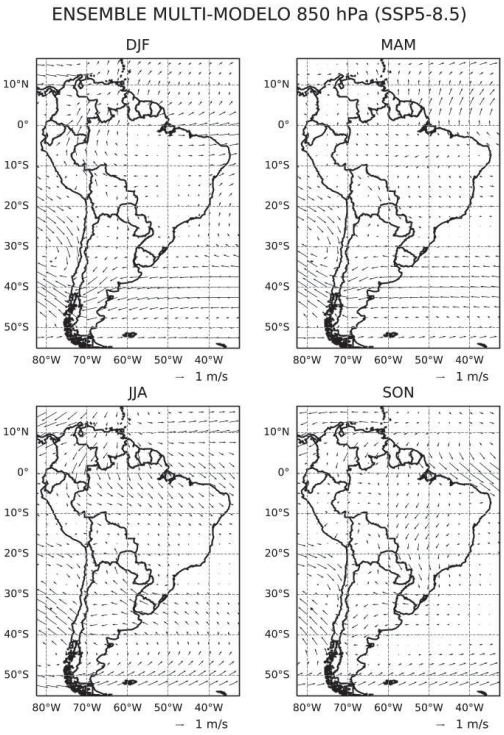
Para o núcleo da monção, centro-oeste do Brasil e a região de maior variabilidade da monção, as projeções neste cenário mostram o aumento da precipitação em janeiro e fevereiro e a redução entre agosto e novembro. Nos demais meses, os resultados para o cenário SSP5-8.5 são bem próximos aos valores simulados para o clima presente e para o cenário mais otimista. Para o centro do Brasil, o comportamento do ciclo anual é bastante semelhante: projeta-se redução de precipitação entre setembro e dezembro e aumento em janeiro e fevereiro. As diferenças são um pouco maiores para as regiões de monção mais a leste (os dois painéis superiores à direita na FIGURA 198. Já para o Sul do Brasil, com exceção de agosto e setembro, quando os resultados das simulações são próximos entre si, em

todos os outros meses as projeções no cenário SSP5-8.5 mostram aumento da precipitação. Por outro lado, para as regiões Norte/Leste e Norte/Oeste a média do conjunto mostra redução da precipitação em quase todos os meses, em comparação com o clima presente e com as projeções no cenário SSP2-4.5.

Embora haja diferenças quantitativas, qualitativamente as diferenças entre os ciclos anuais no futuro para ambos os cenários e no clima presente são semelhantes para o modelo CESM2, que melhor simula ENOS, e para a média de conjunto dos modelos.

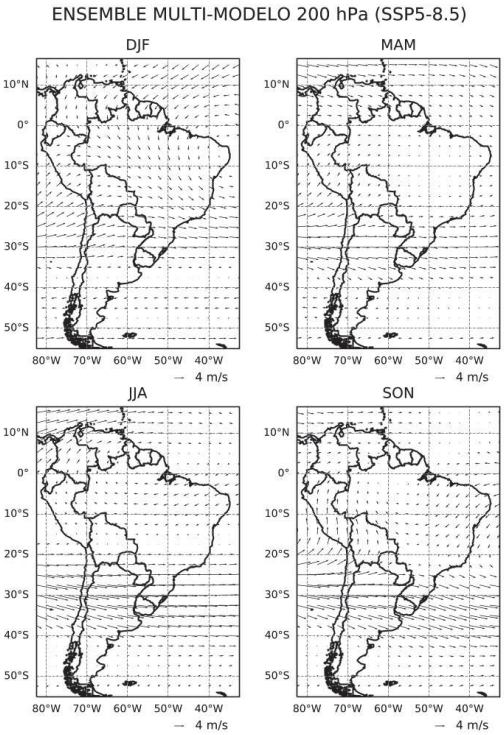
As diferenças entre as projeções da circulação atmosférica no cenário SSP5-8.5 e as simulações do clima presente obtidas da média do conjunto de modelos, são apresentadas nas FIGURAS 199 e 200. Tanto em baixos como em altos níveis, as diferenças apresentadas pela média do *ensemble* são muito pequenas. Em baixos níveis (FIGURA 199), as maiores diferenças ocorrem no inverno e na primavera austral, porém, permanecem em torno de 1 m/s. Já em altos níveis (FIGURA 200), as maiores diferenças ocorrem nos ventos que incidem no continente na costa oeste da AS entre 25°S e 40°S, principalmente no inverno e na primavera. Como mencionado acima em relação à precipitação, também as diferenças entre as circulações no clima futuro e no clima presente são qualitativamente semelhantes para o modelo CESM2, que melhor simula ENOS, e para a média de conjunto dos modelos. Portanto, os mesmos comentários se aplicam.

FIGURA 199 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS.



FONTE: A autora (2022).

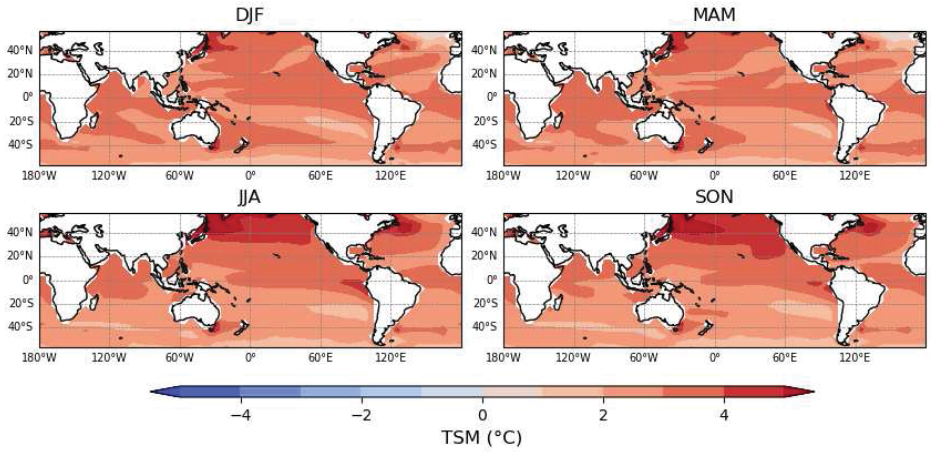
FIGURA 200 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS.



FONTE: A autora (2022).

Ainda no cenário de altas emissões, a média do conjunto de modelos mostra no futuro o aumento da TSM em todo o globo, de maneira mais intensa do que as projeções mostradas no cenário SSP2-4.5 (FIGURA 138). O aumento da TSM ocorre principalmente no norte do Pacífico, contudo vale notar que no Pacífico equatorial central-leste a média dos modelos mostra aumento da TSM em todas as estações. Mais precisamente, no leste do Pacífico equatorial é mostrado o aumento em mais de 4°C no inverno e na primavera austral. Logo, também a média do conjunto de modelos simula no futuro o aumento da TSM similar ao evento EN (FIGURA 201).

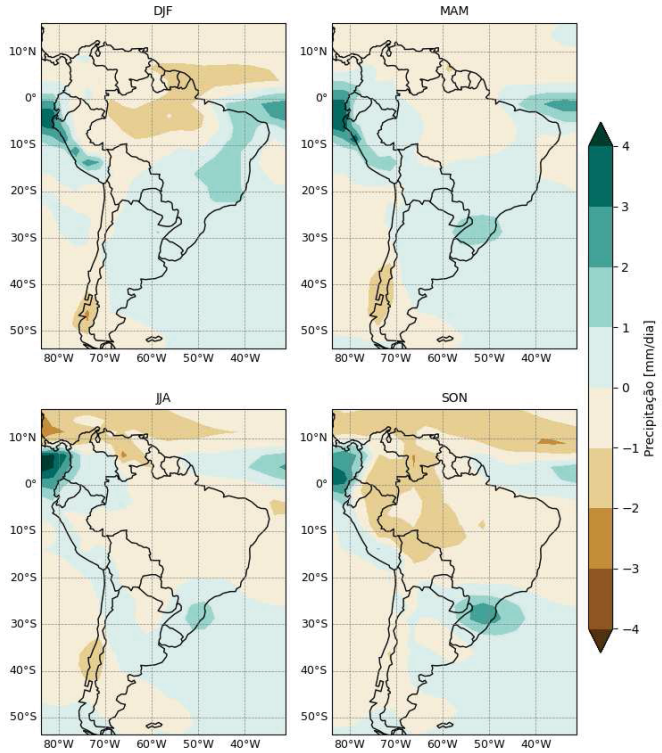
FIGURA 201 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DE TODOS OS MODELOS.



FONTE: A autora (2022).

Para a média do conjunto de 7 modelos que mostraram melhor desempenho ao simular o ENOS no clima presente, as diferenças entre as climatologias de precipitação projetadas no cenário SSP5-8.5 e simuladas no clima presente são apresentadas na FIGURA 202.

FIGURA 202 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE PRECIPITAÇÃO SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.

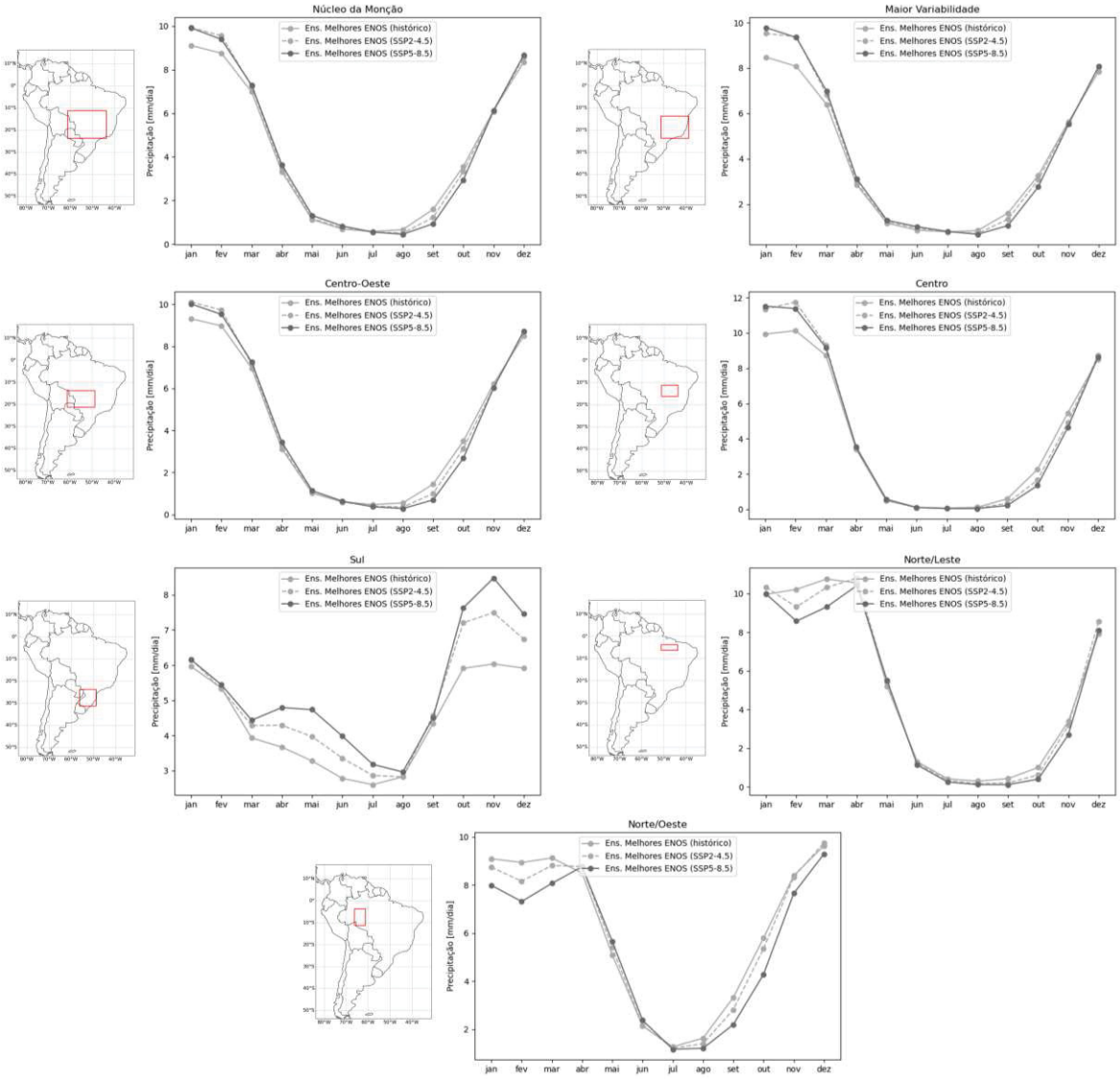


FONTE: A autora (2022).

As projeções resultantes da média do conjunto dos 7 melhores modelos para ENOS mostram, para o verão austral, o aumento mais evidente da precipitação no Nordeste do Brasil, em CESA e nos Andes tropicais, e a redução na região Amazônica. No outono e inverno austral, ocorre aumento da precipitação no Sul do Brasil, o qual é ainda mais intenso durante a primavera austral. Nesse período, as projeções também mostram redução da precipitação na região Amazônica, principalmente na parte oeste da região, e no noroeste da AS.

Ciclos anuais de precipitação em regiões específicas da AS, simulados pela média do conjunto dos melhores modelos para ENOS no cenário SSP5-8.5, são mostrados na FIGURA 203. Esses resultados são representados pela cor cinza escuro, para comparação com resultados das simulações no clima presente e no cenário SSP2-4.5 (representados em cinza claro).

FIGURA 203 – CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE NO CENÁRIO SSP5-8.5 (CINZA ESCURO), NO CENÁRIO SSP2-4.5 (CINZA CLARO TRACEJADO) E NAS RODADAS HISTÓRICAS (CINZA CLARO CONTÍNUO).



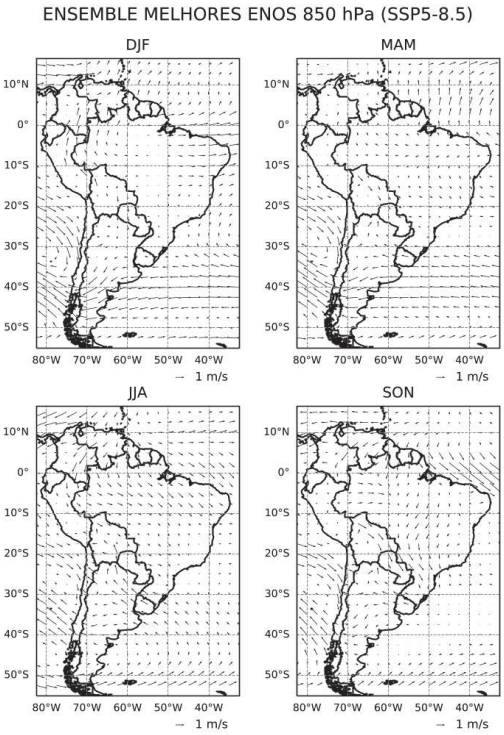
FONTE: A autora (2022).

Para as regiões do núcleo de monção e de maior variabilidade da monção e regiões contidas dentro delas (centro-oeste e centro) (primeiras duas fileiras superiores da FIGURA 203), as projeções no cenário SSP5-8.5 mostram o aumento mais notável da precipitação de dezembro a abril, principalmente nos meses do verão (janeiro e fevereiro), e a diminuição mais notável entre agosto e outubro, sendo que no centro esta diminuição se estende até novembro. Nos demais meses, os resultados para o clima presente e para os dois cenários futuros são praticamente iguais. O aumento de precipitação de verão é mais intenso nas regiões de monção mais a leste (compreendidas no centro-leste do Brasil). No Sul do Brasil, as projeções mostram

aumento da precipitação em todos os meses, em comparação com o clima presente, com menor intensidade no final de inverno e início de primavera. Para a região Norte/Leste e Norte/Oeste, a média do conjunto apresenta redução da precipitação em quase todos os meses, principalmente no verão e início de outono, exceto no final do outono e início de inverno. Os resultados são qualitativamente semelhantes aos obtidos para CESM2 e para a média de conjunto de todos modelos.

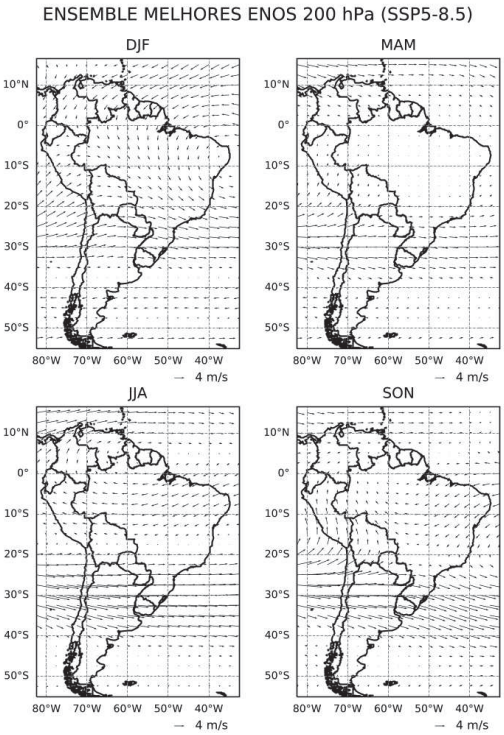
A média do conjunto dos modelos que melhor representam o ENOS no clima presente mostra diferenças entre as climatologias de circulação resultantes das simulações no cenário SSP5-8.5 e das simulações históricas qualitativamente semelhantes com aquelas obtidas para o CESM2 (melhor modelo para ENOS) e a média de todos os modelos. Portanto, valem os mesmos comentários. Em baixos níveis (FIGURA 204), há divergência no Norte do Brasil, principalmente verão e primavera, quando diminui a precipitação. Também há aumento de circulação ciclônica no Pacífico sudeste e sudoeste da AS, ajudando a aumentar a circulação de norte para SESA (principalmente na primavera), coerente com o aumento de precipitação na região. Esta é uma das características de circulação durante eventos EN, que não apareceu na análise dos resultados do IPSL-CM6A-LR (FIGURA 189). Em altos níveis (FIGURA 205), aparece forte convergência no norte da AS, principalmente na primavera e verão, coerente com diminuição da precipitação, o que também é uma característica de EN.

FIGURA 204 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM BAIXOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

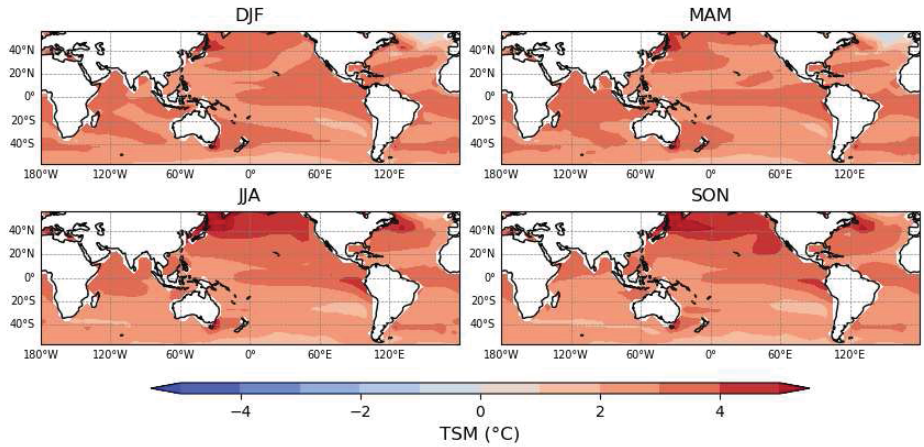
FIGURA 205 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO EM ALTOS NÍVEIS SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

Para o futuro no cenário de altas emissões, a média do conjunto dos 7 melhores modelos para simulação de ENOS projeta ainda o aumento da TSM em quase todo o globo, com exceção de altas latitudes próximas ao oceano Ártico (FIGURA 206). Em comparação com as diferenças mostradas pelo conjunto para o cenário SSP2-4.5, as diferenças neste cenário são maiores, excedendo 5°C em algumas regiões. Durante o inverno e a primavera austral, as maiores diferenças na TSM ocorrem em altas latitudes no HN. Contudo, em todas as estações é possível notar o aumento da TSM no Pacífico central-leste equatorial, indicando novamente a possibilidade do aumento da TSM no futuro em um padrão semelhante ao EN.

FIGURA 206 – DIFERENÇAS ENTRE CLIMATOLOGIAS DE TSM SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO NO CENÁRIO SSP5-8.5 E PRESENTE, PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS MODELOS QUE MELHOR SIMULAM O ENOS NO CLIMA PRESENTE.



FONTE: A autora (2022).

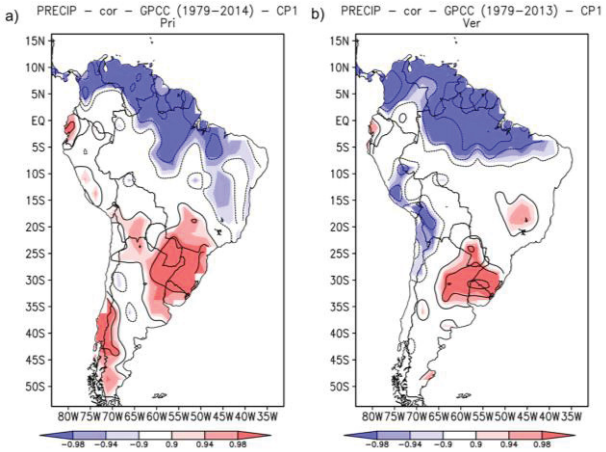
7 IMPACTO DE ENOS NO CLIMA PRESENTE E NO CLIMA FUTURO

As anomalias de TSM que surgem durante as fases positiva e negativa de ENOS produzem perturbações atmosféricas e teleconexões que impactam na precipitação da AS, fazendo com que determinadas regiões experimentem períodos de seca ou chuva, dependendo da fase. Dessa forma, não apenas atividades econômicas que dependem do clima, mas também ações de prevenção a desastres naturais, se beneficiam do conhecimento desse fenômeno. Portanto, é de extrema importância o estudo do ENOS no clima presente e também como modelos mostram os impactos de EN e LN no clima futuro da AS.

Para a avaliação, foi calculada a correlação entre a precipitação da AS e a série de componentes principais (CPs) (*factor scores, FS*) do modo ENOS de TSM, na primavera e no verão austral. Além disso, foram feitas composições de anomalias de precipitação para os anos EN e LN simulados pelos modelos, para a primavera, o verão e os meses mais representativos do início (novembro) e auge (janeiro) da estação chuvosa de monção. Todos os cálculos foram realizados para dados observados (GPCC e dados de estações), para o modelo de melhor desempenho ao reproduzir o ENOS no clima presente (CESM2), para a média do conjunto dos modelos que foram capazes de simular o ENOS no clima presente (10 modelos) e para a média do conjunto dos melhores modelos na simulação de ENOS (7 modelos). Os resultados da correlação fornecem uma resposta linear da relação entre a precipitação e a TSM, já a composição de anomalias para eventos EN e LN mostra as anomalias associadas aos dois tipos de evento que são as fases extremas opostas de ENOS. Desta forma, a composição de anomalias mostra também os componentes não lineares da resposta as fases opostas de ENOS.

As análises envolvendo dados observados foram feitas estabelecendo-se relações entre a precipitação do GPCC e de dados de estações com os modos ENOS de primavera e verão resultantes de dados do HadISST1. Para a TSM observada, o modo ENOS de primavera e verão é o primeiro modo rotacionado (REOF1). Portanto, a FIGURA 207a apresenta a correlação em cada ponto de grade sobre a AS entre a série de FS desse modo (REOF1) na primavera e a série contendo médias da precipitação de primavera em cada ano, do GPCC. De forma análoga, a FIGURA 207b mostra a correlação para o verão.

