

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

ANNA CAROLINA FERNANDES BAZZANELA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS CMIP6 NA REPRESENTAÇÃO DO  
CLIMA PRESENTE DA AMÉRICA DO SUL

RIO DE JANEIRO

2022

## AGRADECIMENTOS

As primeiras linhas deste parágrafo só poderiam ser dedicadas aos meus pais, Gelson e Fabiana, que investiram no sonho de uma menina de 9 anos que queria ser uma cientista. E também aos meus avós, Olir e Eny, por todo o esforço para tornar esse sonho realidade. Também agradeço ao meu amor Marcio, por todo carinho, paciência e cuidado, principalmente nesta reta final. É impossível mensurar a gratidão que sinto por toda dedicação e amor que recebi dessas cinco pessoas tão especiais que me guiaram com maestria até aqui.

Aos meus orientadores Claudine Dereczynski e Pedro Regoto, pela excelente orientação e por todo apoio e companheirismo; suas singularidades marcaram minha trajetória de forma única e especial. Por isso, agradeço profundamente a Claudine, que sempre me aconselhou e me orientou com muita ternura e paciência; e ao Pedro, que com seu jeito descontraído fez com que eu aprendesse a enfrentar as dificuldades e encarar novos desafios com mais ânimo e leveza. Meus sinceros agradecimentos a todos os professores do departamento de Meteorologia, em especial ao Wanderson e a Renata, que aceitaram a missão de compor essa banca juntamente com a Chou, a qual tenho profunda admiração.

Por último, e não menos importante, queria agradecer aos meus amigos, que são a segunda família que a vida me deu e sem eles esta trajetória teria sido muito mais difícil. Primeiramente, à Beatriz e ao Everson, com quem dividi muitas horas de estudo, além de choros e risadas durante todos esses anos. Meu imenso obrigado ao meu amigo Breno, que será minha eterna dupla de faculdade. Também sou grata à Catharine e à Liz, com as quais dividi momentos além dos muros da UFRJ e foram meus anjos da guarda ao longo desse período. Por fim, meus sinceros “muito obrigada” à todos aqueles que não mencionei nesse curto parágrafo, mas que também estiveram comigo em algum momento desta jornada.

*A verdade está lá fora.*

***Arquivo X***

## RESUMO

Avaliar o desempenho dos modelos climáticos globais no presente é fundamental para atribuir algum grau de confiabilidade acerca de suas projeções para o clima futuro. O objetivo deste trabalho é avaliar a habilidade de 28 modelos da “Sexta Fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados” (CMIP6) em representar o clima da América do Sul (AS) durante o período de referência (1995-2014). O objetivo é verificar se há melhorias entre os conjuntos de 10 modelos (Top10-CMIP6-AS) e/ou de 5 modelos (Top5-CMIP6-AS) pré-selecionados que melhor representem o clima da AS comparativamente ao conjunto dos 28 modelos CMIP6 (28-CMIP6). A verificação é feita inicialmente comparando-se subjetivamente as climatologias de verão e inverno simuladas por cada um dos 28 modelos CMIP6 com os dados provenientes do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) e da Reanálise *European Center for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis 5* (ERA5). Ademais, avalia-se objetivamente a performance de cada um dos 28 modelos através do uso de Diagramas de Taylor, utilizando as séries temporais mensais de precipitação (1980-2014) e de temperatura média do ar (1950-2014). O ciclo anual da precipitação dos conjuntos Top10-CMIP6-AS, Top5-CMIP6-AS e 28-CMIP6 também são confrontados com os dados do GPCP. Os resultados mostram que, nos baixos níveis, a maioria dos modelos exibe um bom desempenho para representar: os Anticiclones do Atlântico Sul e do Pacífico Sul; a Zona de Convergência Intertropical e a Zona de Convergência do Atlântico Sul, exceto, AWI-ESM-1-1-LR, BCC-ESM1 e IITM-ESM. Nos altos níveis, a maioria dos modelos superestima a magnitude dos Jatos Polar e Subtropical. A maioria dos modelos é capaz de representar adequadamente a posição da Alta da Bolívia e do Cavado do Nordeste Brasileiro, exceto AWI-ESM-1-1-LR, CAS-ESM2-0, CNRM-ESM2-1, FGOALS-f3-L, GISS-E2-1-G, IITM-ESM, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR-INCA, MPI-ESM-1-2-HAM e NESM3. No ciclo anual da precipitação, o conjunto Top10-CMIP6-AS, formado pelos modelos ACCESS-ESM1-5, CESM2, CMCC-ESM2, EC-EARTH3, FIO-ESM-2-0, KACE-1-0-G, MIROC6, MRI-ESM2-0, SAM0-UNICON e TaiESM1-0, apresenta um desempenho melhor em algumas regiões da AS quando comparado ao 28-CMIP6, sobretudo no norte da AS. O conjunto Top5-CMIP6-AS, apesar de não apresentar melhorias significativas em relação ao Top10-CMIP6-AS, apresenta um desempenho melhor comparado ao 28-CMIP6.

**Palavras-chave:** Modelos de Circulação Geral; Modelos do Sistema Terrestre; Climatologia; Variabilidade Climática

## ABSTRACT

Assessing the performance of global climate models in the present is essential to attribute confidence to their future projections. The aim of this work is to evaluate the ability of 28 "Sixth Phase of the Coupled Models Intercomparison Project" (CMIP6) models to represent the South American (SA) climate during the reference period (1995-2014). We expected that using the top 10 selected models which best represent the SA climate (CMIP6-SA), it will be possible to obtain better simulations, compared to CMIP6. The assessment is made by comparing the seasonal austral summer and winter climatologies simulated by the CMIP6 models to the Global Precipitation Climatology Project (GPCP) dataset and the European Center for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis 5 (ERA5) Reanalysis. Also, the performance of the 28 models was objectively evaluated through Taylor Diagrams, using their precipitation monthly time series (1980-2014) and temperature monthly time series (1950-2014). The Top10-CMIP6-AS precipitation annual cycle is also evaluated with respect to GPCP e the ensemble of all the 28 models used at this study. The results show that, at low levels, most models show a good performance to represent: the South Atlantic and South Pacific Subtropical Anticyclones; the Intertropical Convergence Zone (ICTZ) and the South Atlantic Convergence Zone, except for AWI-ESM-1-1-LR, BCC-ESM1 and IITM-ESM, which do not provide a good representation of these systems. At high levels, most models overestimate the magnitude of the Subtropical and Polar Jets. Most models are able to adequately represent the position of the Bolivian High and the Northeast Brazilian Trough, except AWI-ESM-1-1-LR, CAS-ESM2-0, CNRM-ESM2-1, FGOALS-f3-L, GISS-E2-1-G, IITM-ESM, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR-INCA, MPI-ESM-1-2-HAM e NESM3. About the precipitation annual cycle, the ensemble of the Top10-CMIP6-AS presents a better performance at some AR6 regions compare with the 28 models ensemble, especially over north of SA. Meanwhile, Top5-CMIP6-AS ensemble didn't show any improvements when compared to Top10, but it shows a better performance when compared with 28-CMIP6 ensemble.

**Keywords:** GCM; ESM; Climate Variability

## SUMÁRIO

Lista de Figuras .....	7
Lista de Tabelas .....	9
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	10
1. Introdução.....	11
2. Dados e Metodologia .....	13
2.1. Dados Observados.....	13
2.2. Modelos CMIP6 .....	14
2.3. Avaliação do Desempenho dos Modelos CMIP6 .....	18
3. Resultados .....	20
3.1. Climatologia Observada.....	20
3.2. Avaliação Subjetiva.....	27
3.2.1. Precipitação.....	27
3.2.2 Temperatura Média do Ar.....	35
3.2.3 Circulação em Altos e Baixos Níveis .....	38
3.2.4. Síntese da Avaliação Subjetiva.....	45
3.3 Avaliação Objetiva.....	45
3.3.1 NSA .....	48
3.3.2 NWS.....	48
3.3.3 NES.....	49
3.3.4 SAM.....	50
3.3.5 SES.....	51
3.3.6 SWS .....	51
3.3.7 SSA .....	52
3.3.8 Síntese da Avaliação Objetiva .....	53
3.4. Comparação dos conjuntos 28-CMIP6, Top10-CMIP6-AS e Top5-CMIP6-AS.....	53
4. Conclusões .....	61
5. Referências.....	65