FIGURA 207 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO DO GPCC E CP DO MODO ENOS DO HADISST1 PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

Para a primavera (FIGURA 207a), os dados observados (GPCC/HadISST1) mostram as correlações em um padrão tipo dipolo com sinais opostos entre o norte/nordeste da AS, incluindo o Nordeste do Brasil, e SESA. Esses padrões indicam que em anos EN, ou seja, anos nos quais a TSM no Pacífico central-leste equatorial aumentou, houve redução da precipitação no norte/nordeste da AS (correlação negativa entre precipitação e TSM) e aumento da precipitação no sudeste da AS (correlação positiva entre precipitação e TSM). O aumento de precipitação também é observado sobre o Equador e na região sul dos Andes em anos EN. Para anos LN, o padrão se inverte e ocorre mais precipitação no norte/nordeste da AS e menos em SESA.

Para o verão (FIGURA 207b), as correlações também indicam redução da precipitação em anos EN no norte/nordeste da AS. Enquanto na primavera essa redução se estende até o centro-leste do Brasil, no verão se concentra mais próxima do equador e em CESA é mostrado aumento de precipitação. Também durante EN é observada redução de precipitação nos Andes e aumento em SESA, sobre uma área menor do que na primavera, deslocada para sudoeste.

A relação apresentada pela correlação entre dados observados também é mostrada pela composição de anomalias da primavera e do verão utilizando os anos EN e LN em comum entre as estações (TABELA 23). Assim, o impacto do EN na primavera resulta na redução de precipitação no norte e nordeste da AS, em uma faixa que se estende em direção ao centro-leste do Brasil (FIGURA 208a). Por outro lado,

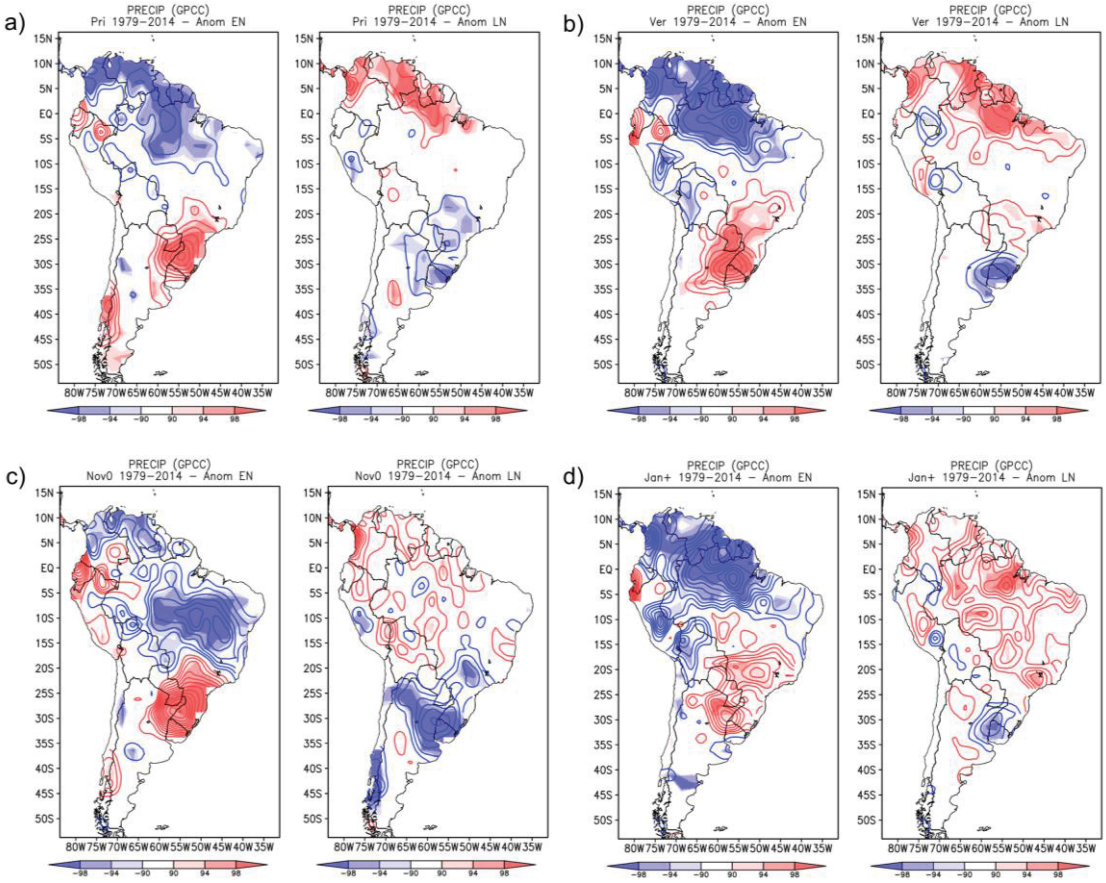
ocorre aumento da precipitação em SESA, no Equador (não significativa) e no sul dos Andes. Em anos LN (FIGURA 208a), o padrão de anomalias se inverte e são observadas anomalias positivas no norte/nordeste da AS e negativas em SESA. Para o verão, as anomalias em EN são mais intensas no norte/nordeste da AS e em SESA (FIGURA 208b). Nessa região, as anomalias positivas se estendem em direção ao centro-leste do Brasil e centro da Argentina. Além disso, anomalias de precipitação negativas são observadas no Peru e na Bolívia. Diferentemente da primavera, em anos LN no verão as anomalias positivas no norte/nordeste da AS atingem uma área maior e no Sudeste do Brasil são observadas anomalias de mesmo sinal (FIGURA 208b).

O mês de novembro em anos EN mostra anomalias de precipitação mais intensas e com anomalias significativas mais extensas que as anomalias médias de primavera, principalmente em SESA (FIGURA 208c). É observado aumento da precipitação em SESA e redução no norte da AS e centro do Brasil. Já em anos LN, há redução de precipitação significativa em SESA, no norte da Argentina e sul dos Andes. Em janeiro de anos EN, as anomalias são mais intensas do que a média do verão, embora as anomalias significativas sejam menos extensas, principalmente em SESA (FIGURA 208d). Em anos LN, anomalias de precipitação positivas ocorrem em grande parte do Brasil, mas apenas em partes do Norte do Brasil são significativas. Anomalias negativas aparecem em parte de SESA.

Comparando os mapas da FIGURA 208 para EN e LN é possível ver que há componentes não lineares no efeito de ENOS, pois os mapas para LN não são os mesmo que para EN, apenas com troca de sinal. Contudo, é possível ver que há um grande componente linear nos impactos, principalmente na análise para primavera e verão.

Apesar de nos títulos dos mapas de composições de anomalias constar todo o período, os cálculos de janeiro são feitos utilizando os janeiros do primeiro ao último verão contabilizado (por exemplo, janeiros de 1980 a 2014 tendo utilizado os verões de 1979 a 2013 – pois o mês de referência do verão é dezembro).

FIGURA 208 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO PARA DADOS DO GPCC PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO.

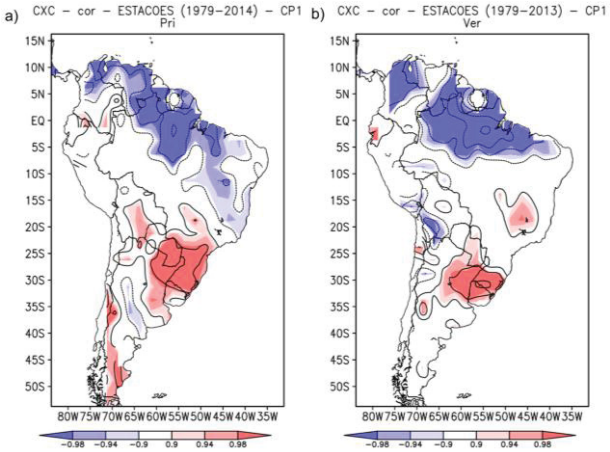


FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Em cada caso, o painel à esquerda refere-se às composições em anos EN e à direita, LN, conforme indicado no título de cada mapa. O contorno se inicia em ±0,4 mm/dia e o intervalo é de 0,4 mm/dia, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

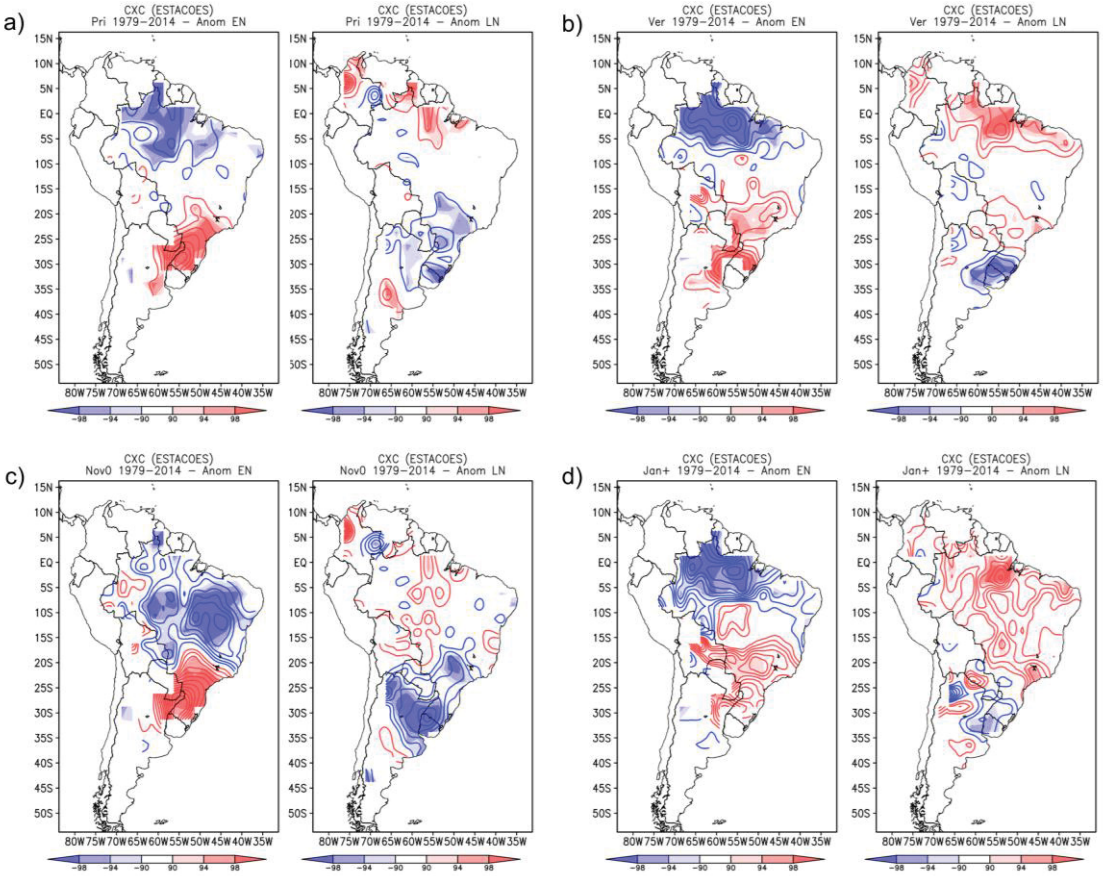
As mesmas análises, feitas com dados de estações, mostram resultados bastante semelhantes, tanto para correlações (FIGURA 209) quanto para composições de anomalias (FIGURA 210), pelo menos sobre o Brasil, onde há mais dados de estações. Portanto, não serão feitos comentários específicos sobre estes resultados.

FIGURA 209 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO DE DADOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E CP DO MODO ENOS DO HADISST1 PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

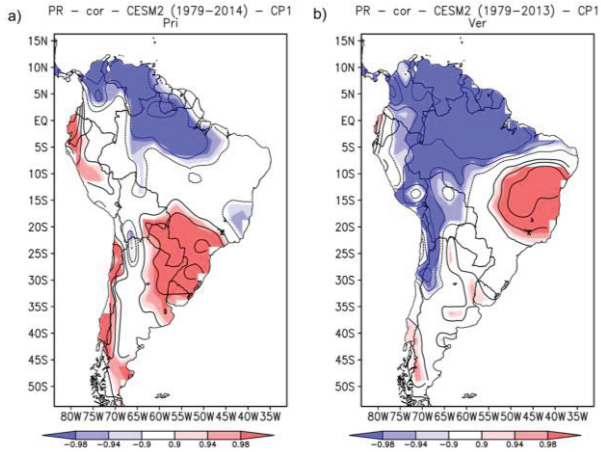
FIGURA 210 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO PARA DADOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: Em cada caso, o painel à esquerda refere-se às composições em anos EN e à direita, LN, conforme indicado no título de cada mapa. O contorno se inicia em ±0,4 mm/dia e o intervalo é de 0,4 mm/dia, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

No modelo CESM2, o que melhor representa o modo ENOS no clima presente, ENOS é o primeiro modo rotacionado de TSM da primavera e do verão. A FIGURA 211a apresenta a correlação em cada ponto de grade entre a série de FS desse modo (REOF1) na primavera e a série contendo médias da precipitação de primavera em cada ano, do CESM2. De forma análoga, a FIGURA 211b mostra a correlação para o verão.

FIGURA 211 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E CP DO MODO ENOS SIMULADOS NO CLIMA PRESENTE PELO MODELO CESM2 PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO.



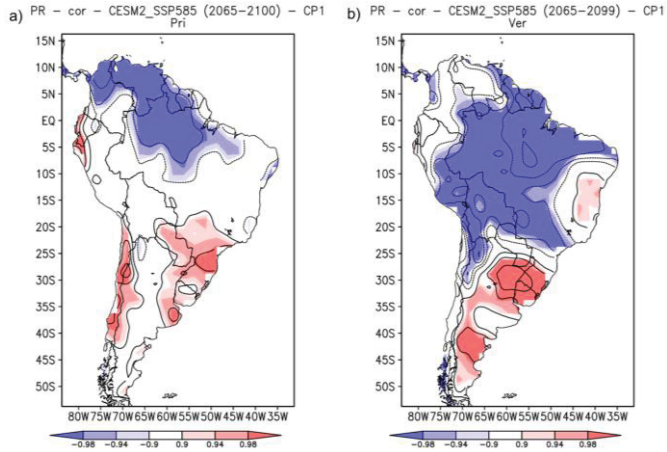
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

Similarmente aos resultados do GPCC (FIGURA 207a), o modelo CESM2 simula para a primavera de anos EN redução de precipitação no norte e parte do nordeste da AS, e parte do centro-leste do Brasil (FIGURA 211a). Por outro lado, é mostrado aumento de precipitação em SESA, se estendendo para noroeste, e nos Andes, em regiões maiores do que o observado. Em anos LN, esses padrões se invertem. Para o verão (FIGURA 211b) em anos EN, os padrões simulados mostram diminuição da precipitação no norte e nordeste da AS, se estendendo para sudoeste sobre os Andes. Além disso, é apresentado aumento da precipitação em CESA. Destes resultados, pode-se considerar que o componente linear do impacto de ENOS é bem representado pelo modelo CESM2 no clima presente.

Similares correlações obtidas de projeções do modelo CESM2 no cenário SSP5-8.5 mostram padrões similares para as correlações de primavera nos dois períodos (FIGURA 212a). Contudo, a precipitação projetada em anos EN em SESA e no Chile apresenta correlações mais fracas e menos significativas no futuro. Ademais,

a redução de precipitação em CESA simulada no período presente, não aparece nas simulações futuras. Para o verão (FIGURA 212b), os padrões de correlação no futuro são mais fortes que no período presente, exceto em CESA (FIGURA 211b). Em anos EN no futuro ocorre redução de precipitação em toda a região Amazônica e partes do oeste da AS e do Sudeste e Nordeste do Brasil. Além disso, há aumento de precipitação em SESA, em grande parte da Argentina e em CESA.

FIGURA 212 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E CP DO MODO ENOS SIMULADOS NO CENÁRIO SSP5-8.5 PELO MODELO CESM2 PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO.



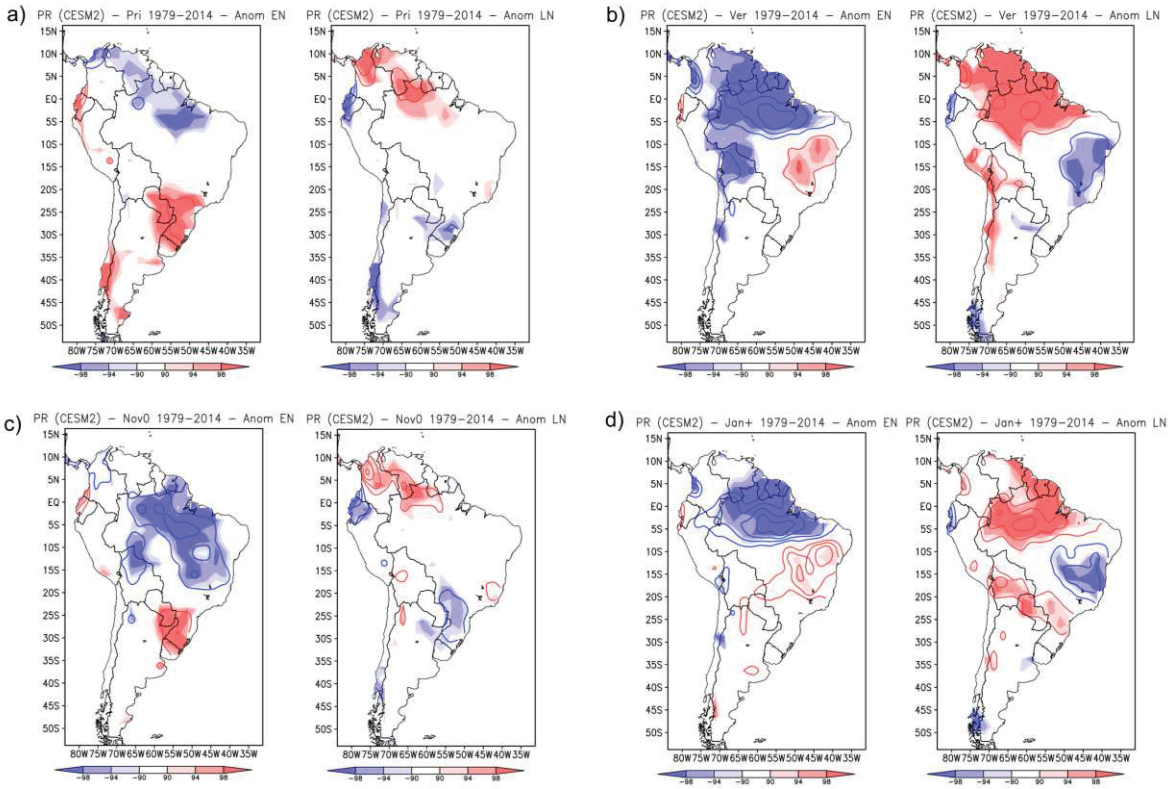
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

Ao se comparar a TABELA 24 com a TABELA 23, é possível notar que o CESM2 não representa os anos EN e LN de acordo com o observado. Esse comportamento é esperado para os modelos, dado o componente caótico associado a não-linearidade das equações que governam o comportamento do oceano em acoplamento com a atmosfera. Assim, utilizando os anos EN e LN calculados para o modelo (TABELA 24, TABELA 34 e TABELA 37), foram obtidas as composições de anomalias de precipitação para as simulações históricas e para projeções nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Em comparação com as anomalias observadas (FIGURA 208), as simulações históricas do CESM2 mostram padrões de anomalias similares na primavera, embora menos intensas (FIGURA 213a). É mostrado aumento de precipitação em SESA e no sul dos Andes, e redução no norte/nordeste da AS em anos EN. Em anos LN, ainda na primavera, esses padrões se invertem e, em SESA, a redução de precipitação não é tão intensa quanto o aumento em anos EN, o que é reproduzido pelo modelo. No

verão, as anomalias que ocorrem em anos EN formam um padrão tipo dipolo entre o norte/nordeste da AS e CESA, invertendo a polaridade em anos LN (FIGURA 213b). Embora o modelo reproduza anomalias observadas no verão, não reproduz as anomalias observadas em SESA. Em novembro, as anomalias de precipitação negativas observadas no norte/nordeste da AS em anos EN (FIGURA 208c) aparecem na simulação do modelo, assim como as anomalias em SESA, que aparecem mais fracas (FIGURA 213c). Em anos de LN, o modelo reproduz qualitativamente as anomalias observadas, embora com intensidade e extensão diferente. Em janeiro de anos EN o modelo reproduz bem as anomalias negativas no norte/nordeste da AS, mas não reproduz as de SESA. Em anos LN, as anomalias positivas no norte/nordeste da AS são superestimadas e as negativas em SESA não são reproduzidas (FIGURA 213d).

FIGURA 213 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CLIMA PRESENTE PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO.

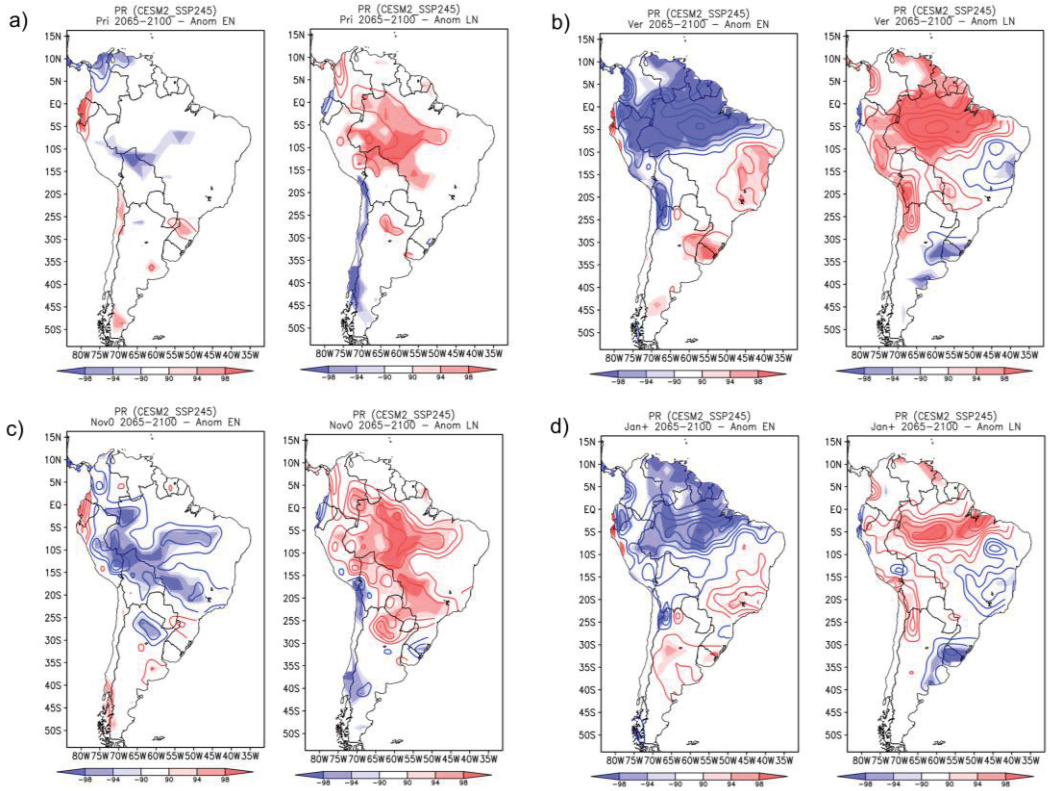


FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Em cada caso, o painel à esquerda refere-se às composições em anos EN e à direita, LN, conforme indicado no título de cada mapa. O contorno se inicia em ±0,4 mm/dia e o intervalo é de 0,4 mm/dia, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

Para simulações no cenário SSP2-4.5, o modelo CESM2 frequentemente mostra anomalias mais intensas em comparação com o clima presente, principalmente no verão (FIGURAS 213 e 214). Na primavera de EN no futuro as anomalias estão mais fracas que no presente (FIGURA 214a) e em novembro as anomalias do norte estão deslocadas para oeste e para sul e mais espalhadas, enquanto as de SESA desaparecem (FIGURA 214c). Na primavera e em novembro de LN as anomalias do norte também se espalham para sul e as de SESA se enfraquecem muito. Já para o verão (FIGURA 214b) e em janeiro (FIGURA 214d), os padrões de anomalias apresentados são próximos aos simulados no clima presente (FIGURA 213), mostrando anomalias mais intensas, sobretudo no Norte do Brasil e em SESA. Em CESA, no entanto, as anomalias tornam-se menos significativas.

FIGURA 214 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP2-4.5 PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO.



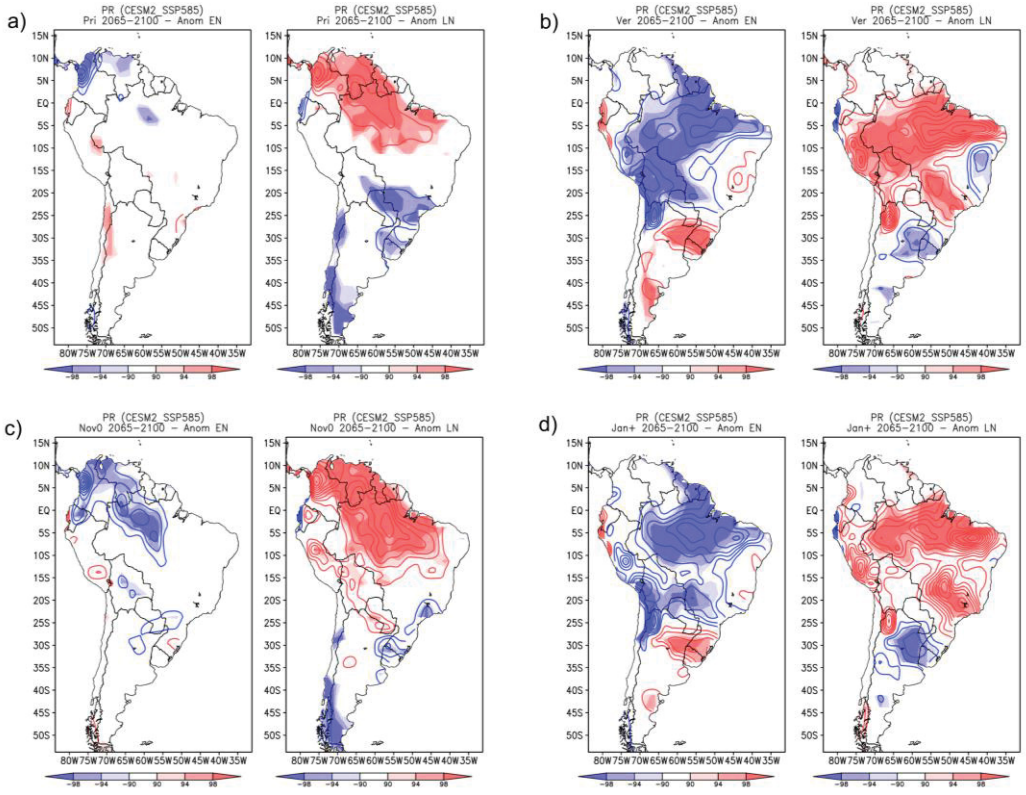
FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Em cada caso, o painel à esquerda refere-se às composições em anos EN e à direita, LN, conforme indicado no título de cada mapa. O contorno se inicia em ±0,4 mm/dia e o intervalo é de 0,4 mm/dia, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

Para o cenário SSP5-8.5, a projeção do CESM2 intensifica as anomalias em todos os períodos estudados (primavera, verão, novembro e janeiro), em comparação

com o clima presente. Em relação ao cenário SSP2-4.5, as anomalias significativas se tornam mais extensas; as anomalias de verão em SESA se fortalecem. Para anos EN, os impactos na primavera são menores de maneira geral (FIGURA 215a) e em novembro é projetada redução de precipitação no norte da AS e parte da região amazônica. Nesses dois períodos para EN não aparecem anomalias em SESA. Já em anos LN, é projetado aumento de anomalias positivas no norte/nordeste da AS (FIGURA 215a e FIGURA 215c) e de anomalias negativas em SESA. No verão, as anomalias de precipitação simuladas no clima presente no norte e nordeste da AS, são intensificadas no futuro e se estendem para sudoeste. Além disso, surgem anomalias em SESA de sinais opostos a essas, tanto em EN como em LN (FIGURA 215b). Em janeiro são representadas anomalias mais intensas do que na média do verão, e em LN muda o sinal das anomalias em CESA (FIGURA 215d).

FIGURA 215 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO PARA O MODELO CESM2 NO CENÁRIO SSP5-8.5 PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO.



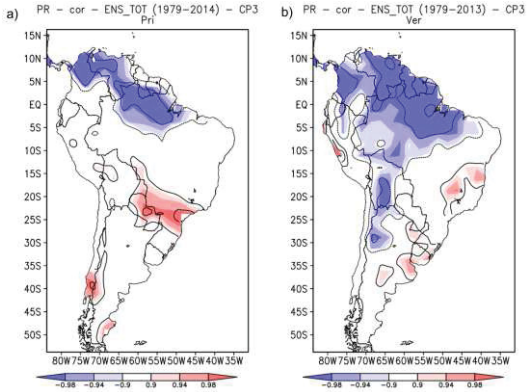
FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Em cada caso, o painel à esquerda refere-se às composições em anos EN e à direita, LN, conforme indicado no título de cada mapa. O contorno se inicia em ±0,4 mm/dia e o intervalo é de 0,4 mm/dia, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

A média do conjunto dos 10 modelos que são capazes de simular o ENOS no clima presente e a média do conjunto de 7 modelos que melhor reproduzem ENOS mostram resultados bastante semelhantes nos cálculos de correlações e composições de anomalias para os mesmos períodos.

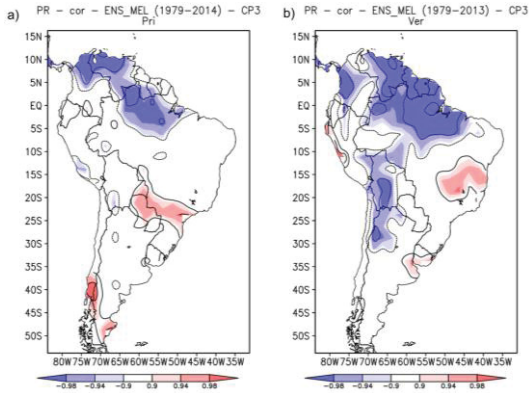
As FIGURAS 216 e 217 mostram os coeficientes de correlação obtidos em cada ponto de grade entre a série de FS do modo ENOS e a série contendo médias da precipitação de primavera e verão em cada ano, para a média do *ensemble* de todos os 10 modelos que reproduzem ENOS e para a média dos 7 melhores modelos, respectivamente.

FIGURA 216 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E CP DO MODO ENOS SIMULADOS NO CLIMA PRESENTE PELA MÉDIA DO CONJUNTO DOS 10 MODELOS QUE REPRODUZEM ENOS PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

FIGURA 217 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E CP DO MODO ENOS SIMULADOS NO CLIMA PRESENTE PELA MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MELHORES MODELOS EM REPRODUZIR ENOS PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO.

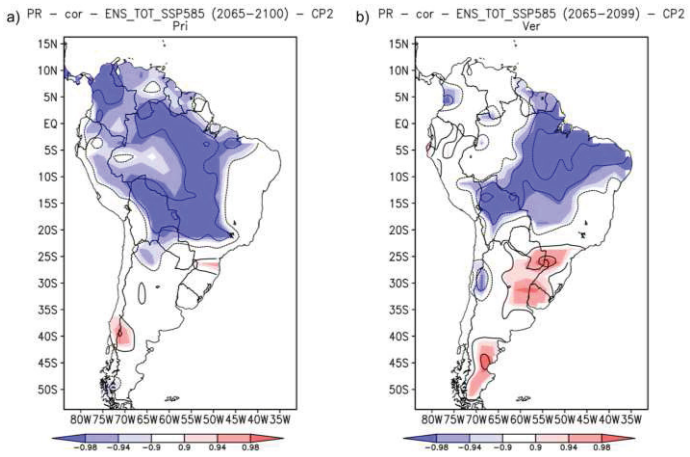


FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

Das FIGURAS 216a e 217a, é possível notar que as médias dos conjuntos de modelos simulam na primavera de anos EN redução de precipitação no norte/nordeste da AS, ao mesmo tempo em que mostram aumento da precipitação no sudeste do Brasil em uma faixa que se estende para noroeste. A média de todos os modelos mostra correlações mais fortes nessa região. Já no verão de anos EN, as médias dos conjuntos mostram redução da precipitação no norte/nordeste da AS se estendendo para sul sobre os Andes. Por outro lado, em CESA e em SESA é apresentado aumento da precipitação (FIGURA 216b e FIGURA 217b). Em LN os sinais se invertem.

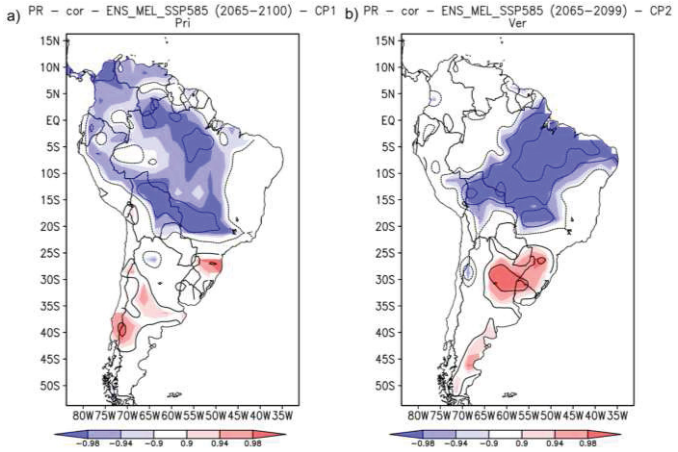
Os resultados das correlações para projeções no cenário SSP5-8.5 apresentados pelas médias dos conjuntos também são similares. Assim, as FIGURAS 218 e 219 mostram esses resultados para a média do *ensemble* de todos os modelos que reproduzem ENOS no clima presente e para a média dos melhores modelos, respectivamente.

FIGURA 218 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E CP DO MODO ENOS SIMULADOS NO CENÁRIO SSP5-8.5 PELA MÉDIA DO CONJUNTO DOS 10 MODELOS QUE REPRODUZEM ENOS PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO.



FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

FIGURA 219 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E CP DO MODO ENOS SIMULADOS NO CENÁRIO SSP5-8.5 PELA MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MELHORES MODELOS EM REPRODUZIR ENOS PARA A) PRIMAVERA E B) VERÃO.



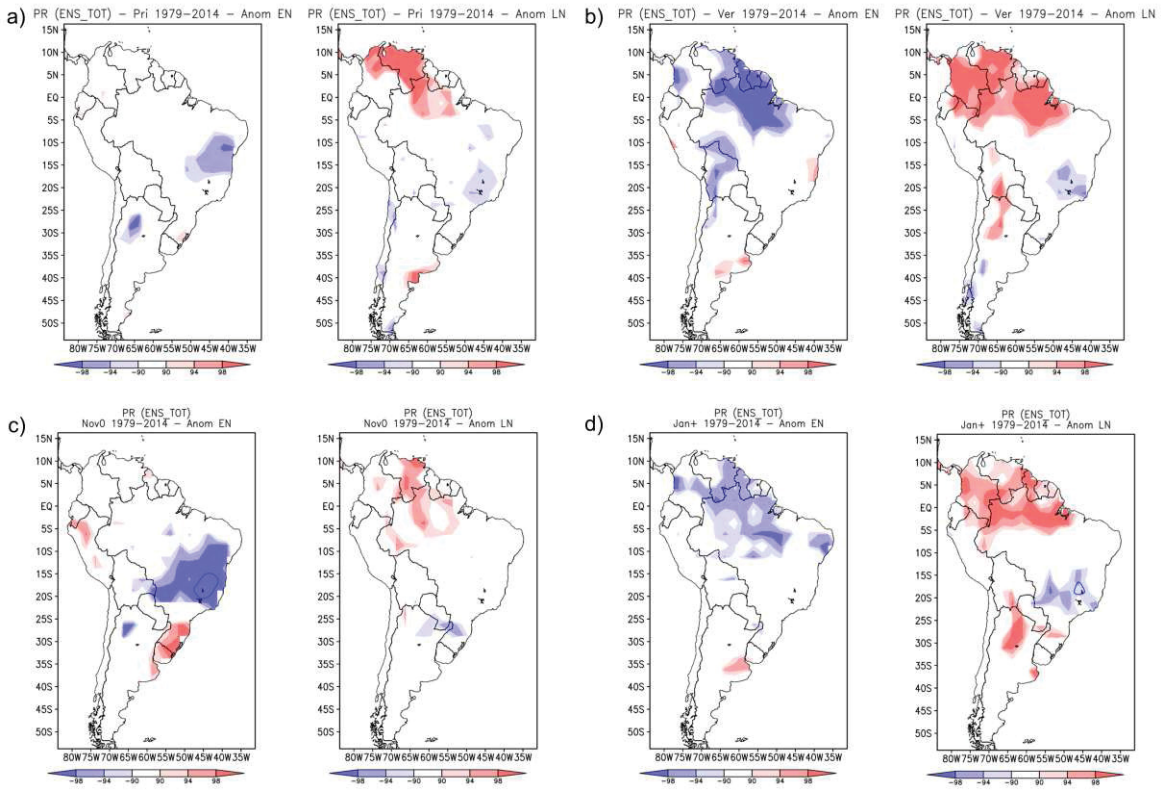
FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: O contorno se inicia em ±0,2 e o intervalo é de 0,2, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

De acordo com as FIGURAS 218a e 219a, as médias dos conjuntos simulam para a primavera de anos EN redução da precipitação do norte/nordeste da AS, em uma área que se estende até o centro do continente e abrangendo toda região Amazônica. A média do conjunto de todos os modelos que simulam o ENOS mostra correlações mais fortes e significativas nessa área. Por outro lado, é projetado aumento de precipitação no Sul do Brasil e no sul da AS, sendo maior nessa região para a média do conjunto de melhores modelos. Para o verão (FIGURA 218b e FIGURA 219b) de anos EN, as médias dos conjuntos projetam redução de precipitação principalmente no nordeste da AS em uma ampla faixa que se estende para sudoeste. Já em SESA e no sul da Argentina é mostrado aumento de precipitação nesses anos.

Nas simulações do clima presente e nas projeções dos dois cenários futuros, as médias dos conjuntos representam anomalias de precipitação muito fracas em anos EN e LN, frequentemente não excedendo 0,4 mm/dia, o que pode indicar a dispersão dos impactos simulados de ENOS por estes modelos. Apesar disso, em algumas regiões, as anomalias (mesmo que pequenas) mostram alta significância. As FIGURAS 220 e 221 mostram as composições de anomalias para eventos EN e LN no clima presente, realizadas para a média do *ensemble* de todos os 10 modelos que reproduzem ENOS e para a média dos 7 melhores modelos dentre esses, respectivamente. Essas análises tomam como base os anos EN e LN nos quais ocorrem eventos na primavera e no verão, apresentados nas TABELAS 25 e 33. Para

primavera e novembro de anos EN, os padrões apresentados pelas médias dos conjuntos são similares, mostrando redução da precipitação em CESA e aumento no Sul do Brasil, sendo as áreas atingidas maiores em novembro (FIGURA 220a e FIGURA 220c, FIGURA 221a e FIGURA 221c). Ainda para a primavera e novembro, em anos LN são simuladas anomalias positivas significativas no norte da AS, sobretudo na primavera. Para o verão e janeiro (FIGURA 220b e FIGURA 220d, FIGURA 221b e FIGURA 221d), é mostrada redução de precipitação em anos EN na região Amazônica e, em anos LN, aumento da precipitação no norte da AS, principalmente a média do *ensemble* de todos os modelos (FIGURA 220). Ainda no verão e em janeiro aparece muito fraca indicação de aumento de precipitação em CESA durante EN e mais clara indicação de diminuição em LN.

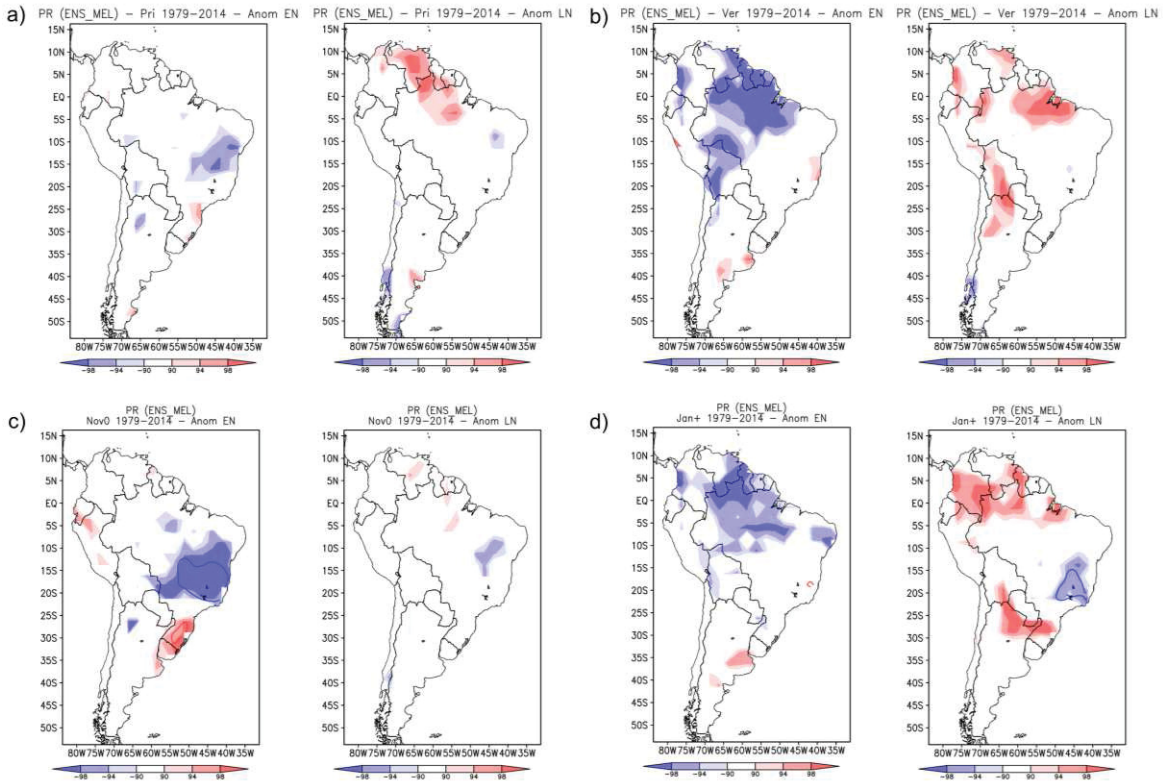
FIGURA 220 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NO CLIMA PRESENTE PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 10 MODELOS QUE REPRODUZEM O ENOS, PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Em cada caso, o painel à esquerda refere-se às composições em anos EN e à direita, LN, conforme indicado no título de cada mapa. O contorno se inicia em ±0,4 mm/dia e o intervalo é de 0,4 mm/dia, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

FIGURA 221 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NO CLIMA PRESENTE PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MELHORES MODELOS EM REPRODUZIR ENOS, PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO.



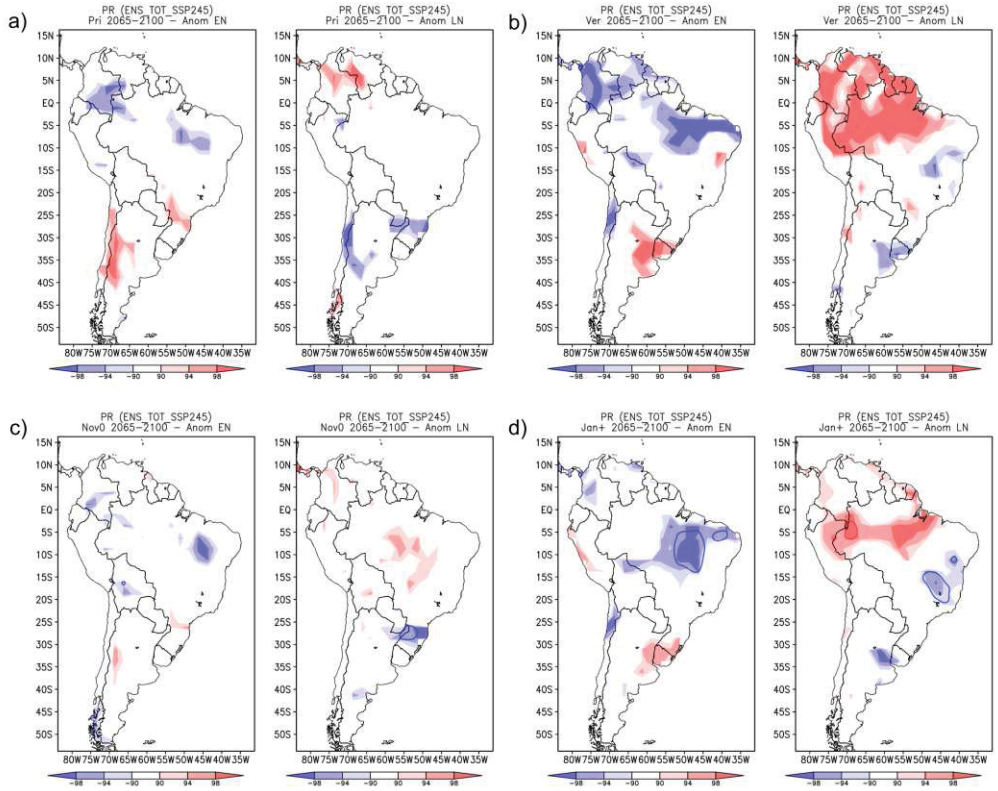
FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Em cada caso, o painel à esquerda refere-se às composições em anos EN e à direita, LN, conforme indicado no título de cada mapa. O contorno se inicia em ±0,4 mm/dia e o intervalo é de 0,4 mm/dia, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

As composições de anomalias resultantes das médias das projeções dos conjuntos no cenário SSP2-4.5 tomam como base os anos EN e LN em que há eventos tanto na primavera como no verão, apresentados nas TABELAS 35 e 36. De acordo com as FIGURAS 222 e 223, nesse cenário a média do conjunto dos modelos que simulam o ENOS e a média do conjunto de melhores modelos na simulação de ENOS, não mostram tantas alterações na precipitação, especialmente na primavera e em novembro. As alterações mais evidentes ocorrem no verão e em janeiro, sobretudo para os resultados da média de todos os modelos (FIGURA 222b e FIGURA 222d). Assim, a média desse conjunto mostra no verão de anos EN a redução da precipitação no norte e nordeste da AS e o aumento em SESA. Em anos LN, ainda para o verão, é projetado aumento da precipitação no norte da AS e região Amazônica e redução em CESA e em SESA. Para a média dos 7 melhores modelos em reproduzir ENOS (FIGURA 223), é interessante observar que em EN durante a primavera (e novembro) há anomalias negativas no norte da AS e em CESA e anomalias positivas

em SESA, embora fracas e dispersas, e que durante o verão (e janeiro) as anomalias em CESA se invertem, enquanto as do norte da AS e em SESA conservam o sinal. Este comportamento amplifica o comportamento mostrado no clima presente (FIGURA 221) e concorda qualitativamente com resultados observados no clima presente (FIGURA 208).