## Lista de Figuras

- Figura 1 Regiões contempladas no Sixth Assessment Report (AR6) do IPCC. Os setores do Norte, Noroeste e Nordeste da AS, são representadas pelas siglas NSA, NWS e NES, respectivamente. O centro da AS (SAM) representa a região de atuação da Monção da AS. Por fim, o setor Sul, Sudoeste e Sudeste da AS correspondem as siglas SSA, SWS e SES, respectivamente..... 20
- Figura 2 Climatologias (1995-2014) sazonais de verão (a) e inverno (b) para a precipitação (mm/mês) referente ao GPCP. As isolinhas vermelhas representam a PNMM (hPa) do ERA..... 22
- Figura 3 Climatologias (1995-2014) sazonais de verão (a) e inverno (b) para a temperatura média do ar (°C) referente ao ERA5..... 24
- Figura 4 Climatologias (1995-2014) sazonais de verão (a, d) e inverno (b, d) para a linha de corrente e magnitude do vento (m/s) em baixos (a, b) e altos (c, d) níveis da atmosfera referente ao ERA5. .... 26
- Figura 5 Climatologias (1995-2014) da precipitação (mm/mês) e da PNMM (isóbaras a cada 2 hPa) referente ao verão austral (DJF) elaboradas a partir dos 28 modelos CMIP6..... 29
- Figura 6 Viés espacial da precipitação acumulada (mm/mês) considerando o período 1995-2014 para o verão (DJF) referente aos modelos CMIP6 em relação ao GPCP..... 30
- Figura 7 Climatologias (1995-2014) da precipitação (mm/mês) e da PNMM (isolinhas a cada 2 hPa) referentes ao inverno austral, elaboradas a partir dos 28 modelos CMIP6. .... 33
- Figura 8 Viés espacial da precipitação acumulada (mm/mês) considerando o período 1995-2014 para o inverno (JJA) referente aos modelos CMIP6 em relação ao GPCP..... 34
- Figura 9 Viés espacial da temperatura média do ar (°C) considerando o período 1995-2014 para o verão (DJF) referente aos modelos CMIP6 em relação ao ERA5..... 36
- Figura 10 Viés espacial da temperatura média do ar (°C) considerando o período 1995-2014 para o inverno (JJA) referente aos modelos CMIP6 em relação ao ERA5. .... 37
- Figura 11 Climatologia (1995-2014) dos campos de linha de corrente e magnitude (m/s) do vento em baixos níveis (850 hPa) referente ao verão austral, elaborada a partir dos 28 modelos CMIP6. .... 39
- Figura 12 Climatologias (1995-2014) dos campos de linha de corrente e magnitude (m/s) do vento em altos níveis (250 hPa) referente ao verão austral, elaboradas a partir dos 28 modelos CMIP6..... 41
- Figura 13 Climatologia (1995-2014) dos campos de linha de corrente e magnitude (m/s) do vento em baixos níveis (850 hPa) referente ao inverno austral, elaborada a partir dos 28 modelos CMIP6..... 43

Figura 14 Climatologias (1995-2014) dos campos de linha de corrente e magnitude (m/s) do vento em altos níveis (250 hPa) referente ao inverno austral, elaboradas a partir dos 28 modelos CMIP6. .... 44

Figura 15 Diagramas de Taylor para as sete regiões pertencentes ao AR6 na AS, elaborados a partir das séries temporais mensais de precipitação acumulada (1980-2014) dos 28 modelos CMIP6 e do GPCP. Nos eixos horizontal e vertical estão os valores dos desvios padrões (DPs) em mm/mês, também representado pelos arcos marcados em linha azul tracejada. A linha rosa sólida marca o desvio padrão da observação (GPCP). A linha radial tracejada preta representa os valores dos coeficientes de correlação temporal (CORR) e por fim, os semicírculos marcados pela linha verde sólida marcam os valores do REQM (em mm/mês). ..... 46

Figura 16 Diagramas de Taylor das sete regiões pertencentes ao AR6 elaborados a partir das séries temporais mensais da temperatura média do ar (1950-2014) dos 28 modelos CMIP6 e da reanálise ERA5. Os eixos horizontal e vertical representam os valores dos desvios padrões em °C/mês, também representado pelos arcos marcados em linha azul tracejada. A linha rosa sólida marca o desvio padrão do dado de referência (ERA5). A linha radial tracejada preta representa os valores dos coeficientes de correlação (CORR) e por fim, os semicírculos marcados pela linha verde sólida marcam os valores do REQM (em °C/mês). ..... 47

Figura 17 Climatologia da precipitação (mm/mês) durante o verão (painel superior) e inverno (painel inferior) austrais elaboradas a partir do GPCP e dos conjuntos 28-CMIP6, Top10-CMIP6-AS e Top5-CMIP6-AS. .... 55

Figura 18 Viés da precipitação (mm/mês) de verão (painel superior) e de inverno (painel inferior) para os conjuntos de modelos (28-CMIP6, Top10-CMIP6-AS e Top5-CMIP6) em relação ao GPCP. .... 56

Figura 19 Ciclo anual da precipitação para a observação (GPCP - linha rosa) e os conjuntos 28-CMIP6 (linha preta), Top10-CMIP6-AS (linha laranja) e Top5-CMIP6-AS (linha verde) calculado sobre o período 1980-2014 para as 7 regiões contempladas no AR6. .... 58

Figura 20 Ciclo anual da temperatura média do ar para o observado (ERA5 - linha rosa) e os conjuntos CMIP6 (linha preta), CMIP6-AS 5 (linha verde) e CMIP6-AS 10 (linha laranja) calculado sobre o período 1980-2014 para as 7 regiões contempladas no AR6. .... 60



## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 Modelos do CMIP6 avaliados nesse estudo e suas respectivas resoluções horizontais. .... 14

Tabela 2. Limiares estabelecidos por MUKAKA; MOULTON (2016) para classificação da correlação (CORR). ..... 20

## Lista de Abreviaturas e Siglas

AS	América do Sul
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico do Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
JBNAS	Jatos de Baixos Níveis da América do Sul
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
PNMM	Pressão Atmosférica ao Nível Médio do Mar
ASPS	Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul
AB	Alta da Bolívia
CNEB	Cavado do Nordeste do Brasil
JS	Jato Subtropical
JP	Jato Polar
CORR	Correlação
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
DP	Desvio Padrão
DJF	Dezembro, Janeiro e Fevereiro
JJA	Junho, Julho e Agosto

## 1. Introdução

As mudanças climáticas já são uma realidade em diversas regiões do globo, sobretudo na América do Sul (AS). Estudos recentes já sinalizam que o continente vem passando por alterações nos padrões de temperatura e precipitação (DERECZYNSKI *et al.*, 2020; LANGERWISCH *et al.*, 2013; PABÓN-CAICEDO *et al.*, 2020; REGOTO *et al.*, 2021). Além disso, diversas pesquisas apontam para um aumento na frequência e na intensidade de eventos extremos, como ondas de calor, chuvas intensas e secas prolongadas (LEMES; REBOITA; TORRES, 2020; ZUBIETA *et al.*, 2021). Tais modificações nas características climáticas estão relacionadas à mudanças nos sistemas atmosféricos que atuam na AS. ZILLI; CARVALHO; LINTNER (2018) mostraram que, devido à intensificação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) parece estar se deslocando para latitudes mais altas em relação ao seu posicionamento médio. Isso afeta, conseqüentemente, no fortalecimento do transporte de umidade do norte da Amazônia ao sul/sudeste da América do Sul, resultando na redução da precipitação no setor equatorial da ZCAS. Nesse contexto, a utilização de simulações numéricas de modelos climáticos são de extrema importância para posteriores pesquisas acerca do clima futuro, sobretudo quanto a representação dos padrões climatológicos e suas alterações no clima presente.

Desde 1995, o Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project – CMIP) tem organizado experimentos de modelos climáticos envolvendo grupos de modelagem climática internacional. Isso tem levado a um melhor entendimento do clima passado, presente e futuro. Os experimentos do CMIP têm sido a base para os relatórios de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC). Atualmente, o projeto CMIP se encontra em sua Sexta Fase (The Sixth Phase of the Coupled Model Intercomparison Project – CMIP6; O’NEILL *et al.*, 2016), tendo sido utilizado no sexto relatório de avaliação do IPCC (2021). Os estudos de ARIAS *et al.*, (2021), DIAS; REBOITA, (2021), ORTEGA *et al.*, (2021b) destacam as melhorias dos modelos numéricos que integram o CMIP6 em relação à versão anterior (CMIP5; TAYLOR *et al.*, 2012), como a representação da precipitação na região tropical da AS.

Estudos recentes constataram que os modelos CMIP6 são capazes de capturar diversos padrões espaciais de temperatura e precipitação sobre a região continental, no entanto, a representação de algumas características climáticas da AS continua sendo um desafio. A simulação da magnitude da precipitação e temperatura ainda apresenta erros sistemáticos sobre a região continental e oceanos adjacentes. Os modelos também não são capazes de representar corretamente fenômenos de mesoescala, tais como os padrões de circulação a leste dos Andes (PABÓN-CAICEDO *et al.*, 2020). Em ALMAZROUI *et al.*, (2021), foi avaliado a performance do conjunto de 38 modelos CMIP6 sobre o clima presente da AS, contrapondo as saídas de precipitação e temperatura dos modelos com o observado. Os autores observaram que os modelos apresentam uma grande dificuldade em simular os totais pluviométricos sobre regiões com heterogeneidade topográfica, além de apresentarem um viés seco sobre o norte da Amazônia. No trabalho de DIAS, REBOITA, (2021), o desempenho individual de 46 modelos CMIP6 foi avaliado para o clima presente da AS Tropical utilizando o índice de concordância Willmott, que mede o grau de erro da previsão do modelo. As autoras selecionaram sete modelos (E3SM-1-0, EC-Earth3, EC-Earth3-AerChem, EC-Earth3-Veg, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-LR e TaiESM1) que se destacaram positivamente. Em comparação ao conjunto total dos modelos, as autoras observaram uma redução do viés da precipitação e temperatura média do ar em alguns setores da AS. No entanto, até o momento, não se tem conhecimento de estudos que avaliem espacialmente o desempenho de cada um dos modelos CMIP6 individualmente, a fim de verificar se são capazes de reproduzir os principais sistemas climatológicos e os padrões de circulação atmosférica que modulam o clima da AS.

Neste contexto, tendo em vista a grande utilidade dos modelos CMIP6 e sua importância nas projeções do clima futuro, o objetivo deste estudo é avaliar a performance dos modelos em representar o clima presente (1995-2014) sobre a AS. A expectativa é que a boa performance dos modelos no clima atual poderá conferir algum grau de confiabilidade às suas projeções em cenários de mudanças climáticas. O objetivo principal deste trabalho é verificar se os modelos CMIP6 são capazes de reproduzir individualmente as características espaço-temporais do clima presente da AS. Como objetivos específicos destaca-se a seleção dos conjuntos de dez (Top10-CMIP6-AS) e de cinco (Top5-CMIP6-AS) dentre os 28 modelos CMIP6 (28-CMIP6) avaliados, com melhor desempenho sobre o continente sul americano. Ademais, objetiva-se descobrir se o uso dos conjuntos Top10-CMIP6-AS ou Top5-CMIP6-AS é mais vantajoso do que o 28-CMIP6.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: após esta introdução, são apresentados no Capítulo 2 os 28 modelos CMIP6 analisados e a metodologia empregada na avaliação da performance de tais modelos. O Capítulo 3 apresenta os resultados divididos em quatro etapas: i) climatologia da AS a partir dos dados observados utilizados (ERA5 e GPCP); ii) avaliação subjetiva, realizada através da comparação dos campos climatológicos sazonais de algumas variáveis dos modelos CMIP6 com a base de dados observacional; iii) avaliação objetiva, realizada através da comparação das séries temporais de precipitação e de temperatura do ar de cada um dos modelos CMIP6 com os dados observacionais através de Diagramas de Taylor e iv) comparação dos ciclos anuais da precipitação e da temperatura do ar dos conjuntos selecionados 28-CMIP6, Top10-CMIP6-AS e Top5-CMIP6-AS com os dados observacionais. Por fim, são apresentadas no Capítulo 4 as conclusões e considerações finais.

## **2. Dados e Metodologia**

### **2.1. Dados Observados**

O Global Precipitation Climatology Project (GPCP) (ADLER *et al.*, 2003) e o European Centre for Medium Range Weather Forecast ReAnalysis 5 (ECMWF-ERA5) (HERSBACH *et al.*, 2020) foram as duas bases de dado utilizadas como referência para avaliar a performance dos modelos CMIP6.

O GPCP foi desenvolvido em 1998 pelo World Climate Research Program (WRCP) com a finalidade de fornecer estimativas mensais de precipitação para todo o globo a partir da integração de dados de estações pluviométricas, sondagens e satélite. Os dados utilizados do GPCP compreendem o período 1980-2014 com resolução espacial de  $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ .

A ERA5 é a quinta geração de reanálise global produzida pelo ECMWF, após o *First Global Experiment of the Global Atmospheric Research Programme* (FGGE), a ERA-15, a ERA-40 e a ERA-Interim. As saídas da reanálise ERA5 compreendem o período 1950-2014 com resolução espacial de  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ . As variáveis utilizadas foram: (i) pressão atmosférica ao nível médio do mar (PNMM); (ii) temperatura média do ar; (iii) vento nos baixos níveis (850 hPa) e altos níveis (250 hPa) da troposfera. Os dados de precipitação da Reanálise ERA5 não foram usados pois, de acordo com KALNAY *et al.*, (1996) dados de precipitação gerados por reanálises, são considerados de baixa qualidade (classe C), já que nenhuma observação afeta

essa variável, sendo derivada somente a partir dos campos do modelo forçados pela assimilação de dados.

A utilização das reanálises para avaliação de modelos climáticos tem se tornado cada vez mais difundida em diversos trabalhos. Essa ampla utilização da reanálise se deve a boa cobertura espacial de dados globais em diversas escalas temporais como resultado do seu sistema de assimilação de dados que mistura informações de modelagem com observações. A ERA5 tem sido amplamente utilizada para avaliar a performance de modelos climáticos (COLLAZO *et al.*, 2022; KIM *et al.*, 2020).

## **2.2. Modelos CMIP6**

Desde 1995, o CMIP tem organizado experimentos de modelos climáticos envolvendo grupos de modelagem climática internacional. Isso tem levado a um melhor entendimento do passado, presente, e futuro do clima. Tais experimentos CMIP têm sido a base para os relatórios de avaliação do IPCC.

A sexta fase do CMIP (CMIP6) consiste de alguns experimentos comuns, como o DECK (Diagnostic, Evaluation and Characterisation of Klima), as simulações históricas (1850-presente), e um conjunto Endorsed Model Intercomparison Projects (MIPs). Detalhes do Projeto CMIP6 podem ser encontrados em <https://es-doc.org/cmip6/>. No presente trabalho foram avaliados 28 modelos pertencentes ao CMIP6, sendo um de cada instituição (Tabela 1). As referências de cada um dos modelos estão listadas na Tabela AII.10 do Anexo II do AR6 Grupo I ([https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_AnnexII.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_AnnexII.pdf)). Os dados utilizados neste trabalho estão disponíveis no portal Earth System Grid Federation (<http://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>).

**Tabela 1** Modelos do CMIP6 avaliados nesse estudo e suas respectivas resoluções horizontais.

<i>Modelo</i>	<i>País/região</i>	<i>Instituição</i>	<i>Resolução horizontal</i>	<i>Membro do Conjunto</i>
ACCESS-ESM1-5	Austrália	<b>CSIRO</b> Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	250 km	r1i1p1f1
AWI-ESM-1-1-LR	Alemanha	<b>AWI</b> Alfred Wegener Institute	250 km	r1i1p1f1
BCC-ESM1	China	<b>BCC</b> Beijing Climate Centre	250 km	r1i1p1f1
CanESM5	Canadá	<b>CCCMA</b> Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	500 km	r1i1p1f1
CAS-ESM2-0	China	<b>CAMS</b> Chinese Academy of Meteorological Sciences	100 km	r1i1p1f1
CESM2	Estados Unidos	<b>NCAR</b> National Center for Atmospheric Research	100 km	r1i1p1f1
CMCC-ESM2	Itália	<b>CMCC</b> Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	100 km	r1i1p1f1
CNRM-ESM2-1	França	<b>CNRM e CERFACS</b> Centre National de Recherches Météorologiques e CERFACS Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique	250 km	r1i1p1f1
E3SM-1-1-ECA	EUA	<b>E3SM</b> National laboratories consortium	100 km	r1i1p1f1