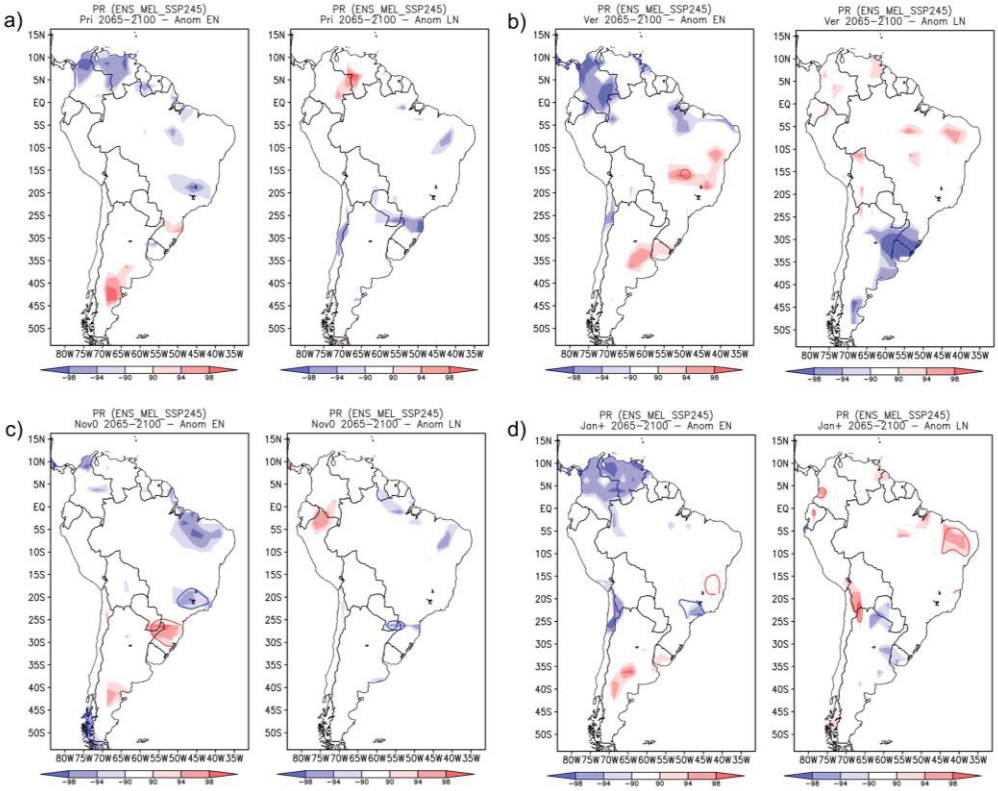
FIGURA 222 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NO CENÁRIO SSP2-4.5 PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 10 MODELOS QUE REPRODUZEM O ENOS, PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Em cada caso, o painel à esquerda refere-se às composições em anos EN e à direita, LN, conforme indicado no título de cada mapa. O contorno se inicia em ±0,4 mm/dia e o intervalo é de 0,4 mm/dia, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

FIGURA 223 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NO CENÁRIO SSP2-4.5 PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MELHORES MODELOS EM REPRODUZIR ENOS, PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO.



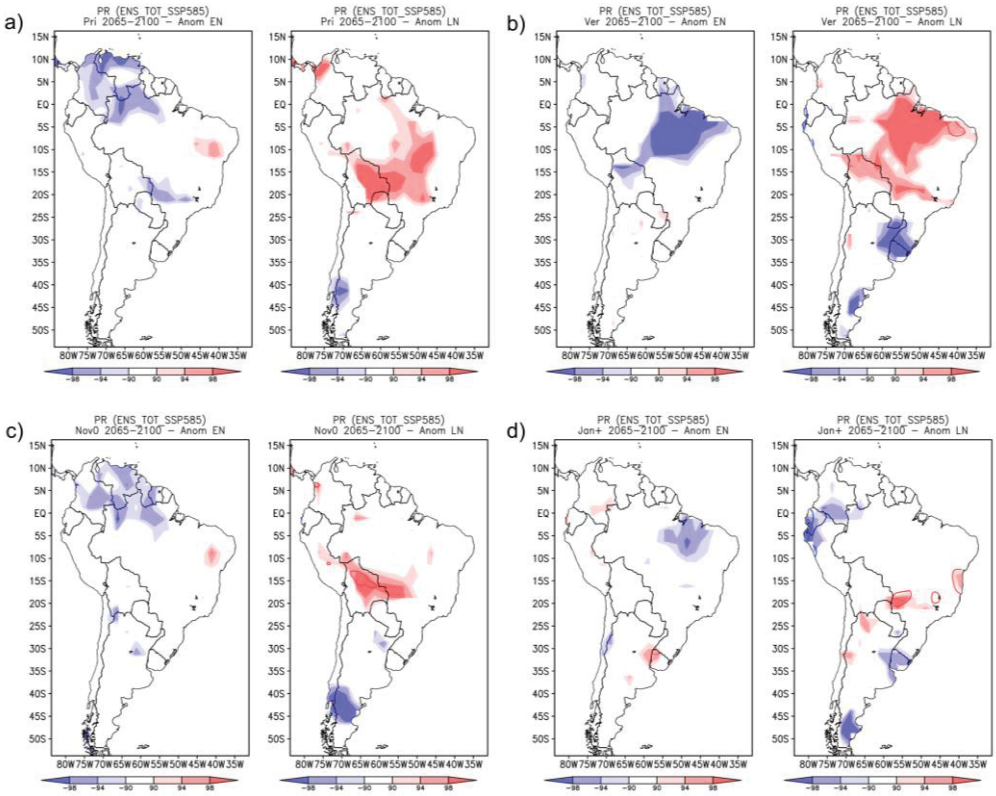
FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Em cada caso, o painel à esquerda refere-se às composições em anos EN e à direita, LN, conforme indicado no título de cada mapa. O contorno se inicia em ±0,4 mm/dia e o intervalo é de 0,4 mm/dia, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

Para as composições de anomalias resultantes das médias das projeções dos conjuntos no cenário SSP5-8.5 foram tomados como base os anos EN e LN em que há eventos tanto na primavera como no verão, apresentados nas TABELAS 38 e 39. Os resultados da média do conjunto de modelos que simulam o ENOS no clima presente são bastante similares aos resultados da média do conjunto dos 7 melhores modelos em reproduzir ENOS. Assim, nas primaveras e novembros de anos EN as médias dos conjuntos mostram anomalias muito fracas, destacando-se principalmente a redução da precipitação no norte da AS (FIGURA 224a e FIGURA 224c, FIGURA 225a e FIGURA 225c). Já em anos LN, apresentam aumento de precipitação no centro do continente, o que é diferente do resultado para o clima presente, que mostra aumento no norte do continente (FIGURA 221) ou em relação ao cenário SSP2-4.5, quando as anomalias para LN nas primaveras e novembros foram muito pequenas (FIGURA 223). Para os verões e janeiros de anos EN, as médias dos conjuntos mostram redução da precipitação no nordeste da AS, especialmente no verão

(FIGURA 224b e FIGURA 224d, FIGURA 225b e FIGURA 225d). Em anos LN, apesar dos meses de janeiro não mostrarem grandes alterações, na média do verão, é projetado aumento da precipitação no leste da região Amazônica e redução em SESA. Em comparação com resultados do clima presente (FIGURA 221), no verão de anos EN as médias dos conjuntos deslocam as anomalias do norte da AS para sudeste e, em anos LN, as anomalias do norte da AS são deslocadas para o centro do continente.

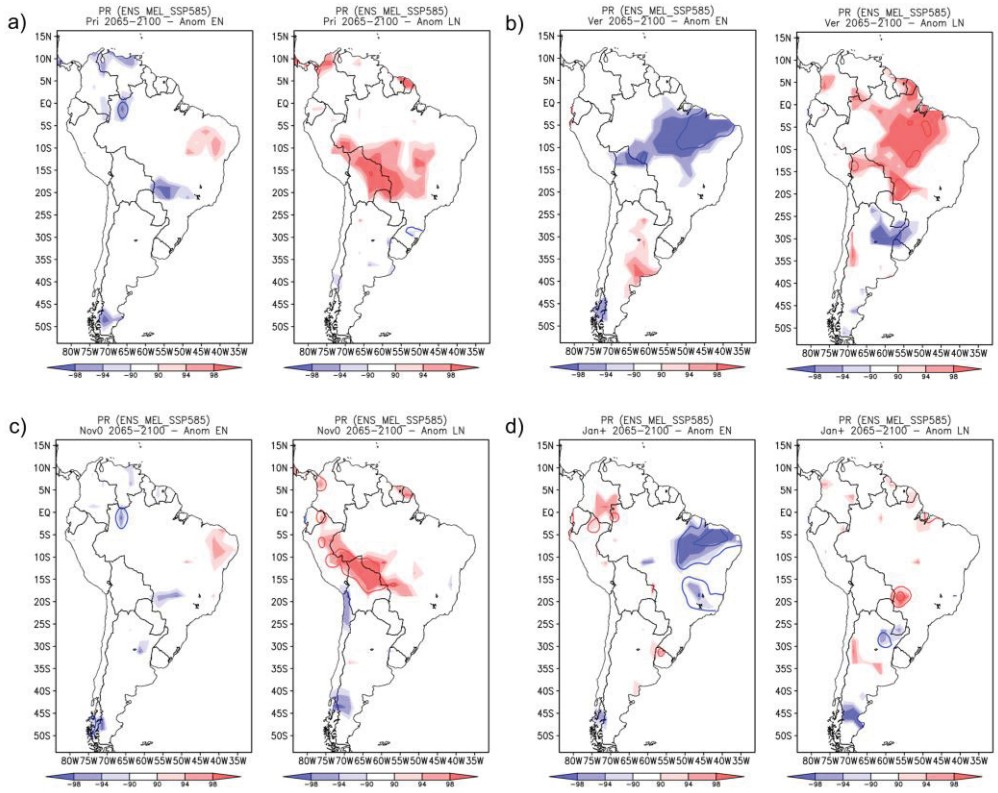
FIGURA 224 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NO CENÁRIO SSP5-8.5 PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 10 MODELOS QUE REPRODUZEM O ENOS, PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Em cada caso, o painel à esquerda refere-se às composições em anos EN e à direita, LN, conforme indicado no título de cada mapa. O contorno se inicia em ±0,4 mm/dia e o intervalo é de 0,4 mm/dia, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

FIGURA 225 – COMPOSIÇÕES DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NO CENÁRIO SSP5-8.5 PARA A MÉDIA DO CONJUNTO DOS 7 MELHORES MODELOS EM REPRODUZIR ENOS, PARA A) PRIMAVERA, B) VERÃO, C) NOVEMBRO E D) JANEIRO.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Em cada caso, o painel à esquerda refere-se às composições em anos EN e à direita, LN, conforme indicado no título de cada mapa. O contorno se inicia em ±0,4 mm/dia e o intervalo é de 0,4 mm/dia, sem a presença da isolinha 0. As cores indicam o nível de confiança a partir de ±90%.

Tomando-se como referência a média do conjunto dos 7 modelos que melhor representam ENOS, e focalizando o comportamento durante EN na primavera e verão, vê-se que há certa continuidade ou coerência de comportamento no clima presente (FIGURA 221) e no cenário futuro SSP2-4.5 (FIGURA 223), mas há mudanças significativas no cenário futuro SSP5-8.5 (FIGURA 225).

Os resultados alcançados para a média do conjunto de modelos que reproduzem o ENOS no clima presente e para a média do conjunto dos melhores modelos não deixam evidentes quais os impactos que o ENOS causa no clima futuro, pois as anomalias apresentadas são muito fracas, provavelmente devido à grande dispersão dos resultados dos modelos. Além disto, comparando-se a evolução das anomalias relacionadas a EN e LN pelo modelo CESM2 (que melhor simula ENOS) e as anomalias dos 7 melhores modelos na simulação de ENOS desde o clima presente até o clima futuro nos dois cenários, percebe-se maior coerência nas anomalias produzidas para EN por CESM2 (FIGURAS 213, 214 e 215) do que pelo conjunto dos

7 modelos (FIGURAS 221, 223 e 225), o que também provavelmente se deve à maior dispersão das respostas dos modelos às crescentes forçantes radiativas. Assim, um único modelo bem avaliado se mostra melhor nas análises do que a média de um conjunto de modelos.

O modelo CESM2, de melhor desempenho, sugere que as diferenças entre a climatologia de precipitação da monção no clima futuro e no clima presente pode dever-se à influência crescente de condições do tipo EN no clima futuro.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Modelos climáticos que participam do CMIP6 tiveram seus desempenhos em reproduzir o clima da AS testados de acordo com diferentes critérios que avaliam o quanto seus resultados se aproximam do clima observado ou da reanálise. Para essa avaliação, foram consideradas climatologias mensais e sazonais de precipitação e circulação atmosférica em altos e baixos níveis.

De modo geral, os modelos foram capazes de representar aspectos característicos da precipitação de monção, como o aumento da precipitação no centro do Brasil a partir de novembro, atingindo a precipitação máxima nos meses do verão austral e decaindo até o inverno, quando os modelos simulam condições secas sobre o continente. No entanto, cada modelo desloca a sua precipitação máxima de verão em maior ou menor grau em relação à precipitação observada e prolongam ou abreviam um pouco a duração da estação chuvosa.

Apesar dos vários aspectos comuns nas climatologias dos modelos sobre a América do Sul, há diferenças entre suas simulações. Quase todos superestimam a máxima precipitação de verão e subestimam a intensidade da precipitação de inverno no Sul do Brasil. Quase todos deslocam a máxima precipitação de verão em relação à observada: alguns a deslocam para nordeste, penetrando parcialmente na Região Nordeste do Brasil e superestimando a chuva nessa região no verão e outono, alguns a deslocam para o sudeste, penetrando parcialmente na Região Sudeste do Brasil. Um problema comum a praticamente todos os modelos é a superestimação da precipitação de verão nos Andes tropicais, entre 10°S e 20°S. Por outro lado, é comum a subestimação da chuva no norte da AS e do Brasil no verão e outono austrais. Contudo, de maneira geral as diferenças são relativamente pequenas.

Quanto à circulação, os modelos simulam em baixos níveis a mudança na direção do vento equatorial que incide no continente para vento de nordeste na primavera, quando se inicia a monção. Os ventos de baixos níveis indicam o fortalecimento da baixa do Chaco no verão, através da circulação ciclônica ao seu redor. Em altos níveis, os modelos mostram um sistema de circulação anticiclônica, que surge na região Amazônica na primavera e fica centrada sobre a Bolívia no verão do HS, conhecida como Alta da Bolívia. Este sistema, situado a sudoeste do centro de maior precipitação de verão, está dinamicamente relacionado ao fortalecimento da convecção na região central do continente e pode mudar um pouco seu padrão de

acordo com a posição da máxima precipitação de verão. As diferenças observadas entre os padrões de circulação dos modelos são coerentes com diferenças observadas na precipitação.

A avaliação do desempenho dos modelos em reproduzir o clima da AS indicou que a média do conjunto formado por todos os modelos e o modelo EC-Earth3-Veg mostraram os melhores desempenhos ao simular a precipitação no clima presente. A média do conjunto também mostrou o melhor desempenho em simular ambos os componentes do vento horizontal em altos e baixos níveis. Na avaliação da representação da climatologia de maneira geral, incluindo precipitação e circulação, a média do conjunto dos modelos e o modelo IPSL-CM6A-LR foram os que mostraram melhor desempenho.

Embora os modelos reproduzam satisfatoriamente as médias climatológicas, a representação da variabilidade em torno destas médias é um pouco mais incerta. Modos de variabilidade da precipitação de primavera e verão obtidos a partir de dados observados mostram, entre os dois modos mais importantes, um modo com forte variabilidade em CESA e mais fraca e de sinal contrário em SESA. A correlação entre estes modos não é significativa. Contudo, calculando modos de variabilidade apenas para os meses centrais destas estações, novembro e janeiro, os primeiros modos são realmente modos dipolo, com variabilidade mais comparável entre CESA e SESA e com tendência à inversão de sinais da primavera para o verão, conforme indicado por Grimm et al. (2007) e Grimm e Zilli (2009), principalmente quando a análise é feita em período mais longo (1960-2014). Alguns modelos representam, tanto no clima presente como no futuro, os modos com forte variabilidade em CESA e mais fraca e de sinal contrário em SESA (modos “dipolo”), embora não sempre entre os primeiros modos de variabilidade e às vezes apenas na primavera ou apenas no verão. Estes modos dos modelos não representam tendência à inversão de sinal entre primavera e verão, pelo contrário, apresentam significativa tendência à persistência do sinal, o que já foi verificado em estudos anteriores.

Os modelos também foram analisados quanto à simulação do modo de variabilidade ENOS da TSM. A maioria dos modelos reproduziu o modo ENOS na primavera e no verão como o principal modo de variabilidade no clima presente (REOF1). Contudo, o padrão das anomalias de TSM deste modo nos modelos apresenta significativas diferenças em relação às observadas, principalmente quanto às anomalias de sinal contrário às anomalias mais fortes no Pacífico equatorial

central-leste. A maioria dos modelos simula estas anomalias muito fracas no Pacífico oeste e subtropical. O modelo que simula o ENOS mais realista é o CESM2, de acordo com a avaliação do desempenho dos modelos em simular o modo ENOS. Na média dos índices de desempenho, o CESM2 e o MPI-ESM1-2-HR empataram, mas o CESM2 foi o melhor quando foram considerados em conjunto a média dos índices e a regularidade de bom desempenho em cada um dos índices. Nessa avaliação, a média de conjunto dos modelos não se destacou, tendo o sétimo melhor desempenho. É interessante também destacar que não há muita correspondência entre os três primeiros modos de TSM de primavera e verão observados e simulados na média de conjunto dos modelos, a não ser o modo ENOS, que também apresenta diferenças. Portanto, nem sempre a média do conjunto é melhor do que a simulação de um modelo.

Ainda na esfera de análises das simulações históricas dos modelos (clima presente), foram calculados ciclos anuais de precipitação para regiões específicas da AS. Isso foi feito para verificar as diferenças entre a precipitação simulada e a observada ao longo do ano em escala regional, uma vez que os índices médios continentais usados nas avaliações podem não indicar desempenhos regionais. A média do conjunto de modelos e o melhor modelo na representação da climatologia frequentemente superestimam a precipitação de verão observada nas regiões de monção ou subestimam a precipitação de inverno em outras. No núcleo da monção, as diferenças entre os modelos de melhor e pior desempenho são muito pequenas na estação seca e maiores na estação de monção, entre outubro e março/abril. Não é possível dizer que nesta região a média de conjunto tem desempenho melhor que qualquer modelo em particular, nem em termos médios. O melhor modelo para a climatologia (IPSL-CM6A-LR) é melhor do que a média de conjunto em reproduzir o ciclo anual observado. A leste do núcleo da monção os modelos, além de terem comportamento parecido no inverno, também convergem mais na primavera do que no núcleo da monção mais a oeste. Por outro lado, divergem mais no verão (janeiro a março). No Sul do Brasil, o comportamento é diferente, com discrepância entre os modelos em todas as estações, exceto em partes do outono e primavera. Os modelos ainda mostram para o Sul do Brasil um ciclo de precipitação com características da precipitação de monção, subestimando a precipitação de inverno e superestimando a do final de primavera e a do verão. No Norte do Brasil, as maiores diferenças ocorrem

no verão e início de outono, e os modelos tendem a subestimar a precipitação de inverno.

A análise de climatologias de precipitação e circulação atmosférica também foi realizada utilizando resultados das projeções dos modelos nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Nesses cenários, os modelos mostram o aumento da precipitação na AS a partir do final da primavera, atingindo um pico nos meses do verão austral e decaindo até o inverno. Para a circulação, também simulam o fortalecimento do vento equatorial de nordeste e da baixa do Chaco no verão em baixos níveis. Em altos níveis, apresentam a circulação anticiclônica na região Amazônica na primavera e a Alta da Bolívia durante o verão austral. Os padrões de precipitação e circulação projetados pelos modelos para o futuro são bastante semelhantes aos simulados pelos mesmos no clima presente. Contudo, a intensidade da precipitação e a velocidade do vento mostram variações de um cenário para o outro dependendo da região.

A variabilidade interanual associada ao ENOS também foi estudada para os cenários futuros. No cenário mais otimista SSP2-4.5, todos os modelos, a média do conjunto de modelos e a média do conjunto de melhores modelos, simulam o modo ENOS de TSM como o primeiro modo rotacionado, apresentando o aquecimento do centro-leste do Pacífico equatorial em anos EN. No cenário mais pessimista SSP5-8.5, os modelos também fazem essa representação, porém, alguns não mostram o modo ENOS como o modo principal. Os modelos classificados como de melhor desempenho no clima presente também fazem boa representação do modo ENOS nos dois cenários futuros. Por outro lado, modelos com baixo desempenho também não representam bem ENOS no clima futuro, por exemplo, estendendo muito para oeste as anomalias equatoriais do Pacífico central-leste e mostrando anomalias de sinal contrário nos subtrópicos muito fracas.

Diferenças calculadas entre as climatologias projetadas no período futuro e simuladas para o clima presente mostraram algumas alterações na precipitação, geralmente mais intensas no cenário SSP5-8.5, embora a média do conjunto de modelos tenha mostrado poucas diferenças nos dois cenários. Para a região núcleo da monção (Centro-oeste do Brasil) e regiões de monção próximas, a média do *ensemble* projeta a diminuição da precipitação entre agosto e novembro e o aumento durante o verão austral, em comparação com o clima presente. Nas regiões um pouco mais a leste (centro-leste), esse padrão de diferenças também acontece, embora o

aumento da precipitação no início do ano seja maior nessas regiões situadas mais a leste, enquanto a diminuição na primavera também seja mais intensa. Para o Sul do Brasil, exceto nos meses de agosto e setembro, a média do conjunto projeta o aumento da precipitação, principalmente entre o final da primavera e início do verão. Nas regiões no leste e no oeste do Norte do Brasil, a média do conjunto projeta redução da precipitação em quase todos os meses, um pouco mais intensa no verão. As diferenças na circulação foram relativamente pequenas, de modo geral, e coerentes com as diferenças de precipitação.

Um resultado bastante relevante foi a projeção, nos cenários futuros, do aumento da TSM no Pacífico central leste equatorial em um padrão similar ao El Niño. Isso indica que até 2100 (especialmente se houver altas taxas de emissões de GEE), o clima do futuro teria, quanto às mudanças de TSM, mais semelhança com EN. Portanto, seria esperado que as anomalias associadas com EN tivessem relevância no clima futuro. Na realidade, a maioria das diferenças entre o clima projetado para o futuro e o clima presente simulado pelos modelos é qualitativamente semelhante a anomalias observadas durante eventos EN. Entre elas destacam-se a redução da precipitação no norte da AS (e Brasil), o aumento em SESA, principalmente na primavera e outono, pequena diminuição da precipitação na primavera e aumento da precipitação de verão nas regiões de monção, principalmente no centro-leste do Brasil (CESA).

Esse padrão é confirmado nas diferenças de precipitação entre os cenários futuros e o clima presente, apresentadas pelo CESM2, pela média do conjunto de modelos e pela média do conjunto de melhores modelos na simulação de ENOS.

As mudanças na precipitação provocadas pelo ENOS, entre o clima futuro e o presente também foram avaliadas. Embora a média do conjunto de modelos que simulam o ENOS no clima presente e a média do conjunto dos melhores modelos na simulação de ENOS não apresentem sinais muito claros destas mudanças, o modelo CESM2 mostra a intensificação das anomalias de precipitação produzidas pelo ENOS na primavera e, principalmente, no verão austral.