EC-EARTH3	Europa	<b>EC-Earth consortium</b>	100 km	r1i1p1f1
FGOALS-f3-L	China	<b>CAS</b> Chinese Academy of Sciences	100 km	r1i1p1f1
FIO-ESM-2-0	China	<b>FIO-QNLM</b> First Institute of Oceanography e Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao)	100 km	r1i1p1f1
GFDL-ESM4	Estados Unidos	<b>NOAA-GFDL</b> National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	100 km	r1i1p1f1
GISS-E2-1-G	Estados Unidos	<b>NASA-GISS</b> Goddard Institute for Space Studies	250 km	r1i1p1f1
HADGEM3-GC31-LL	Reino Unido	<b>MOHC</b> Met Office Hadley Centre	100 km	r1i1p1f3
IITM-ESM	Índia	<b>CCCR-IITM</b> Centre for Climate Change Research, Indian Institute of Tropical Meteorology	250 km	r1i1p1f1
INM-CM5-0	Rússia	<b>INM</b> Institute for Numerical Mathematics	100 km	r1i1p1f1
IPSL-CM6A-LR-INCA	França	<b>IPSL</b> Institut Pierre-Simon Laplace	250 km	r1i1p1f1
KACE-1-0-G	Coreia	<b>NIMS-KMA</b> National Institute of Meteorological Sciences, Korea Meteorological Administration	250 km	r1i1p1f1



MCM-UA-1-0	Estados Unidos	University of Arizona	250 km	rlilp1fl
MIROC6	Japão	<b>MIROC consortium</b> JAMSTEC, AORI, NIES, R-CCS	250 km	rlilp1fl
MPI-ESM1-2-HR	Alemanha	<b>MPI-M</b> Max Planck Institute for Meteorology	100 km	rlilp1fl
MPI-ESM-1-2-HAM	Suiça Alemanha Reino Unido Finlândia	<b>HAMMOZ-Consortium</b>	250 km	rlilp1fl
MRI-ESM-2.0	Japão	<b>MRI</b> Meteorological Research Institute	100 km	rlilp1fl
NESM3	China	<b>NUIST</b> Nanjing University of Information Science and Technology	250 km	rlilp1fl
NorCPM1	Noruega	<b>NCC</b> NorESM Climate Modelling Consortium	250 km	rlilp1fl
SAM0-UNICON	Coreia do Sul	<b>SNU</b> Seoul National University	100 km	rlilp1fl
TAIESM1.0	China	<b>AS-RCEC</b> Research center for environmental changes	100 km	rlilp1fl

### 2.3. Avaliação do Desempenho dos Modelos CMIP6

A priori, a avaliação subjetiva é realizada confrontando as climatologias do verão (DJF) e inverno (JJA) austrais simuladas por 28 modelos do CMIP6 com os dados provenientes da Reanálise ERA5 e do GPCP (no caso da precipitação). Nesse sentido, as saídas dos modelos CMIP6, do ERA5 e do GPCP são interpoladas para uma grade comum de 1° de latitude por 1° de longitude utilizando o método bilinear de interpolação. As variáveis climatológicas do ERA5 utilizadas são: temperatura média do ar, pressão atmosférica ao nível médio do mar, e vento nos baixos (850 hPa) e altos (250 hPa) níveis da troposfera. Nos baixos níveis procura-se identificar se os modelos representam adequadamente: i) a posição da ZCIT e da ZCAS e ii) a posição e intensidade do ASAS e do Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS). Nos altos níveis observa-se: i) as posições da Alta da Bolívia (AB) e do Cavado do Nordeste do Brasil (CNEB) e ii) a posição e a intensidade do Jato Subtropical (JS). Sendo assim, o principal objetivo desta primeira etapa da avaliação é verificar se os modelos apresentam um bom desempenho na representação dos principais sistemas climatológicos que atuam na AS.

A avaliação objetiva é realizada através da comparação das séries temporais do total pluviométrico anual (1980-2014) e da temperatura média do ar (1950-2014) de cada um dos 28 modelos CMIP6 com dados observacionais. As métricas estatísticas são dispostas em Diagramas de Taylor (TAYLOR, 2001) para cada uma das sete regiões (ver Figura 1) contempladas no AR6 do IPCC: Norte (NSA), Noroeste (NWS), Nordeste (NES), Sudeste (SES), Sudoeste (SWS) e Sul (SSA) da AS e a região de monção da AS (SAM). O Diagrama de Taylor fornece um resumo estatístico conciso de quão bem as simulações conseguem reproduzir às observações em termos de correlação (CORR), raiz do erro quadrático médio (REQM) e razão entre as variâncias (ou desvios padrões - DP). O diagrama pode ser usado para resumir os méritos relativos de uma coleção de modelos diferentes (ou vários membros de um mesmo modelo) ou para rastrear alterações no desempenho de um modelo conforme ele é modificado, ou ainda para avaliar um único modelo para diferentes variáveis, regiões ou horizontes de previsão. Dessa maneira, atributos como precisão e confiabilidade podem ser examinados em um único gráfico. Neste trabalho a CORR é classificada de acordo com os limiares propostos por MUKAKA; MOULTON (2016) apresentados na Tabela 2. As métricas exibidas no diagrama de Taylor são dadas a seguir.

O DP é expresso por:

$$\sigma_{model} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (model_i - \overline{model})^2}{n}} \quad (1)$$

e

$$\sigma_{obs} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2}{n}} \quad (2)$$

onde  $model_n$  e  $obs_n$  são, respectivamente, os dados simulados e observados no período estabelecido, a barra indica a média temporal desses dados e  $n$  é o número de meses que compõem esse período (420 meses para precipitação e 780 meses para temperatura).

A CORR é expressa em função de  $model_n$ ,  $obs_n$  e dos valores de DP ( $\sigma_{model}$  e  $\sigma_{obs}$ ), como descrito abaixo:

$$CORR = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (model_n - \overline{model})(obs_n - \overline{obs})}{\sigma_{model} \sigma_{obs}} \quad (3)$$

Por fim, a REQM, no diagrama, é expressa como uma relação entre a CORR e os valores de DP, seguindo a lei dos cossenos:

$$REQM = \sqrt{\sigma_{model}^2 + \sigma_{obs}^2 - 2\sigma_{model}\sigma_{obs}CORR + (\overline{model} - \overline{obs})^2} \quad (4)$$

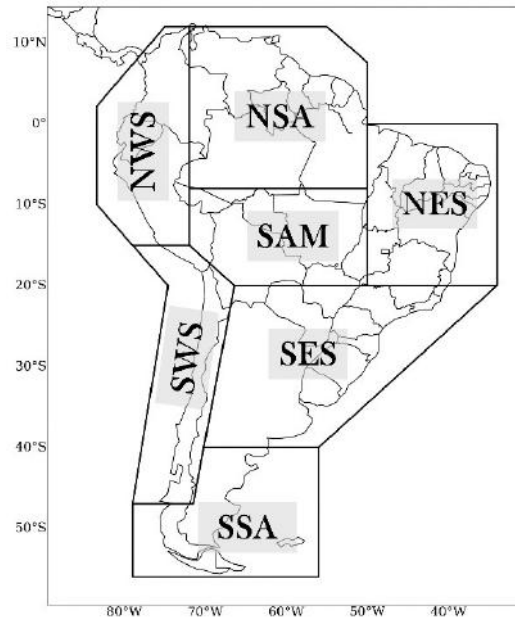


Figura 1 Regiões contempladas no Sixth Assessment Report (AR6) do IPCC. Os setores do Norte, Noroeste e Nordeste da AS, são representadas pelas siglas NSA, NWS e NES, respectivamente. O centro da AS (SAM) representa a região de atuação da Monção da AS. Por fim, o setor Sul, Sudoeste e Sudeste da AS correspondem as siglas SSA, SWS e SES, respectivamente.

**Tabela 2.** Limiares estabelecidos por MUKAKA; MOULTON (2016) para classificação da correlação (CORR).

Classificação da CORR	Valor da CORR
Muito forte	$CORR \geq 0,9$
Forte	$0,7 \leq CORR < 0,9$
Moderada	$0,5 \leq CORR < 0,7$
Fraca	$0,3 \leq CORR < 0,5$
Muito fraca	$0 \leq CORR < 0,3$

### 3. Resultados

#### 3.1. Climatologia Observada

Nesta seção são apresentados os principais padrões climatológicos da AS com base nas saídas da reanálise ERA5 e do GPCP para o clima presente (1995-2014), considerando suas climatologias de verão (DJF) e inverno (JJA) austrais. As características climáticas da AS refletem a combinação de aspectos locais e remotos, ou seja, a consequência de uma sucessão de fatores físicos e fenômenos atmosféricos com diferentes escalas espaciais e temporais que devem ser relativamente bem representados pelos modelos.

A Figura 2 exibe as climatologias de verão e inverno para os acumulados pluviométricos provenientes do GPCP e isolinhas de PNMM da reanálise ERA5. Nota-se que no verão (Figura 2 a) os maiores totais pluviométricos são observados sobre a Bacia Amazônica (300-350 mm/mês) e uma faixa de volumes menores de chuva, porém ainda expressivos (150-300 mm/mês), se estende até o sudoeste do Oceano Atlântico Sul. Tal configuração é uma característica marcante de eventos de ZCAS durante o verão e a porção centro-sul da Bacia Amazônica marca a região continental de máxima precipitação nesse período. A climatologia da precipitação sobre a maior parte da América do Sul possui um ciclo sazonal bastante regular, com verões mais chuvosos e invernos mais secos. O posicionamento médio da ZCIT no verão é próximo ao Equador, em torno de 5°N e os maiores acumulados (250-300 mm/mês) são observados sobre o Oceano Atlântico Sul Tropical. Ainda no verão, o ASAS está posicionado mais para leste e tem pouca influência sobre a região continental, como é possível observar pelo posicionamento médio de seu centro de intensidade 1020 hPa em 30°S/30°W, enquanto o centro do ASPS encontra-se em 100°W/35°S com intensidade de 1022 hPa.

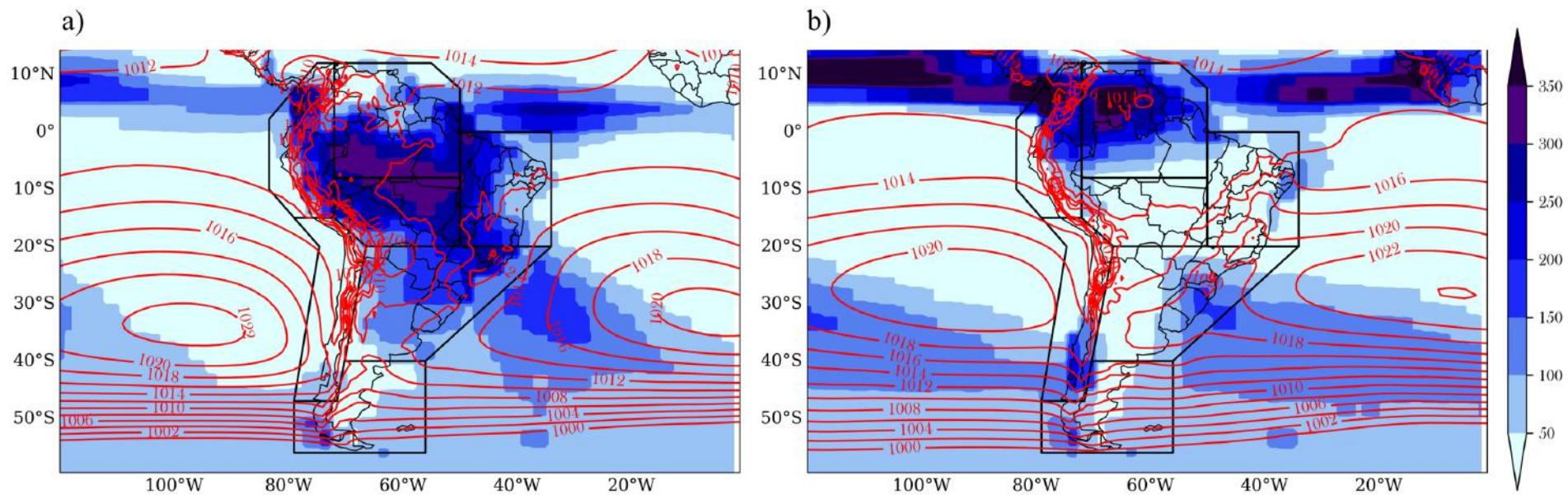


Figura 2 Climatologias (1995-2014) sazonais de verão (a) e inverno (b) para a precipitação (mm/mês) referente ao GPCP. As isolinhas vermelhas representam a PNMM (hPa) do ERA

O período mais seco do ano sobre a maior parte a AS, sobretudo na região central, ocorre durante o inverno (Figura 2 b). Nesse período, a ZCIT encontra-se em sua posição latitudinal mais ao norte ( $10^{\circ}\text{N}$ ; SCHNEIDER *et al.*, 2014) com volumes superiores aos 350 mm/mês. Por esse motivo, os maiores totais pluviométricos são observados no extremo norte da AS. No litoral do NEB, o deslocamento do ASAS em direção ao continente favorece a convergência de umidade transportada pelos ventos alísios de sudeste próximo a costa. Ademais, os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs; GOMES *et al.*, 2019), promovem elevados volumes de chuva no leste do NEB, variando entre 100 e 150 mm/mês. Outra característica do inverno, é a constante atuação de sistemas transientes sobre o centro-sul da AS (FOSS *et al.*, 2017), que tem como consequência acumulados médios mensais entre 50 e 200 mm, enquanto no Oceano Atlântico adjacente a atuação de ciclones extratropicais é mais frequente. Ao contrário do verão, o centro do ASAS atinge sua maior intensidade durante o inverno (1022 hPa) e seu posicionamento médio é em  $25^{\circ}\text{S}/30^{\circ}\text{W}$ . É durante o inverno que o ASAS apresenta a maior extensão longitudinal e, conseqüentemente, também tem maior influência sobre a região continental, principalmente nas regiões NES e SES (SUN *et al.*, 2017). Em contrapartida, o centro do ASPs atinge sua menor intensidade nesse período (1020 hPa) e mantém seu posicionamento médio em  $90^{\circ}\text{W}/30^{\circ}\text{S}$ .

As climatologias de verão e inverno para a temperatura média do ar são apresentadas na Figura 3. Além da precipitação, é evidente que a ZCAS também influencia o campo médio de temperatura do ar (Figura 3 a), tendo em vista que as temperaturas médias são suavemente menores em parte de sua região de atuação. Isso se deve à permanência da nebulosidade sobre essas áreas, o que reduz a quantidade de radiação solar (ROBERTSON; MECHOSO, 2000) que chega à superfície. Ao norte da Argentina e sobre o Paraguai, nota-se uma região com temperaturas mais elevadas que as demais, onde forma-se regularmente a Baixa do Chaco.

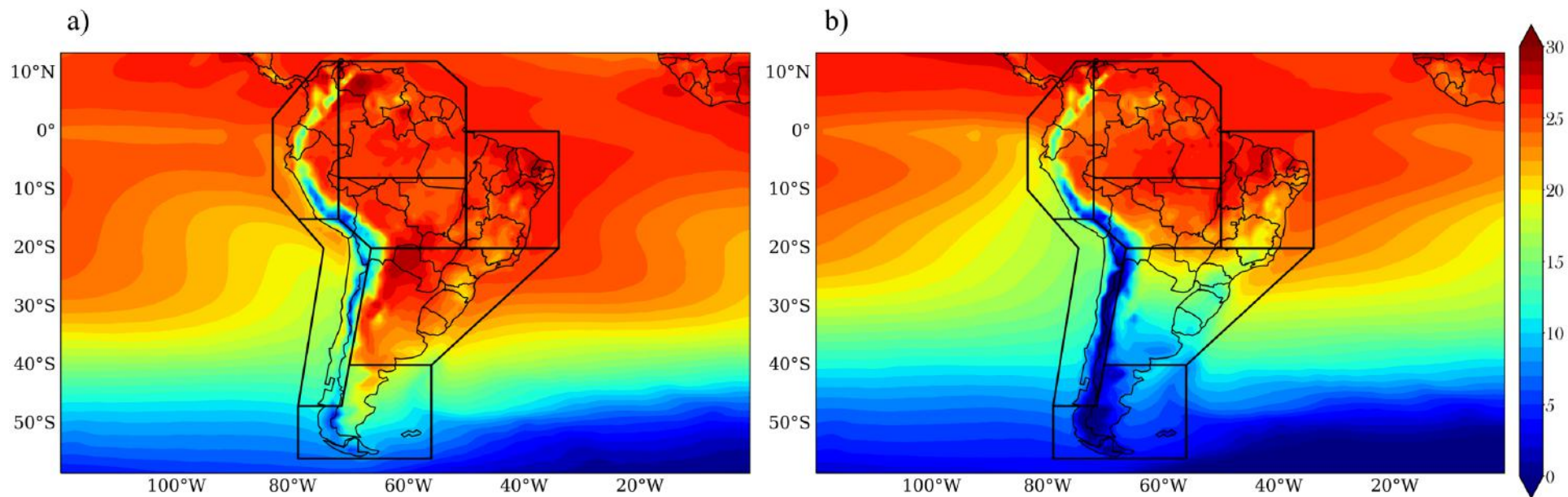


Figura 3 Climatologias (1995-2014) sazonais de verão (a) e inverno (b) para a temperatura média do ar (°C) referente ao ERA5.