Muito ainda pode ser feito com base nos resultados aqui apresentados. Sugere-se para trabalhos futuros:

- Estudo das mudanças climáticas em termos de circulação atmosférica e convecção a nível global, para conectar as mudanças previstas na

América do Sul às mudanças globais que afetam circulações de monção;

- Estudo das teleconexões que afetam os impactos de El Niño sobre a América do Sul e como elas são afetadas por mudanças no estado básico da atmosfera;
- Estudo das alterações nos impactos de El Niño associados com estudos das alterações da circulação nestes eventos;
- Estudo de mudanças de fluxos de umidade e sua divergência;
- Representação gráfica mais eficiente, com junção de vários campos em um só mapa, como linhas de corrente, precipitação, pressão ao nível do mar, para analisar mais facilmente a conexão entre estes campos;
- Representação gráfica mais eficiente das mudanças climáticas, comparando diretamente as mudanças para cenários diferentes;
- Representação gráfica mais completa das alterações de circulação devidas às mudanças climáticas em 850 hPa e 200 hPa a nível global, dos componentes rotacional e divergente e outros campos interessantes para a análise.

REFERÊNCIAS

ALBRITTON, D. L. et al. Summary for policymakers. A report of Working Group I of the intergovernmental panel on climate change, 2001.

ALMAZROUI, M. et al. Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. **Earth Systems and Environment**, p. 1–29, 2021.

BERNSTEIN, L. et al. **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.

BLACKMAN, R. B.; TUKEY, J. W. The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering—Part I. **Bell System Technical Journal**, v. 37, n. 1, p. 185-282, 1958.

BOUCHER, O. et al. IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5195>. Acesso em: 26 set. 2021.

BOUCHER, O. et al. IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. **Earth System Grid Federation**, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5264>. Acesso em: 17 nov. 2021.

BOUCHER, O. et al. IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. **Earth System Grid Federation**, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5271>. Acesso em: 15 nov. 2021.

BYUN, Y.-H. et al. NIMS-KMA KACE1.0-G model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8378>. Acesso em: 02 dez. 2021.

BYUN, Y.-H. et al. NIMS-KMA KACE1.0-G model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. **Earth System Grid Federation**, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8435>. Acesso em: 02 dez. 2021.

BYUN, Y.-H. et al. NIMS-KMA KACE1.0-G model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. **Earth System Grid Federation**, 2019c. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8456>. Acesso em: 02 dez. 2021.

Carvalho, L. M. V., Grimm, A. M., Dominguez, F. The Monsoons of the Americas. **Global Energy and Water Exchanges Quarterly (GEWEX Quarterly)**, v. 30, n. 4, p. 11-14, 2020.

CHEN, Z. et al. Global land monsoon precipitation changes in CMIP6 projections. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 14, p. e2019GL086902, 2020.

DANABASOGLU, G. NCAR CESM2 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7627>. Acesso em: 15 jun. 2021.

DANABASOGLU, G. NCAR CESM2 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. **Earth System Grid Federation**, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7748>. Acesso em: 17 nov. 2021.

DANABASOGLU, G. NCAR CESM2 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585**. Earth System Grid Federation**, 2019c. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7768>. Acesso em: 16 nov. 2021.

DÍAZ, L. B.; SAURRAL, R. I.; VERA, C. S. Assessment of South America summer rainfall climatology and trends in a set of global climate models large ensembles. **International Journal of Climatology**, v. 41, p. E59-E77, 2021.

DÍAZ, L. B.; VERA, C. S. Austral summer precipitation interannual variability and trends over Southeastern South America in CMIP5 models. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 681-695, 2017.

DIRMEYER, P. A.; SHUKLA, J. Albedo as a modulator of climate response to tropical deforestation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 99, n. D10, p. 20863–20877, 1994.

EC-Earth. EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4706>. Acesso em: 11 jan. 2022.

EC-Earth. EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. **Earth System Grid Federation**, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4882>. Acesso em: 22 nov. 2021.

EC-Earth. EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. **Earth System Grid Federation**, 2019c. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4914>. Acesso em: 23 nov. 2021.

EYRING, V. et al. Human Influence on the Climate System. *In:* MASSON-DELMOTTE, V. et al. (Ed.) **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2021. p. 423–552.

EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 2016.

FU, R. et al. Increased dry-season length over southern Amazonia in recente decades and its implication for future climate projection. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 45, p. 18110-18115, 2013.

GAN, M. A.; RODRIGUES, L. R.; RAO, V. B. Monção na América do Sul. In: CAVALCANTI, I. F. A. et al (Orgs.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 19, p. 297–312.

GOOD, P. MOHC HadGEM3-GC31-LL model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. **Earth System Grid Federation**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10851>. Acesso em: 15 mar. 2022.

GOOD, P. MOHC HadGEM3-GC31-LL model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. **Earth System Grid Federation**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10901>. Acesso em: 15 mar. 2022.

GONZALEZ, P. L. M. et al. Stratospheric ozone depletion: a key driver of recent precipitation trends in South Eastern South America. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 7, p. 1775-1792, 2014.

GRIMM, A. M. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil?. **Climate Dynamics**, v. 22, n. 2, p. 123-138, 2004.

GRIMM, A. M. et al. Interdecadal variability and extreme precipitation events in South America during the monsoon season. **Climate Research**, v. 68, n. 2-3, p. 277–294, 2016.

GRIMM, A. M. et al. The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in southern Brazil. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 25, p. e48, 2020a.

GRIMM, A. M. et al. South and North American monsoons: characteristics, life cycle, variability, modelling and prediction. In: CHANG, C. P. et al. (Ed.). **The Multiscale Global Monsoon System**. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2020b. v. 11. cap. 5, p. 49–66.

GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 25, n. 4, p. 537–554, 2011.

GRIMM, A. M. South American Monsoon and its Extremes. In: VURUPUTUR, V. et al. (Ed.). **Tropical Extremes: Natural Variability and Trends**. Amsterdam: Elsevier, 2019a. p. 51–93.

GRIMM, A. M. Madden–Julian Oscillation impacts on South American summer monsoon season: precipitation anomalies, extreme events, teleconnections, and role in the MJO cycle. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 1, p. 907–932, 2019b.

GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, n. 2, p. 263–280, 2003.

GRIMM, A. M.; NATORI, A. A. Climate change and interannual variability of precipitation in South America. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 19, 2006.

GRIMM, A. M.; PAL, J. S.; GIORGI, F. Connection between spring conditions and peak summer monsoon rainfall in South America: Role of soil moisture, surface temperature, and topography in eastern Brazil. **Journal of Climate**, v. 20, n. 24, p. 5929–5945, 2007.

GRIMM, A. M.; SABOIA, J. P. J. Interdecadal variability of the South American precipitation in the monsoon season. **Journal of Climate**, v. 28, n. 2, p. 755–75, 2015.

GRIMM, A. M.; ZILLI, M. T.; CAVALCANTI, I. F. Do seasonal forecasts reproduce the link between early and peak monsoon rainfall in South America. **CLIVAR Exchanges**, v. 12, n. 4, p. 16-20, 2007.

GRIMM, A. M.; ZILLI, M. T. Interannual variability and seasonal evolution of summer monsoon rainfall in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 9, p. 2257–2275, 2009.

HOUGHTON, J. T. et al. (Ed.). **Climate Change 1995: The Science of Climate Change: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. v. 2.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **"Perguntas Frequentes"**. 2021. Disponível em: <http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=6>. Acesso em: 23 jul. 2021.

JOLLIFFE, T.; CADIMA, J. Principal component analysis: a review and recent developments. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 374, n. 2065, p. 20150202, 2016.

JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. Climate change in the South American monsoon system: present climate and CMIP5 projections. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6660-6678, 2013.

JUNGCLAUS, J. et al. MPI-M MPI-ESM1.2-HR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6594>. Acesso em: 27 mai. 2021.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, n. 3, p. 187-200, 1958.

KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 3, p. 437–472, 1996.

KAY, J. E. et al. The Community Earth System Model (CESM) large ensemble project: A community resource for studying climate change in the presence of internal climate variability. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 8, p. 1333-1349, 2015.

KITOH, A. et al. Monsoons in a changing world: A regional perspective in a global context. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 8, p. 3053–3065, 2013.

KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 3, n. 1, p. 217–231, 1988.

LEE, J.-Y.; WANG, B. Future change of global monsoon in the CMIP5. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 1-2, p. 101–119, 2014.

LI, Z. et al. Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. **Reviews of Geophysics**, v. 54, n. 4, p. 866–929, 2016.

LIEBMANN, B.; ALLURED, D. Daily precipitation grids for South America. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 86, n. 11, p. 1567-1570, 2005.

LIEBMANN, B.; MARENGO, J. A. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v. 14, n. 22, p. 4308–4318, 2001.

LIEBMANN, B.; MECHOSO, C. R. The South American monsoon system. *In*: CHANG, C.-P. et al. (Ed.). **The global monsoon system: research and forecast**. 2. ed. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2011. p. 137–157.

MARENGO, J. A. et al. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP–NCAR reanalyses: characteristics and temporal variability. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, p. 2261–2280, 2004.

MASSON-DELMOTTE, V. et al. Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press: IPCC, 2021.

MEEHL, G. A. et al. Overview of the coupled model intercomparison project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 86, n. 1, p. 89–93, 2005.

MEEHL, G. A. et al. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 88, n. 9, p. 1383–1394, 2007.

MITCHELL JR, J. M. et al. **Climatic change: Report of a working group of the Commission for Climatology**. **WMO Tech**. Note 79, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 1966.

MOON, S.; HA, K.-J. Future changes in monsoon duration and precipitation using CMIP6. **npj Climate and Atmospheric Science**, v. 3, n. 1, p. 1–7, 2020.

MORAN, J. M.; MORGAN, M. D. **Meteorology: the atmosphere and the science of weather**. Edina, Minnesota: Burgess Publishing, 1986.

O'NEILL, B. C. et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 9, p. 3461–3482, 2016.

ORTEGA, G. et al. Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, 2021.

PACHAURI, R. K. et al. **Climate change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.

PASCALE, S. et al. Projected changes of rainfall seasonality and dry spells in a high greenhouse gas emissions scenario. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 3, p. 1331-1350, 2016.

POLSON, D. et al. Decreased monsoon precipitation in the Northern Hemisphere due to anthropogenic aerosols. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 16, p. 6023–6029, 2014.

PÖRTNER, H.-O. et al. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: **Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press: IPCC, 2022.

RANASINGHE, R. et al. Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. *In:* MASSON-DELMOTTE, V. et al. (Ed.) **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2021. p. 1767–1926.

RAYNER, N. A. A. et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, n. D14, 2003.

RICHMAN, M. B. Rotation of principal components. **Journal of Climatology**, v. 6, n. 3, p. 293-335, 1986.

RIDLEY, J. et al. MOHC HadGEM3-GC31-LL model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6109>. Acesso em: 15 mar. 2022.

SABOIA, J. P. J. **Variabilidade interdecadal de precipitaçao na América do Sul**: característica, impactos e mecanismos. Orientadora: Alice M. Grimm. 2010. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SCHNEIDER, U. et al. GPCC full data monthly product version 2020 at 2.5°: monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on GTS-based and historical data. **Global Precipitation Climatology Centre at Deutscher Wetterdienst: Offenbach, Germany**, 2020.

SCHUPFNER, M. et al. DKRZ MPI-ESM1.2-HR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. **Earth System Grid Federation**, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4398>. Acesso em: 17 nov. 2021.

SCHUPFNER, M. et al. DKRZ MPI-ESM1.2-HR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. **Earth System Grid Federation**, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4403>. Acesso em: 12 nov. 2021.

SENA, A. C. T.; MAGNUSDOTTIR, G. Projected end-of-century changes in the South American Monsoon in the CESM Large Ensemble. **Journal of Climate**, v. 33, n. 18, p. 7859-7874, 2020.

SETH, A. et al. CMIP5 projected changes in the annual cycle of precipitation in monsoon regions. **Journal of Climate**, v. 26, n. 19, p. 7328–7351, 2013.

SHIOGAMA, H.; ABE, M.; TATEBE, H. MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. **Earth System Grid Federation**, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5746>. Acesso em: 05 jan. 2022.

SHIOGAMA, H.; ABE, M.; TATEBE, H. MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. **Earth System Grid Federation**, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5771>. Acesso em: 16 nov. 2021.

SHUKLA, P. R. et al. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: **Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press: IPCC, 2022.

SILVA, P. W. da. **Variabilidade climática em séries hidrológicas**: identificação, origens e contribuição a eventos extremos. Orientadora: Alice M. Grimm. 2018. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

SKANSI, M. M. et al. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 295–307, 2013.

STEGER, C. et al. DWD MPI-ESM1.2-HR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. **Earth System Grid Federation**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4479>. Acesso em: 12 nov. 2021.

SWART, N. C. et al. CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, 2019a. Disponível em: <http://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3610>. Acesso em: 30 mai. 2021.

SWART, N. C. et al. CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. **Earth System Grid Federation**, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3685>. Acesso em: 17 nov. 2021.

SWART, N. C. et al. CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. **Earth System Grid Federation**, 2019c. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3696>. Acesso em: 15 nov. 2021.

TATEBE, H.; WATANABE, M. MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5603>. Acesso em: 11 jul. 2021.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 4, p. 485–498, 2012.

VERA, C. S.; DÍAZ, L. Anthropogenic influence on summer precipitation trends over South America in CMIP5 models. **International Journal of Climatology**, v. 35, n. 10, p. 3172-3177, 2015.

VOLDOIRE, A. CMIP6 simulations of the CNRM-CERFACS based on CNRM-CM6-1 model for CMIP experiment historical. **Earth System Grid Federation**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4066>. Acesso em: 26 set. 2021.

VOLDOIRE, A. CNRM-CERFACS CNRM-CM6-1 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. **Earth System Grid Federation**, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4189>. Acesso em: 18 nov. 2021.

VOLDOIRE, A. CNRM-CERFACS CNRM-CM6-1 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. **Earth System Grid Federation**, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4224>. Acesso em: 15 nov. 2021.

WANG, B. et al. Monsoons climate change assessment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 102, n. 1, p. E1–E19, 2021.

WANG, B. et al. Northern Hemisphere summer monsoon intensified by mega-El Niño/southern oscillation and Atlantic multidecadal oscillation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 14, p. 5347–5352, 2013.

WANG, B. et al. Recent change of the global monsoon precipitation (1979–2008). **Climate Dynamics**, v. 39, n. 5, p. 1123–1135, 2012.

WANG, B.; DING, Q. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 6, 2006.

WANG, B.; DING, Q. Global monsoon: Dominant mode of annual variation in the tropics. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 44, n. 3-4, p. 165-183, 2008.

WANG, B.; JIN, C.; LIU, J. Understanding future change of global monsoons projected by CMIP6 models. **Journal of Climate**, v. 33, n. 15, p. 6471–6489, 2020.

WANG, C. et al. Impact of anthropogenic aerosols on Indian summer monsoon. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 21, 2009.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed.: Academic Press, 2006. v. 91.

YUKIMOTO, S. et al. MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6842>. Acesso em: 4 jan. 2022.

YUKIMOTO, S. et al. MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. **Earth System Grid Federation**, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6910>. Acesso em: 17 jan. 2022.

YUKIMOTO, S. et al. MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. **Earth System Grid Federation**, 2019c. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6929>. Acesso em: 17 jan. 2022.

ZHOU, J.; LAU, K. M. Does a monsoon climate exist over South America? **Journal of Climate**, v. 11, n. 5, p. 1020–1040, 1998.

ZIEHN, T. et al. CSIRO ACCESS-ESM1.5 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4272>. Acesso em: 27 dez. 2021.

ZIEHN, T. et al. CSIRO ACCESS-ESM1.5 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. **Earth System Grid Federation**, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4322>. Acesso em: 14 dez. 2021.

ZIEHN, T. et al. CSIRO ACCESS-ESM1.5 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. **Earth System Grid Federation**, 2019c. Disponível em: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4333>. Acesso em: 14 dez. 2021.

ANEXO 1 – TABELA DE REFERÊNCIAS CMIP6

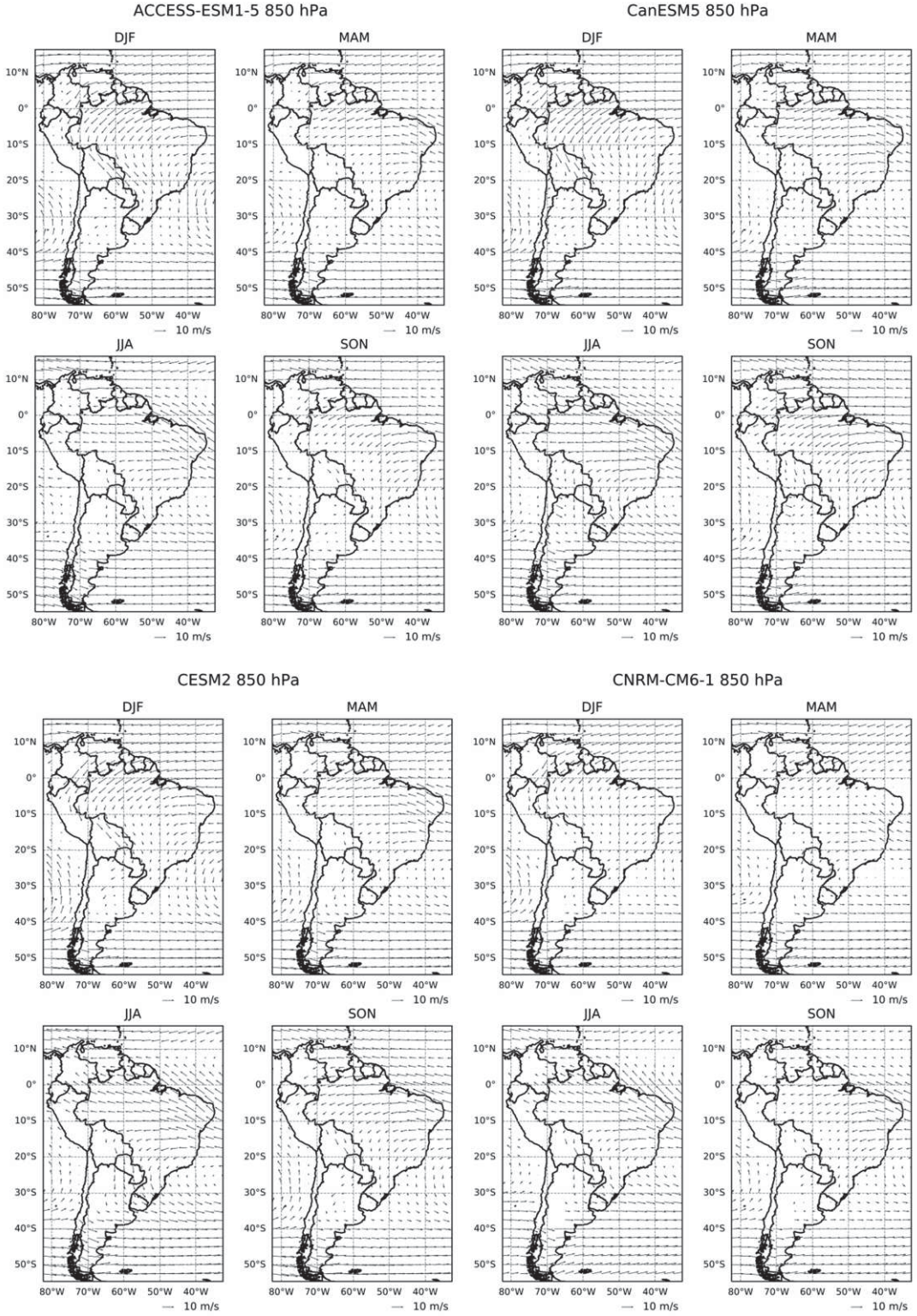
TABELA A1 – MODELOS UTILIZADOS DO CMIP6 E RESPECTIVAS REFERÊNCIAS

Modelo	***Variant Label***	**Referência (Histórico)**	**Referência (SSP2-4.5)**	**Referência (SSP5-8.5)**
ACCESS-ESM1-5	rNi1p1f1	(ZIEHN et al. , 2019a)	(ZIEHN et al. , 2019b)	(ZIEHN et al. , 2019c)
CanESM5	rNi1p1f1	(SWART et al., 2019a)	(SWART et al., 2019b)	(SWART et al., 2019c)
CESM2	rNi1p1f1	(DANABASOGLU, 2019a)	(DANABASOGLU, 2019b)	(DANABASOGLU, 2019c)
CNRM-CM6-1	rNi1p1f2	(VOLDOIRE, 2018a)	(VOLDOIRE, 2019a)	(VOLDOIRE, 2019b)
EC-Earth3-Veg	rNi1p1f1	(EC-EARTH, 2019a)	(EC-EARTH, 2019b)	(EC-EARTH, 2019c)
HadGEM3-GC31-LL	rNi1p1f3	(RIDLEY et al., 2019)	(GOOD, 2019)	(GOOD, 2020)
IPSL-CM6A-LR	rNi1p1f1	(BOUCHER et al., 2018)	(BOUCHER et al., 2019a)	(BOUCHER et al., 2019b)
KACE-1-0-G	rNi1p1f1	(BYUN et al., 2019a)	(BYUN et al., 2019b)	(BYUN et al., 2019c)
MIROC6	rNi1p1f1	(TATEBE; WATANABE, 2018)	(SHIOGAMA; ABE; TATEBE, 2019a)	(SHIOGAMA; ABE; TATEBE, 2019b)
MPI-ESM1-2-HR	rNi1p1f1	(JUNGCLAUS et al., 2019)	(SCHUPFNER et al., 2019a)	(SCHUPFNER et al., 2019b; STEGER et al., 2019)
MRI-ESM2-0	rNi1p1f1	(YUKIMOTO et al., 2019a)	(YUKIMOTO et al., 2019b)	(YUKIMOTO et al., 2019c)

FONTE: A autora (2022).
LEGENDA: Em *Variant Label*, 'N' refere-se à realização do experimento, distinguindo diferentes rodadas de um mesmo modelo.

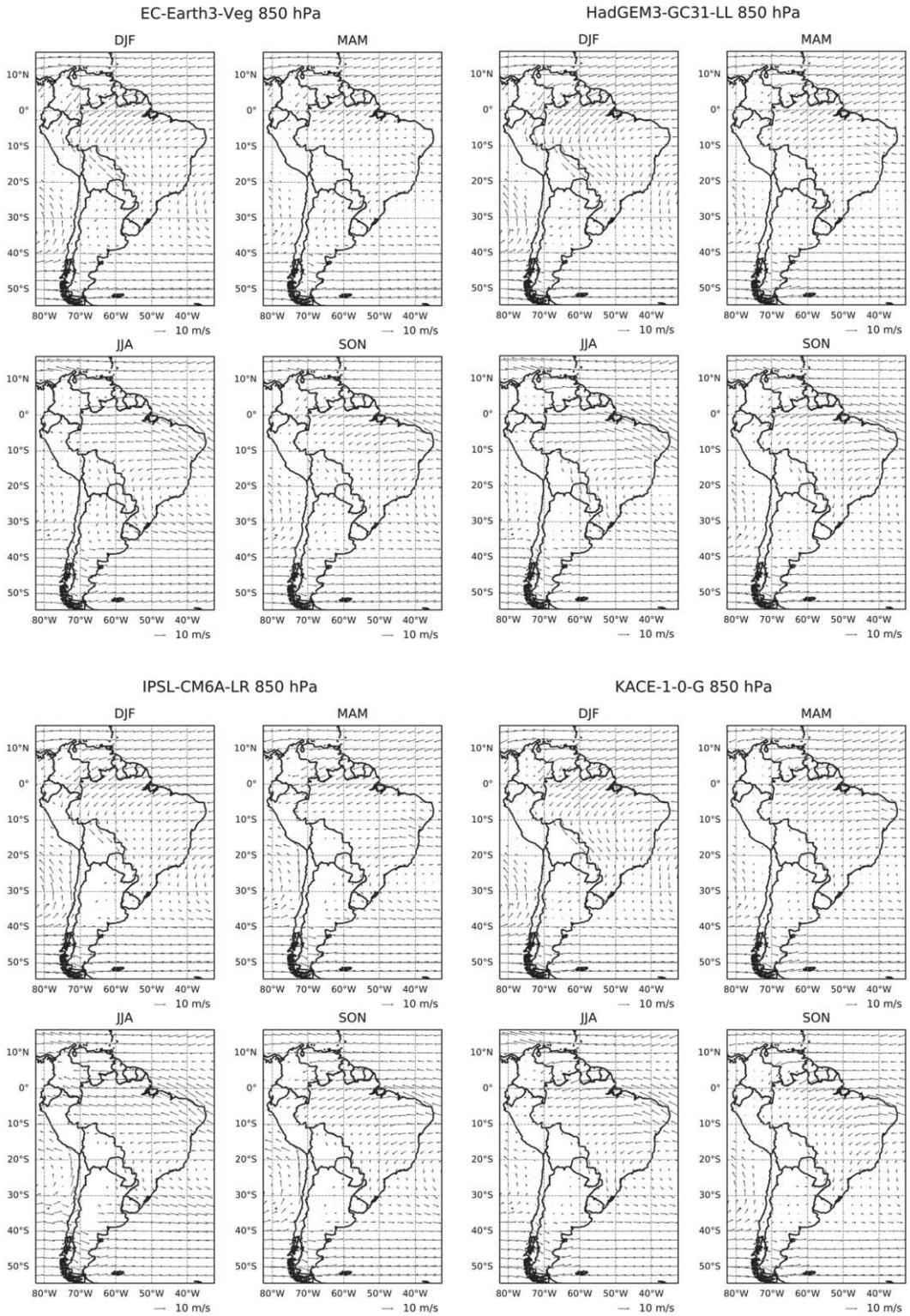
ANEXO 2 – CLIMATOLOGIAS DE CIRCULAÇÃO

FIGURA A1 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 850 HPA DOS MODELOS: ACCESS-ESM1-5, CANESM5, CESM2 E CNRM-CM6-1 (HISTÓRICO).



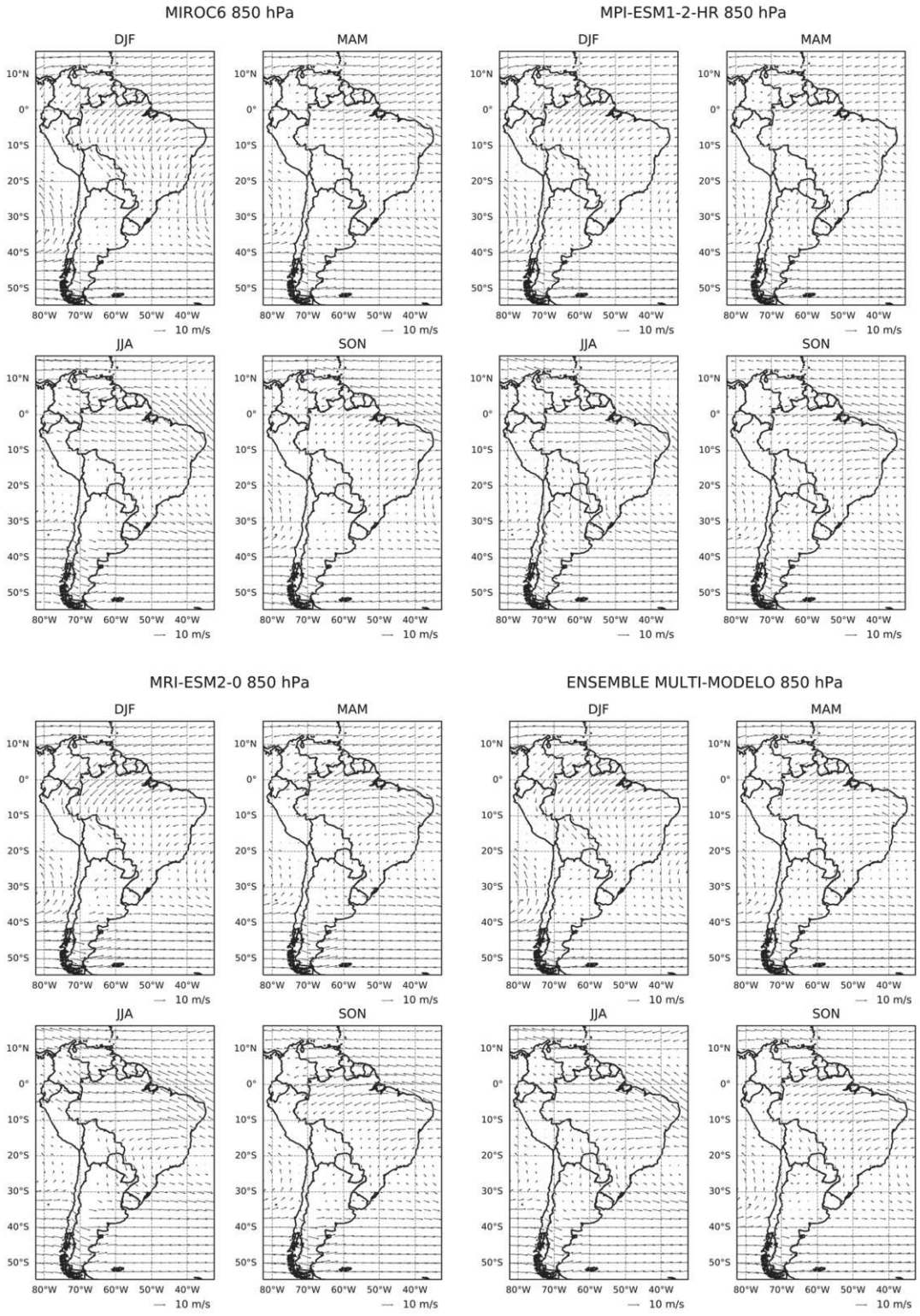
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A2 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 850 HPA PARA OS MODELOS: EC-EARTH3-VEG, HADGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR E KACE-1-0-G (HISTÓRICO).



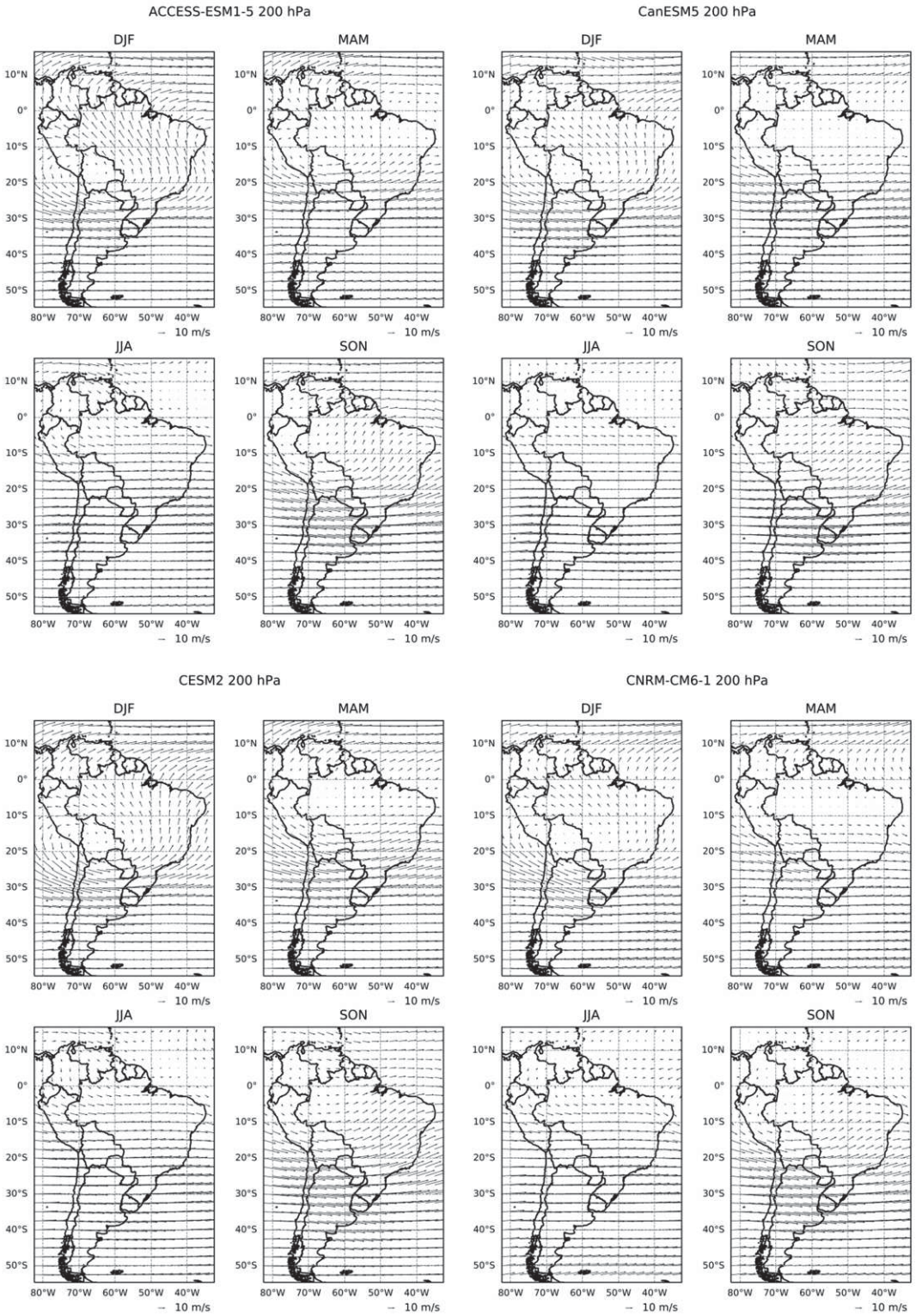
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A3 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 850 hPa PARA OS MODELOS: MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0 E MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS (HISTÓRICO).



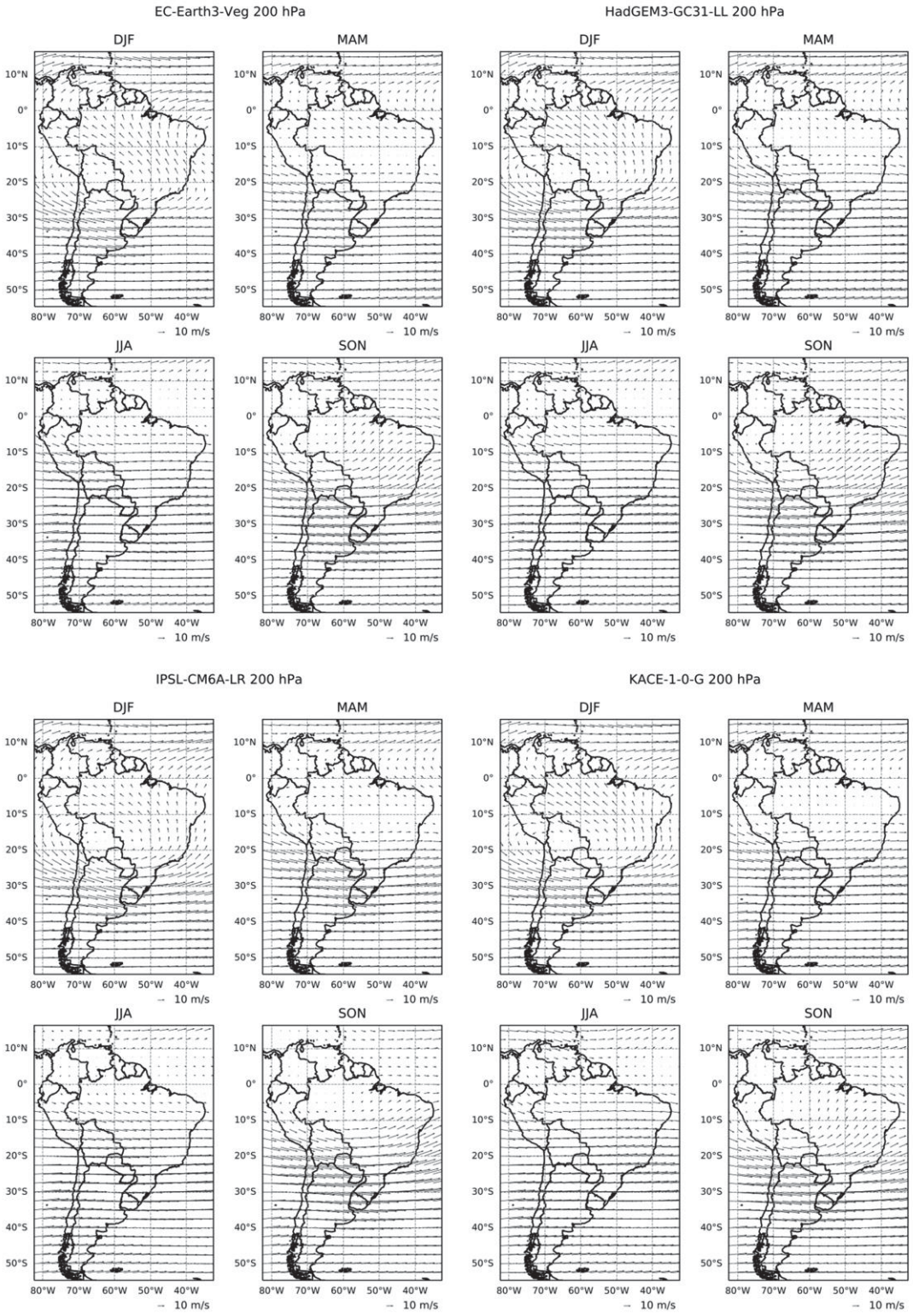
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A4 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 200 hPa PARA OS MODELOS: ACCESS-ESM1-5, CANESM5, CESM2 E CNRM-CM6-1 (HISTÓRICO).



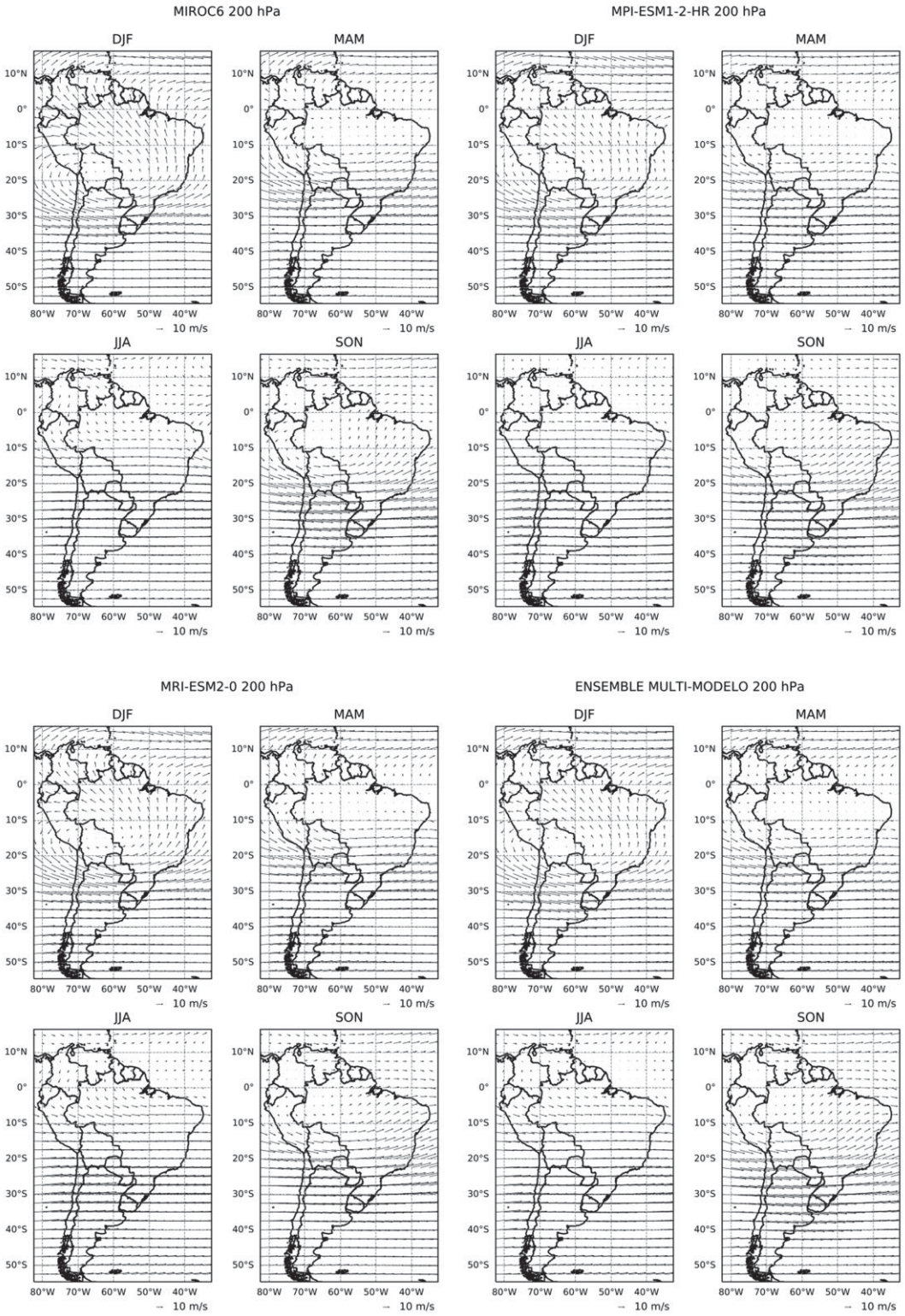
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A5 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 200 hPa PARA OS MODELOS: EC-EARTH3-VEG, HADGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR E KACE-1-0-G (HISTÓRICO).



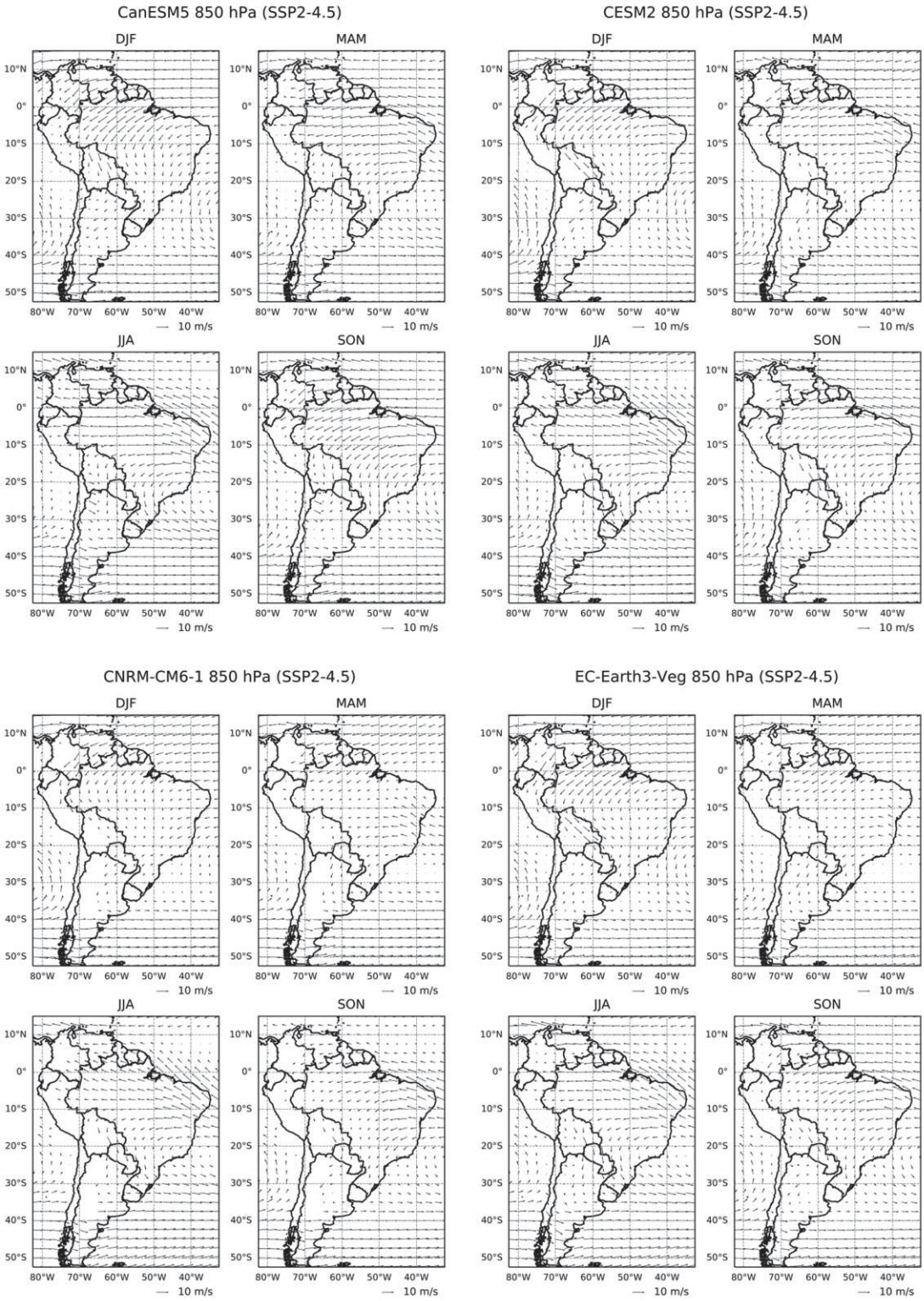
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A6 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 200 hPa PARA OS MODELOS: MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0 E MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS (HISTÓRICO).



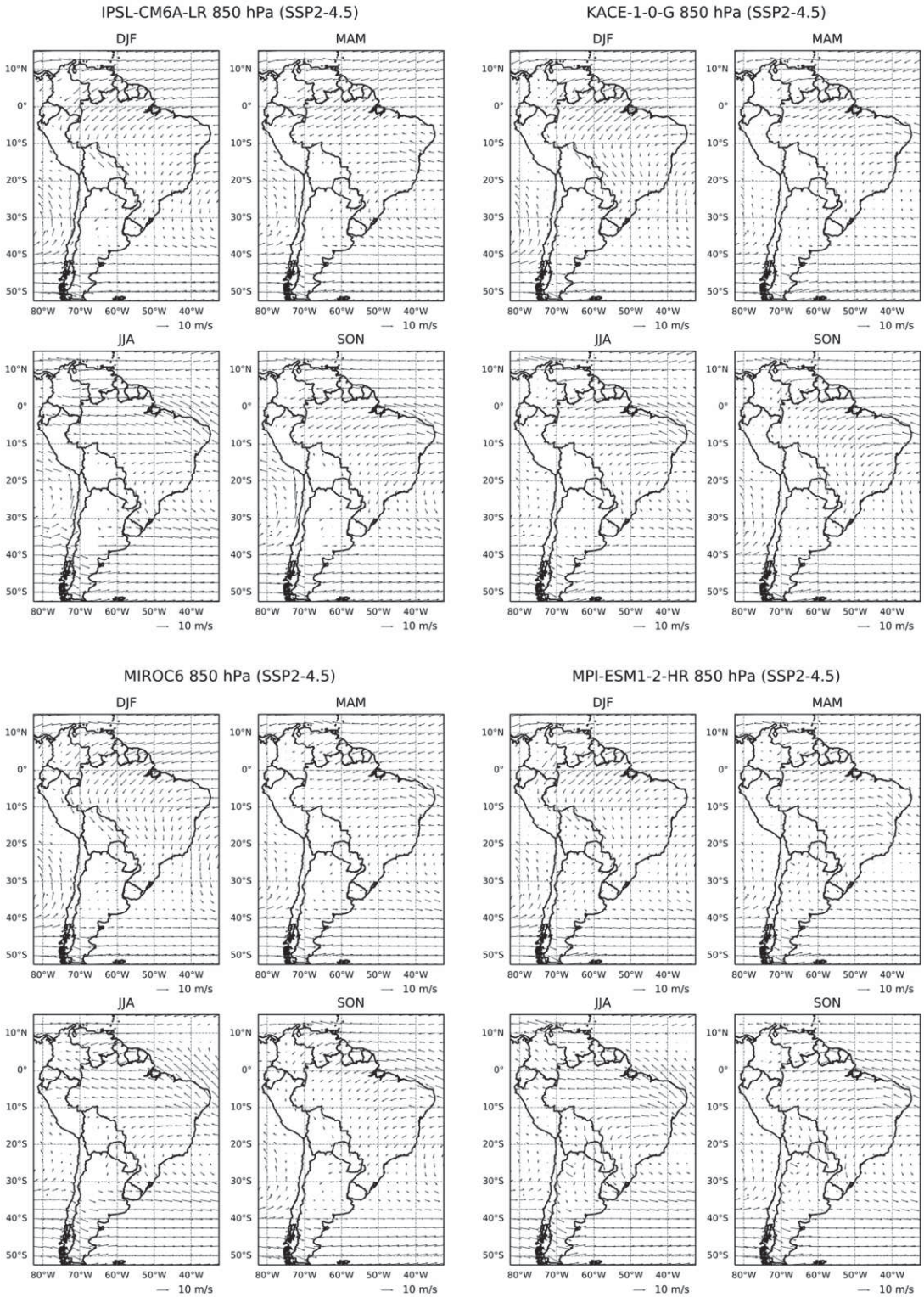
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A7 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 850 hPa PARA OS MODELOS: CANESM5, CESM2, CNRM-CM6-1 E EC-EARTH3-VEG (CENÁRIO SSP2-4.5).