Em relação aos padrões de temperatura durante o inverno (Figura 3 b), nota-se que toda a região do SES, SWS e SSA apresenta temperaturas menores em relação ao restante do continente devido a maior incursão de massas de ar frio na retaguarda dos sistemas transientes, que atuam com mais frequência sobre tais regiões. Na faixa litorânea do NES também são observadas temperaturas mais amenas em relação ao verão devido à maior cobertura de nuvens nessa época do ano. Somente no setor norte da AS (NSA e NWS), as temperaturas permanecem elevadas, comparativamente ao verão.

Na Figura 4 são apresentados os campos médios do escoamento do vento em baixos e altos níveis para o verão e inverno. A circulação atmosférica de baixos e altos níveis no verão (Figura 4 a,c) também exhibe padrões importantes para o desenvolvimento da ZCAS. Em baixos níveis, no verão, os ventos alísios de nordeste são mais intensos e transportam umidade do Oceano Atlântico Equatorial para o norte da AS, que são retroalimentados pela evapotranspiração da Amazônia. O escoamento sobre o continente, afetado pela barreira da Cordilheira dos Andes, promove a convergência de umidade na porção central da AS através da configuração de um corredor de umidade. Desse modo, inicia-se o Sistema de Monção da América do Sul, definido pela reversão do escoamento de leste no inverno para noroeste no verão sobre o Centro-Oeste do país. Em altos níveis (Figura 4 c), a AB e o CNEB são sistemas frequentes durante o verão e são fundamentais para a formação da ZCAS, uma vez que atuam como suporte termodinâmico e dinâmico para sua origem e manutenção. O JS localiza-se entre 35°S e 40°S no verão.

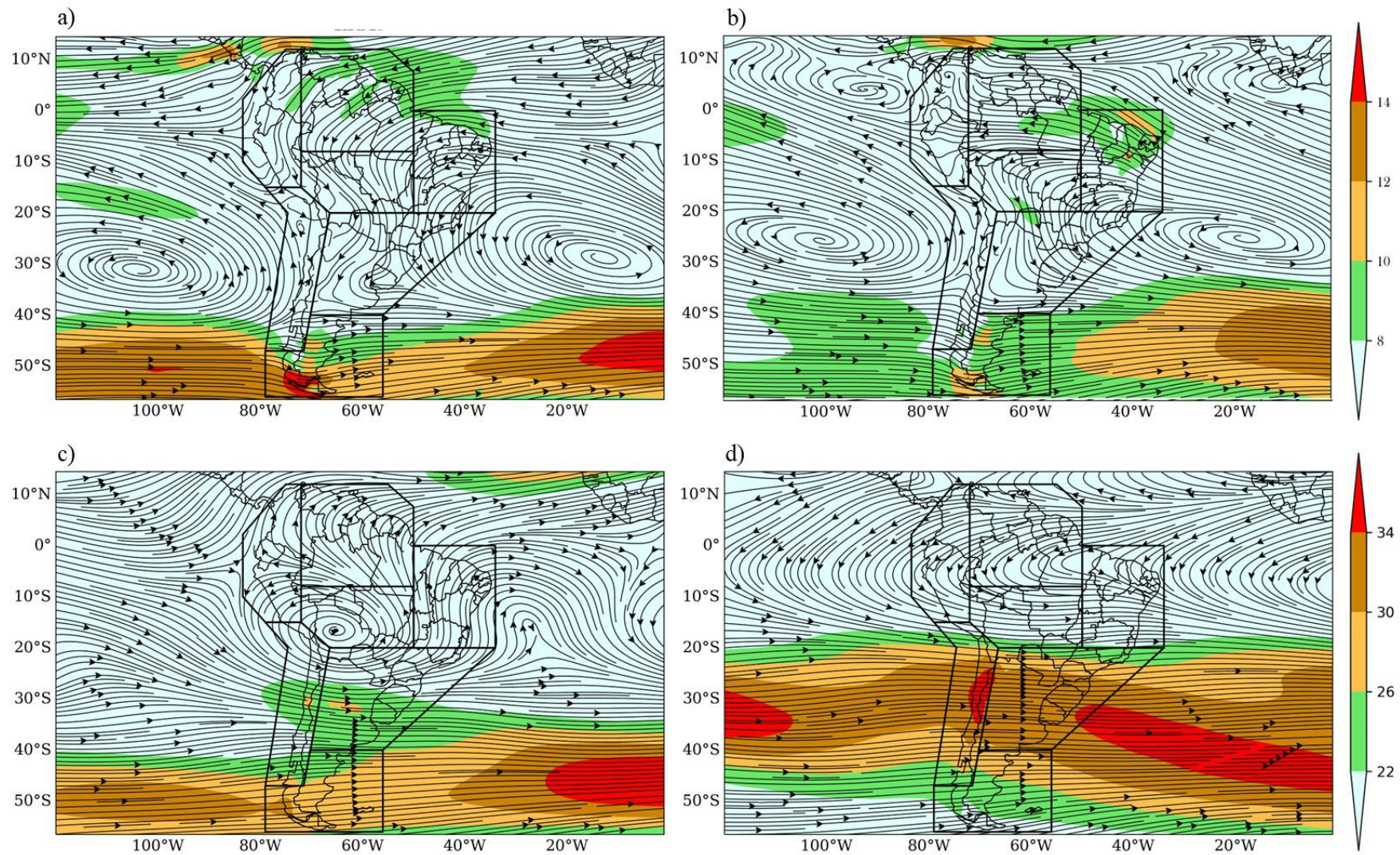


Figura 4 Climatologias (1995-2014) sazonais de verão (a, d) e inverno (b, d) para a linha de corrente e magnitude do vento (m/s) em baixos (a, b) e altos (c, d) níveis da atmosfera referente ao ERA5.

No inverno, em baixos níveis (Figura 4 b), os ventos mais intensos na costa do NEB, em relação ao verão, são resultado da posição do ASAS cujo centro se encontra mais próximo do continente. Tais ventos promovem a convergência de umidade no litoral do NEB, provocando totais pluviométricos elevados como já discutido anteriormente. Em altos níveis (Figura 4 d), as correntes de jato são mais intensas e seu posicionamento médio se encontra na faixa latitudinal de 30°S a 35°S, possuindo 3 núcleos bem definidos nessa mesma faixa: sobre o Oceano Pacífico Sul, região dos Andes e Oceano Atlântico Sul. Vale recordar que o posicionamento do Jato Subtropical possui uma variabilidade sazonal inferior ao Jato Polar.

## **3.2. Avaliação Subjetiva**

Nesta seção os modelos CMIP6 são avaliados quanto à sua habilidade em representar os sistemas climatológicos que atuam na América do Sul no clima presente (1995-2014), considerando suas climatologias de verão (DJF) e inverno (JJA) austrais.

### **3.2.1. Precipitação**

As climatologias da precipitação e PNMM durante o verão dos 28 modelos CMIP6 são apresentadas na Figura 5. Nota-se que a maioria dos modelos representa a ZCIT no verão como uma faixa dupla de precipitação no Oceano Atlântico e/ou no Oceano Pacífico, exceto o MCM-UA-1-0, NESM3 e o SAM0-UNICON que a configuram corretamente como uma banda única. Alguns autores já detectaram essa representação incorreta da ZCIT com banda dupla em diversos modelos globais (BELLUCCI *et al.*, 2010; LI; XIE, 2014; TIAN; DONG, 2020), o que pode estar associado à simulação errônea da zona de confluência dos alísios. Na Figura 6, são apresentados os campos do viés espacial da precipitação entre as climatologias de verão dos modelos CMIP6 e o GPCP. Observa-se que o posicionamento da ZCIT mais ao sul de sua posição climatológica também é uma característica comum a todos os modelos do CMIP6. Dessa forma, devido aos dois aspectos destacados anteriormente, ou seja, a banda dupla da ZCIT e seu deslocamento para sul, observa-se no campo do viés (Figura 6), próximo à região equatorial, uma banda norte (sul) com viés negativo (positivo) de precipitação. Esse problema não é identificado somente nos modelos MCM-UA-1-0 e SAM0-UNICON. Ademais, devido ao posicionamento da ZCIT mais ao sul no Atlântico, nota-se superestimativa da precipitação

em praticamente todo o NES, com exceção dos modelos ACCESS-ESM1-5, FGOALS-f3-L, MCM-UA-1-0 e NorCPM1.