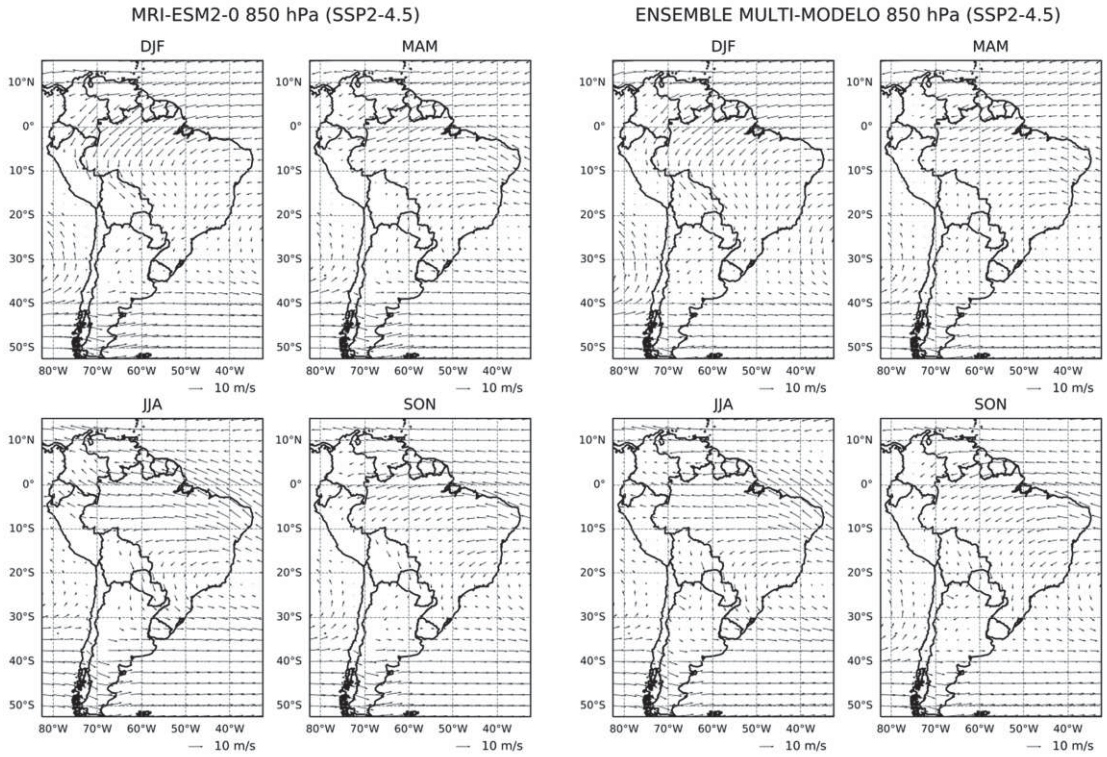
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A8 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 850 hPa PARA OS MODELOS: IPSL-CM6A-LR, KACE-1-0-G, MIROC6 E MPI-ESM1-2-HR (CENÁRIO SSP2-4.5).



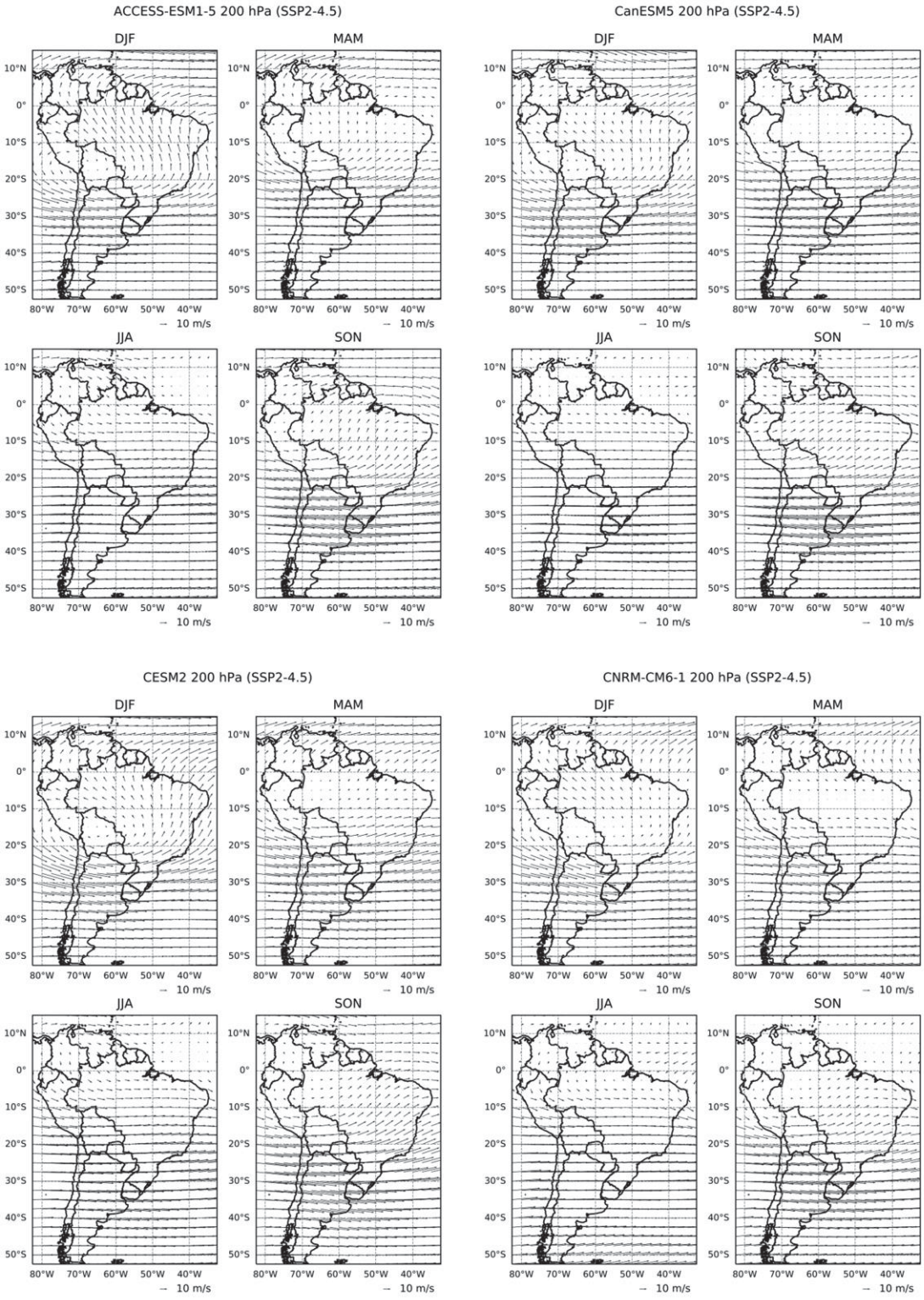
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A9 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 850 hPa PARA OS MODELOS: MRI-ESM2-0 E MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS (CENÁRIO SSP2-4.5).



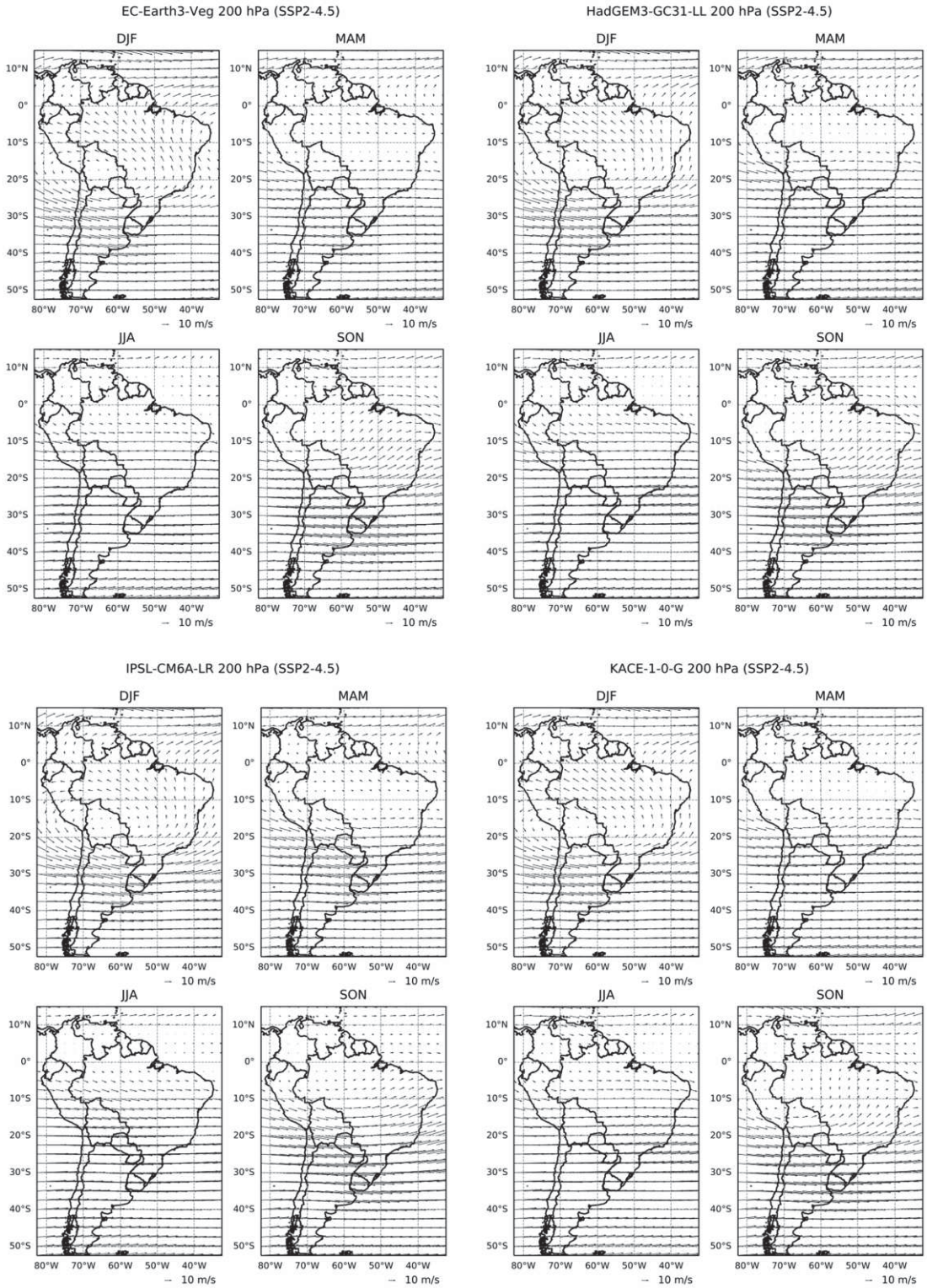
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A10 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 200 hPa PARA OS MODELOS: ACCESS-ESM1-5, CANESM5, CESM2 E CNRM-CM6-1 (CENÁRIO SSP2-4.5).



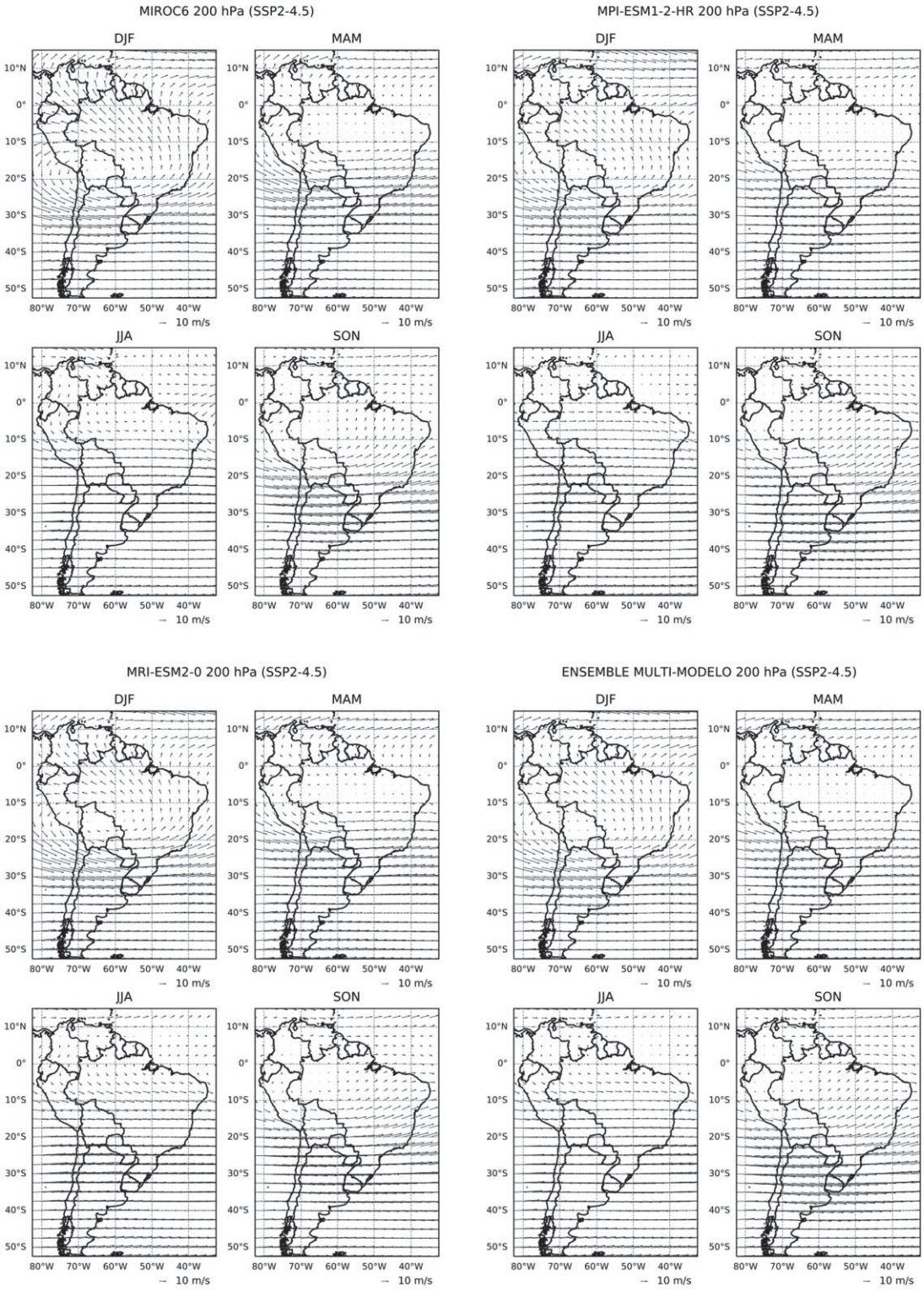
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A11 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 200 hPa PARA OS MODELOS: EC-EARTH3-VEG, HADGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR E KACE-1-0-G (CENÁRIO SSP2-4.5).



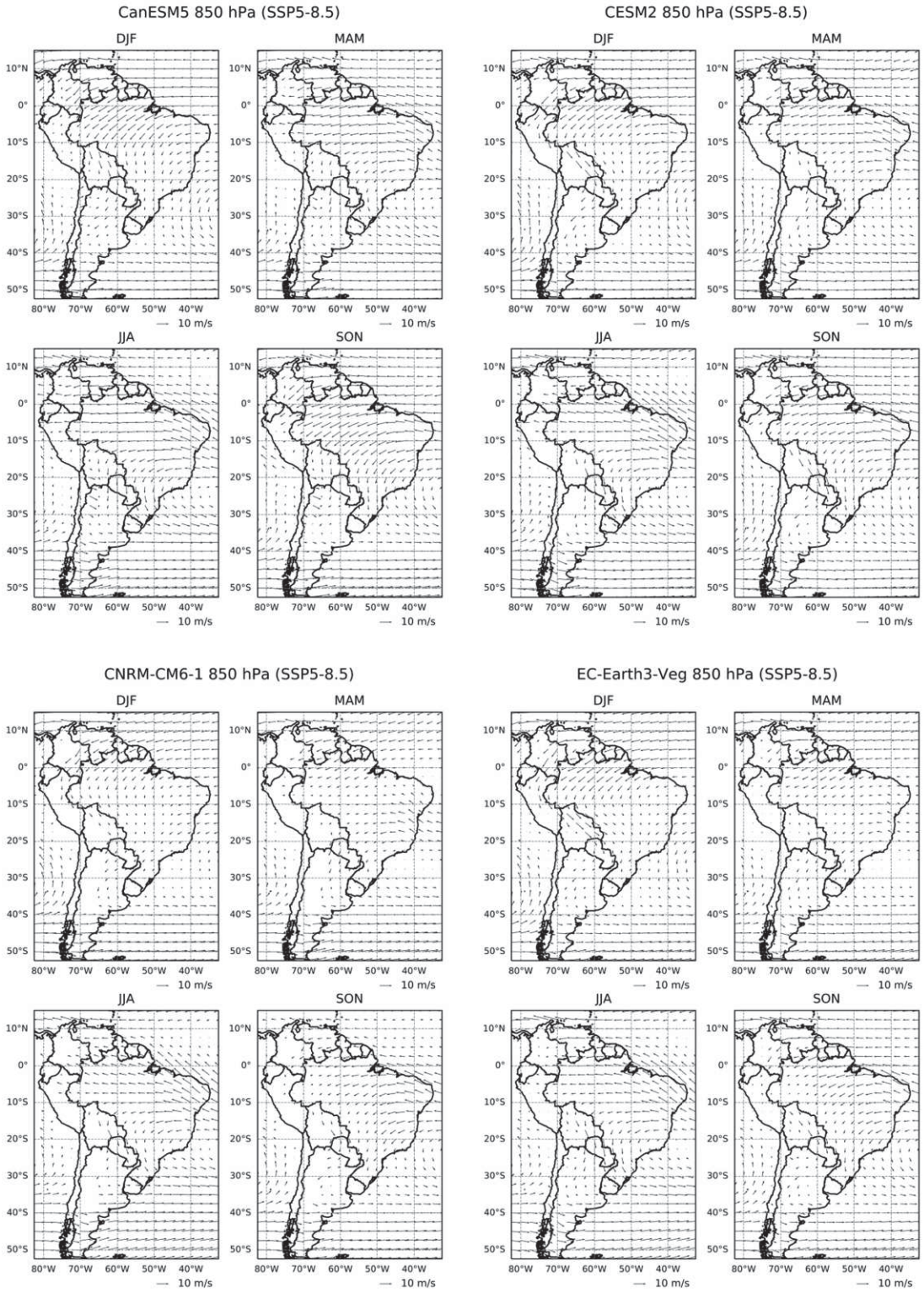
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A12 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 200 hPa PARA OS MODELOS: MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0 E MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS (CENÁRIO SSP2-4.5).



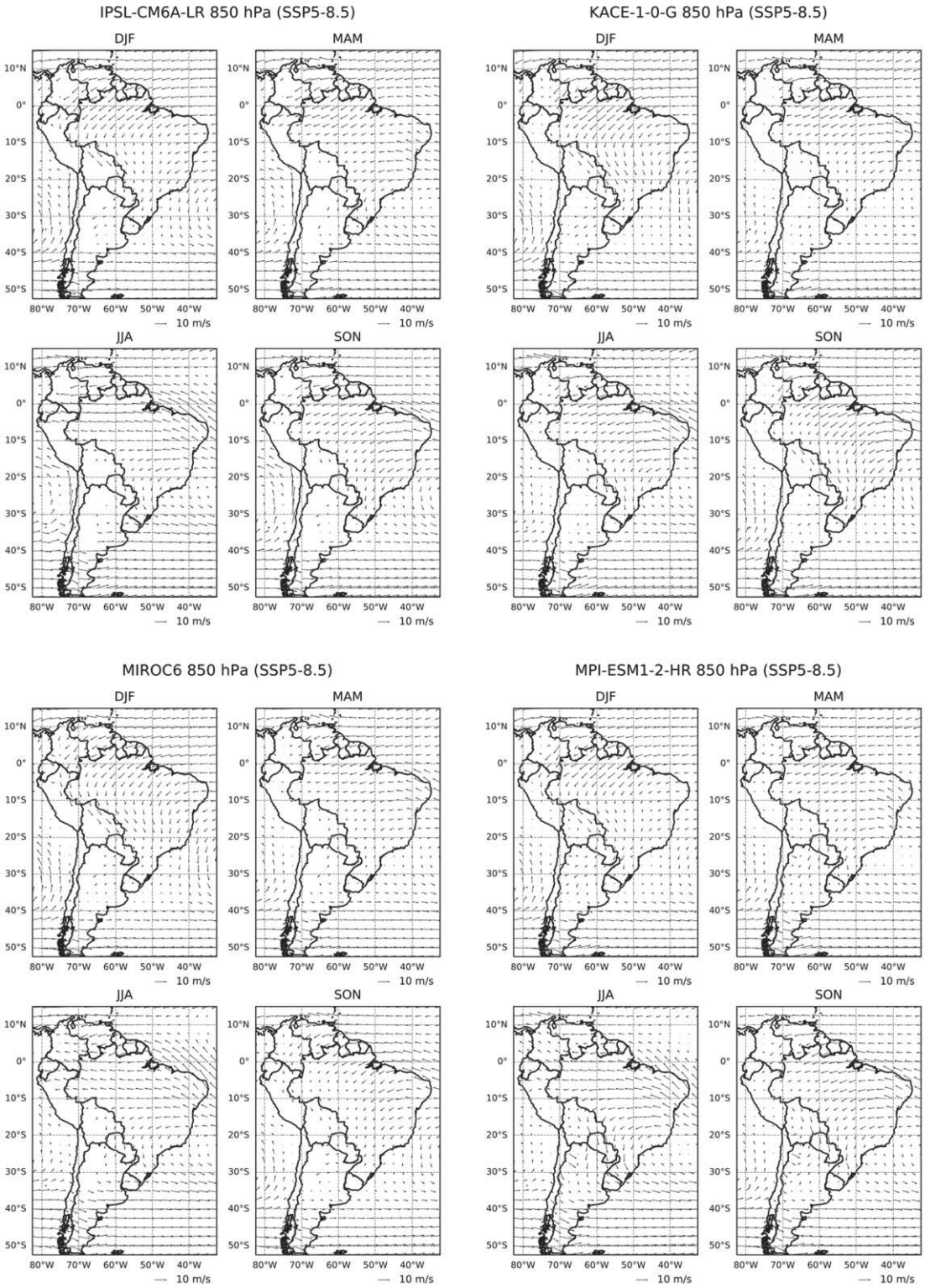
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A13 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 850 hPa PARA OS MODELOS: CANESM5, CESM2, CNRM-CM6-1 E EC-EARTH3-VEG (CENÁRIO SSP5-8.5).