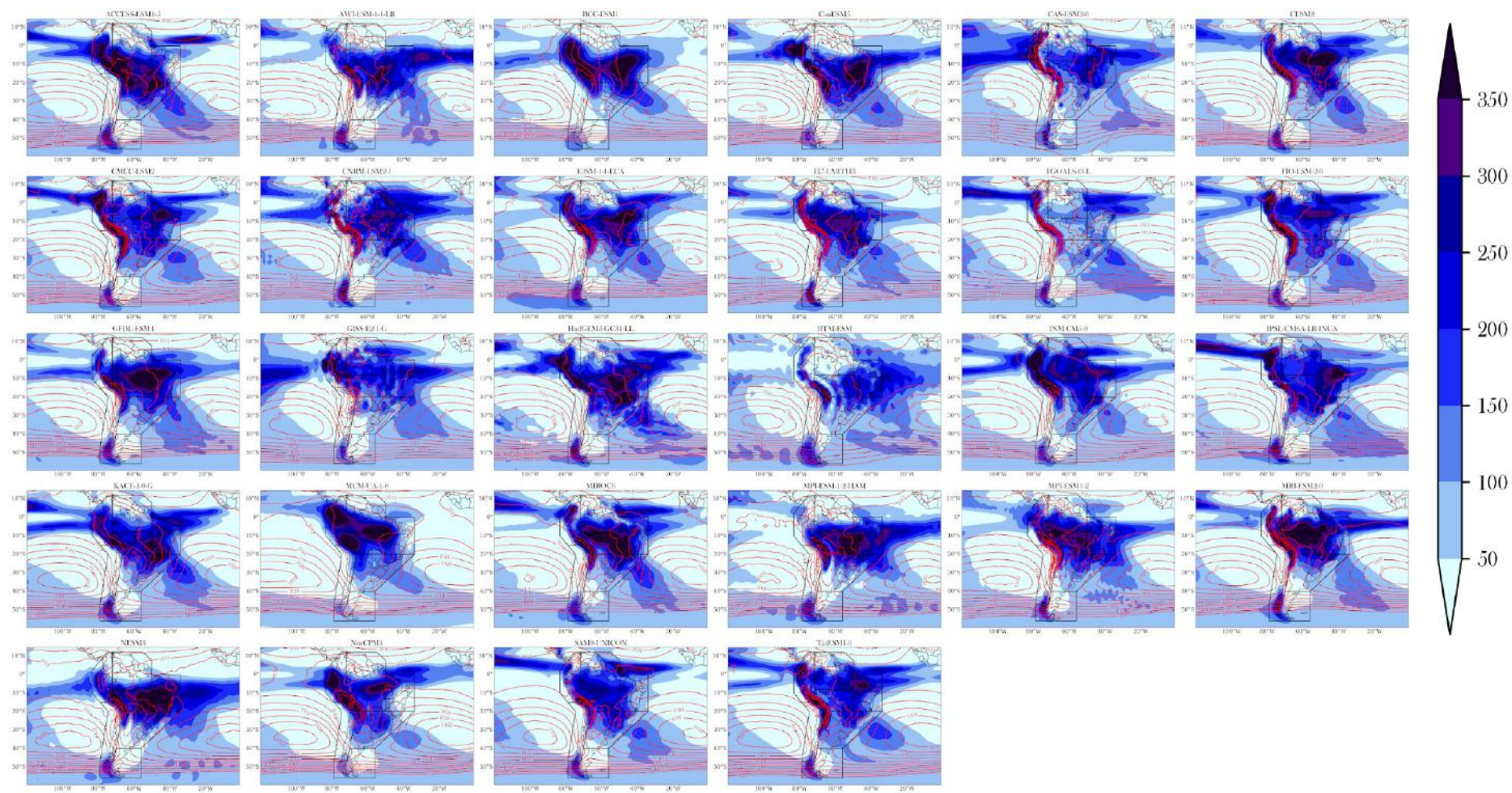


Figura 5 Climatologias (1995-2014) da precipitação (mm/mês) e da PNMM (isóbaras a cada 2 hPa) referente ao verão austral (DJF) elaboradas a partir dos 28 modelos CMIP6.

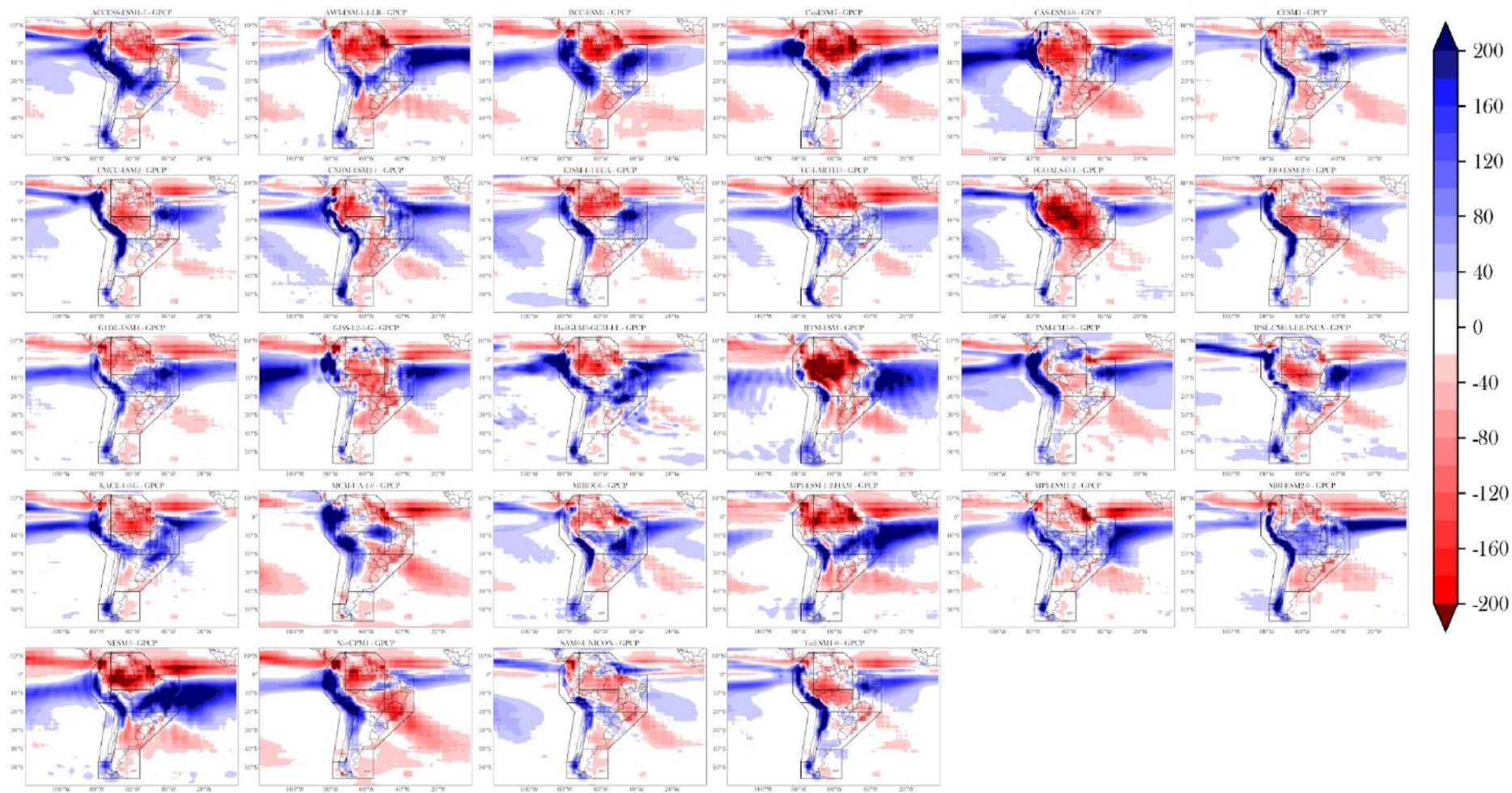


Figura 6 Viés espacial da precipitação acumulada (mm/mês) considerando o período 1995-2014 para o verão (DJF) referente aos modelos CMIP6 em relação ao GPCP.