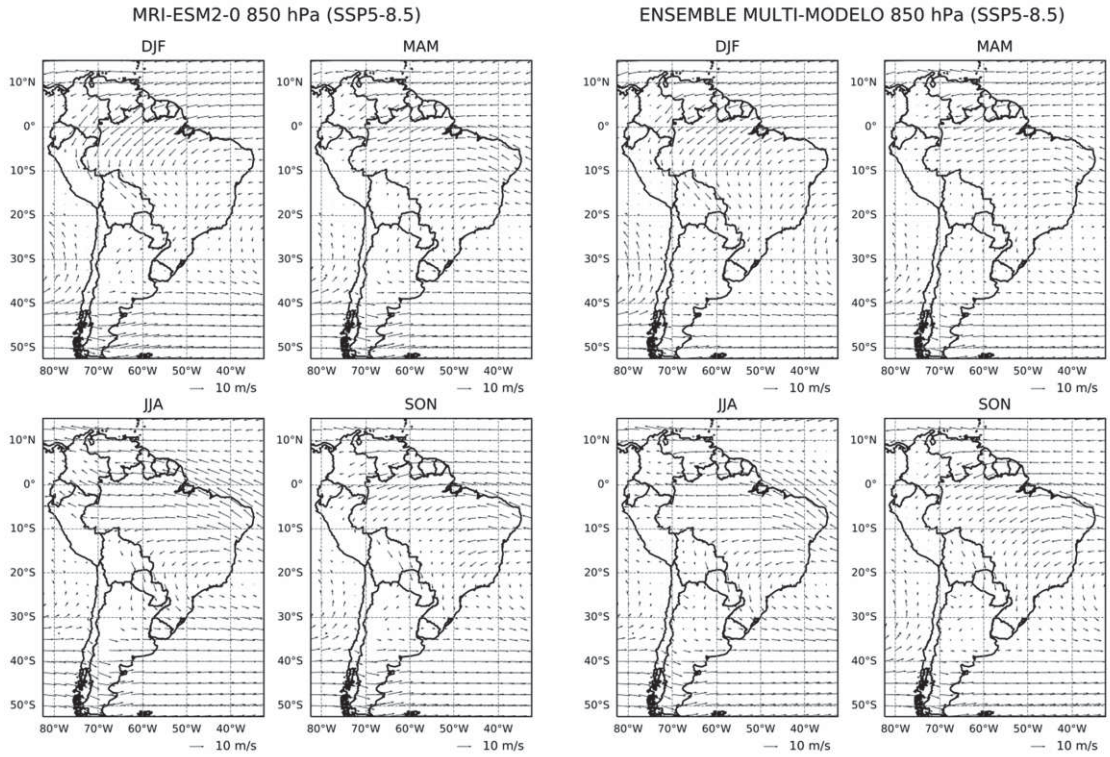
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A14 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 850 hPa PARA OS MODELOS: IPSL-CM6A-LR, KACE-1-0-G, MIROC6 E MPI-ESM1-2-HR (CENÁRIO SSP5-8.5).



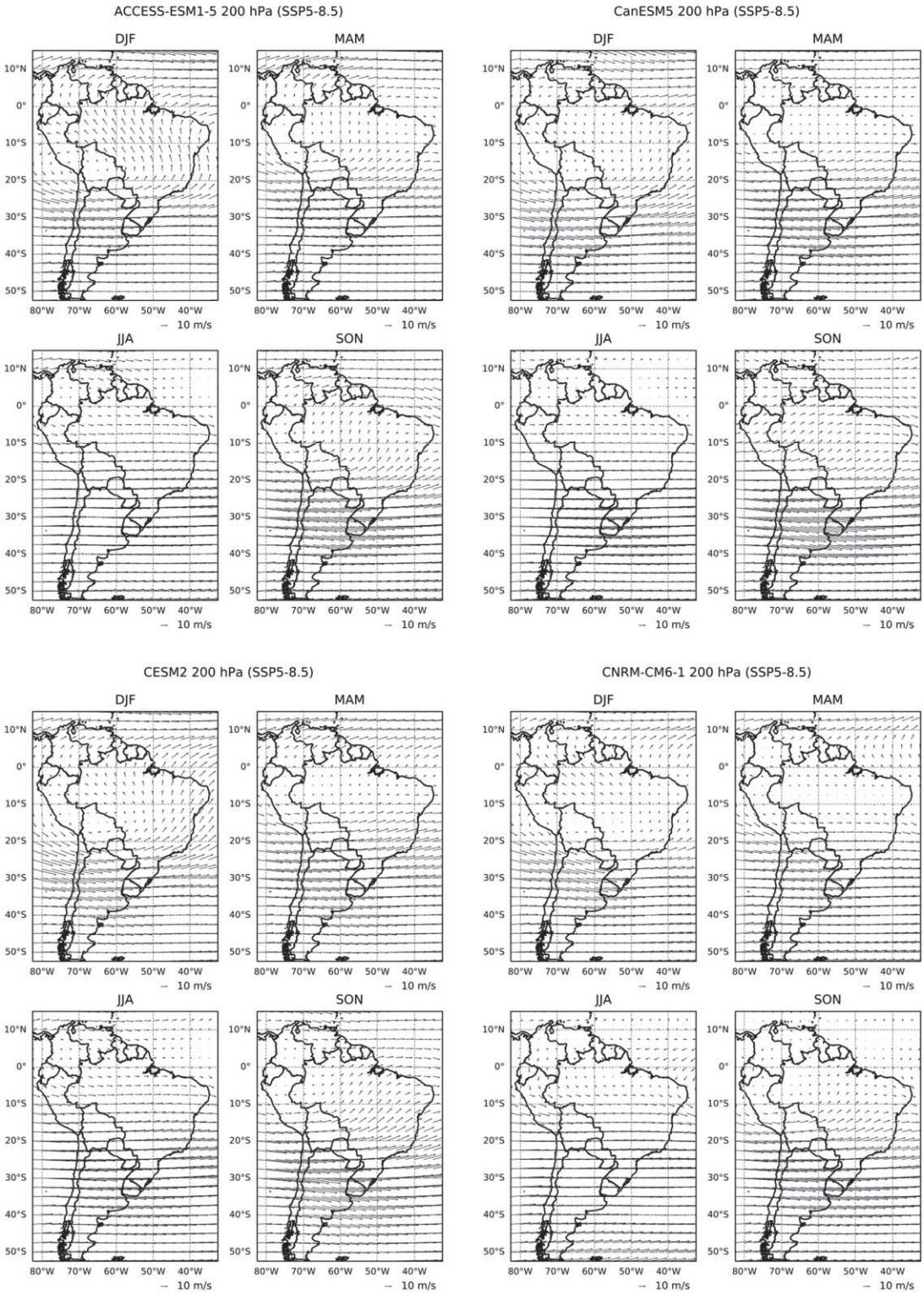
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A15 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 850 hPa PARA OS MODELOS: MRI-ESM2-0 E MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS (CENÁRIO SSP5-8.5).



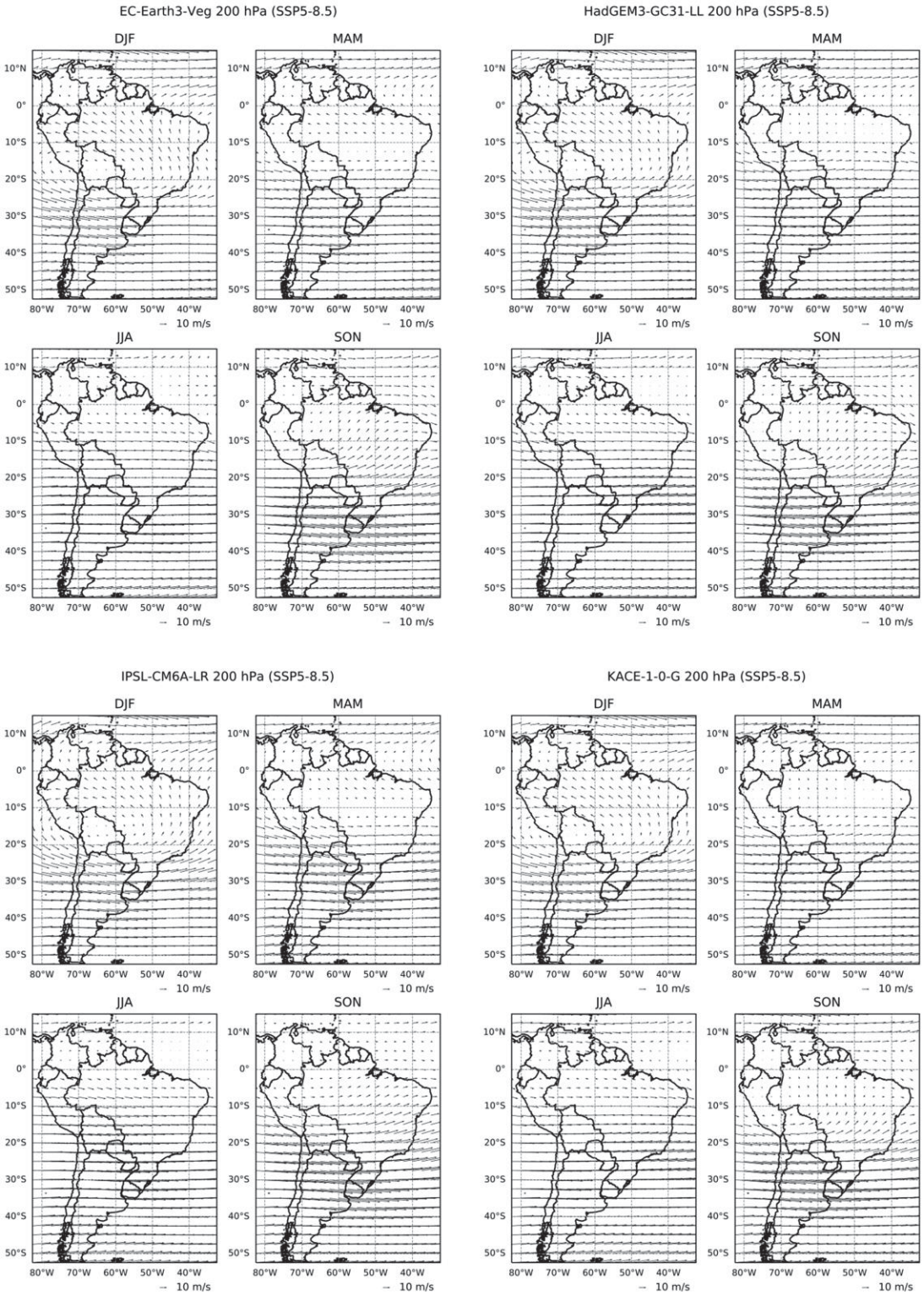
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A16 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 200 hPa PARA OS MODELOS: ACCESS-ESM1-5, CANESM5, CESM2 E CNRM-CM6-1 (CENÁRIO SSP5-8.5).



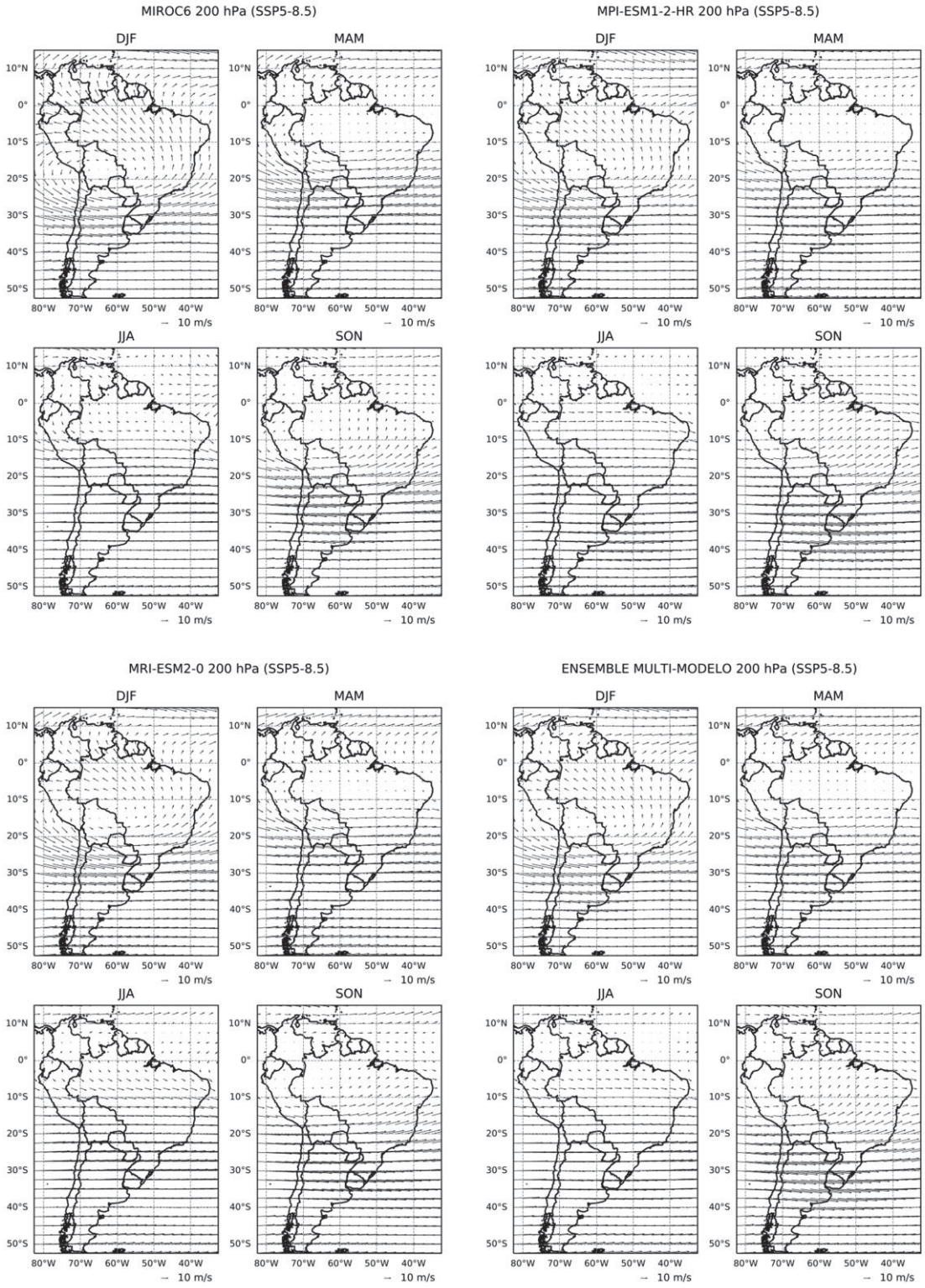
FONTE: A autora (2022).

FIGURA A17 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 200 hPa PARA OS MODELOS: EC-EARTH3-VEG, HADGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR E KACE-1-0-G (CENÁRIO SSP5-8.5).



FONTE: A autora (2022).

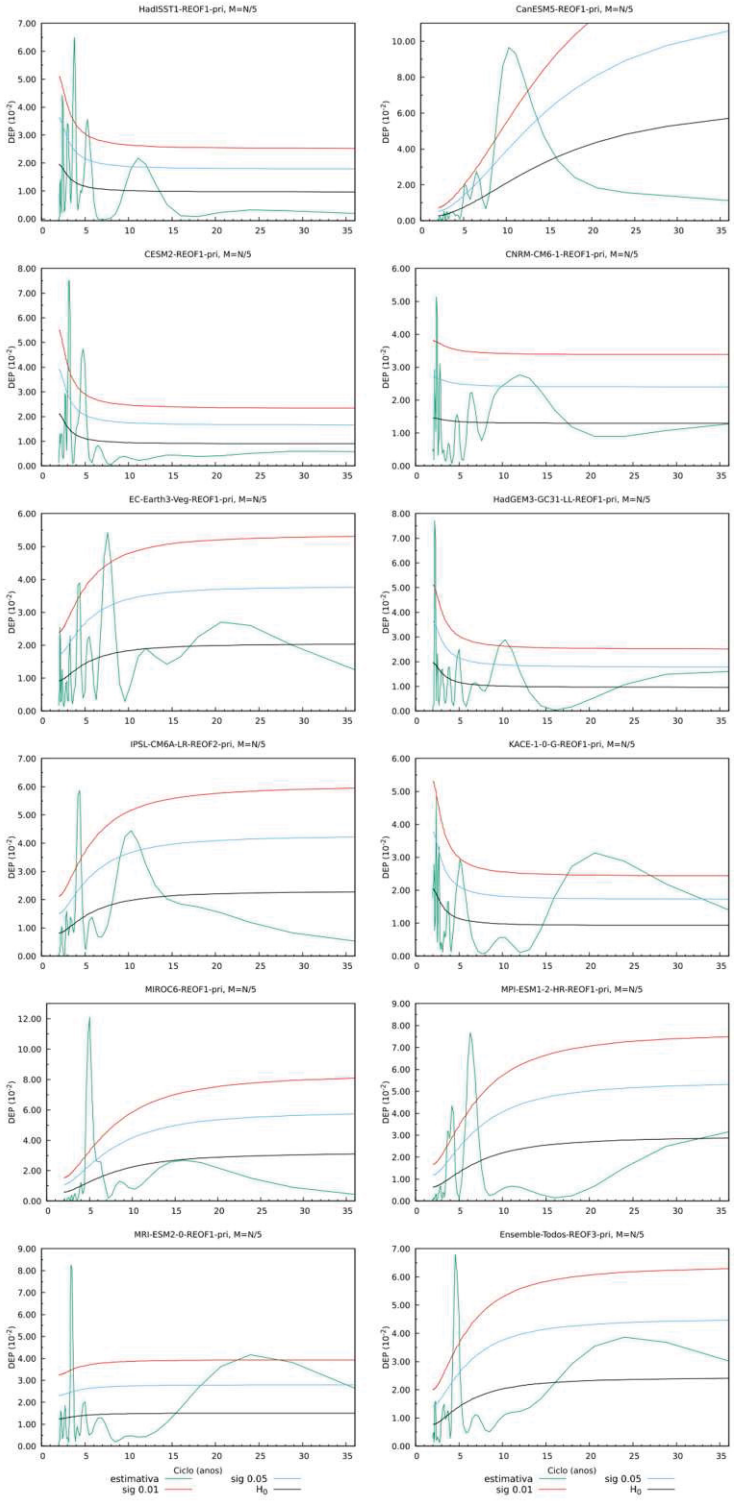
FIGURA A18 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DO VENTO EM 200 hPa PARA OS MODELOS: MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0 E MÉDIA DO CONJUNTO DE MODELOS (CENÁRIO SSP5-8.5).



FONTE: A autora (2022).

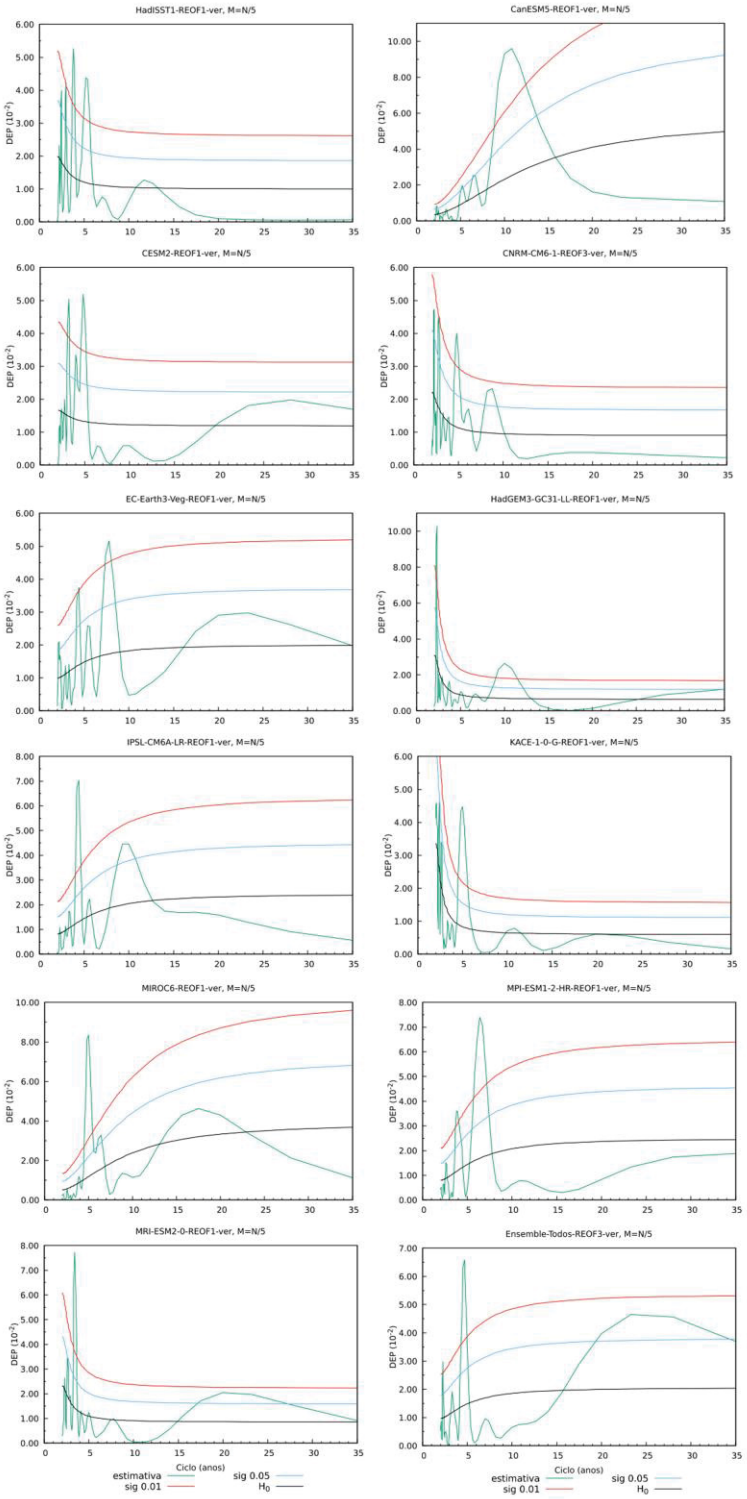
ANEXO 3 – FIGURAS ANÁLISE ESPECTRAL

FIGURA A19 – CURVAS DA DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA (DEP) EM FUNÇÃO DOS CICLOS APRESENTADOS POR CADA MODELO, DADOS OBSERVADOS (HADISST1) E MÉDIA DO *ENSEMBLE* DOS MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS DE TSM DA PRIMAVERA. A HIPÓTESE NULA É DE RUÍDO VERMELHO.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA A20 – CURVAS DA DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA (DEP) EM FUNÇÃO DOS CICLOS APRESENTADOS POR CADA MODELO, DADOS OBSERVADOS (HADISST1) E MÉDIA DO *ENSEMBLE* DOS MODELOS QUE SIMULARAM O MODO ENOS DE TSM DO VERÃO. A HIPÓTESE NULA É DE RUÍDO VERMELHO.



FONTE: A autora (2022).