Ainda em relação à climatologia da precipitação no verão, a maior parte dos modelos não é capaz de capturar os máximos valores de chuva associados à ZCAS no NSA e/ou no SAM. Dessa forma, em geral os modelos subestimam a precipitação em uma dessas áreas ou nas duas. Na região da Amazônia, os acumulados pluviométricos são frequentemente subestimados pelos modelos, provavelmente não representando muito bem o início da atividade convectiva relacionada à estação chuvosa, como discutido por MONTEVERDE *et al.*, (2022), que destacam a subestimativa da precipitação no início do período úmido na região da Bacia Amazônica. Alguns modelos não são capazes de representar a orientação NO-SE da ZCAS, e por posicionarem a ZCIT ao sul de sua posição climatológica, parecem unir a ZCIT à ZCAS numa faixa horizontal de precipitação sobre a região continental e sobre o Atlântico. Tal aspecto é observado nos modelos AWI-ESM-1-1-LR, BCC-ESM1, GISS-E2-1-G, IITM-ESM, o MPI-ESM1-2-HR e o NESM3, o que em alguns deles ocasiona superestimativa da precipitação sobre o NES. Apenas dois modelos não prolongam a ZCIT em direção ao leste do Atlântico (BCC-ESM e MCM-UA-1-0) como deveriam fazer. Apenas o modelo FGOALS-f3-L representa erradamente a precipitação associada à ZCAS mais intensa sobre o Oceano do que sobre o continente.

Na Figura 5, também são apresentadas as isolinhas de PNMM. Os modelos avaliados apresentam uma boa performance em simular o ASPS em sua totalidade, com exceção de apenas cinco modelos: GISS-E2-1-G, INM-CM5-0, MIROC6 e NESM3, que subestimam a magnitude do seu centro em torno de 2 a 4 hPa; e o modelo MCM-UA-1-0, que simula o ASPS cerca de 10° a oeste do seu posicionamento climatológico. Em relação ao ASAS, todos os modelos apresentam uma boa performance de sua representação espacial. Vários modelos simulam adequadamente a intensidade do ASAS (de 1020 hPa), porém alguns apresentam viés positivos ou negativos, em torno de 2 hPa. Durante o verão austral, o ASAS desempenha um papel dinâmico importante no escoamento noroeste-sudeste que contribui para a formação da ZCAS. Em alguns modelos, quando o ASAS adentra mais o continente, a precipitação é subestimada, principalmente sobre o NES, SAM e SES, como verificado no caso do modelo FGOALS-f3-L. Por outro lado, nos modelos em que o ASAS está mais deslocado para leste, a precipitação é superestimada, como por exemplo no NESM3 sobre o NES e SAM.

Na Figura 7 são apresentadas as climatologias de inverno da precipitação e da PNMM referente aos modelos CMIP6. Nota-se que a maior parte dos modelos apresenta uma performance razoável ao representar o posicionamento da ZCIT, que nessa época do ano já está

deslocada para o Hemisfério Norte. Contudo, alguns modelos a enfraquecem ou a interrompem sobre o continente, entre o Pacífico e o Atlântico. Assim, em tais modelos (AWI-ESM-1-1-LR, BCC-ESM1, FGOALS-f3-L, GFDL-ESM4, IITM-ESM e MCM-UA-1-0) a precipitação é reduzida no NSA e/ou no NWS (Figura 8). Outro comportamento comum entre os modelos é o leve deslocamento da ZCIT para sul em relação à sua posição observada, superestimando os totais pluviométricos associados à ZCIT, principalmente no Atlântico Sul, e subestimando os volumes de chuva sobre o Atlântico Norte. O modelo CAS-ESM2-0 é o único que representa erradamente a banda dupla da ZCIT no Pacífico e no Atlântico durante o inverno e o modelo INM-CM5-0 configura uma banda dupla sobre o Atlântico. A redução da precipitação no inverno sobre a região continental é relativamente bem representada pelos modelos, com exceção dos HadGEM3-GC31-LL e IITM-ESM que unem a chuva da ZCIT com a chuva do SES. A precipitação ao sul do ASPS e do ASAS ocasionada pela passagem de sistemas frontais e ciclones é em geral bem representada pelos modelos. A precipitação que ocorre localmente sobre a costa do NES não é simulada pelos modelos globais. Em alguns modelos essa precipitação ocorre por motivos errados, como por exemplo pelo deslocamento da ZCIT para sul (ex. no E3SM-1-1-ECA, no HadGEM3-GC31-LL e no SAM0-UNICON) ou pela formação de uma banda dupla da ZCIT sobre o Atlântico (ex. no INM-CM5-0). Os modelos que representam melhor a precipitação no inverno são: ACCESS-ESM1-5, CMCC-ESM2, EC-EARTH3, KACE-1-0-G e TaiESM1-0. Nesse tipo de situação, recomenda-se o downscaling dinâmico (regionalização) através do aninhamento de modelos climáticos regionais em modelos climáticos globais. Vale salientar também que os acumulados pluviométricos tendem a ser subestimados no Sul do Brasil, provavelmente em virtude da simulação de uma frequência menor de sistemas frontais (e/ou menos intensos) passando pela região.



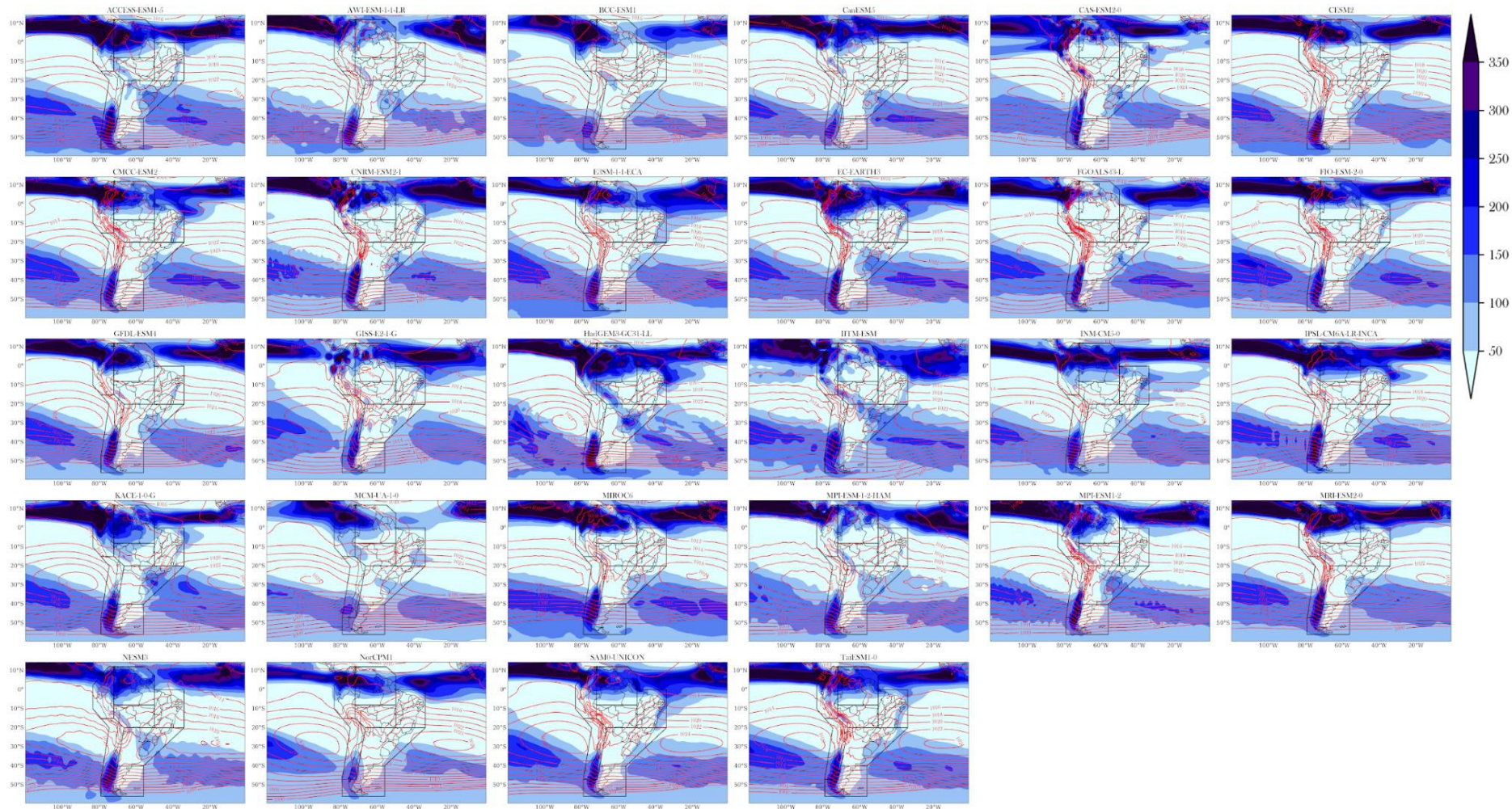


Figura 7 Climatologias (1995-2014) da precipitação (mm/mês) e da PNMM (isolinhas a cada 2 hPa) referentes ao inverno austral, elaboradas a partir dos 28 modelos CMIP6.

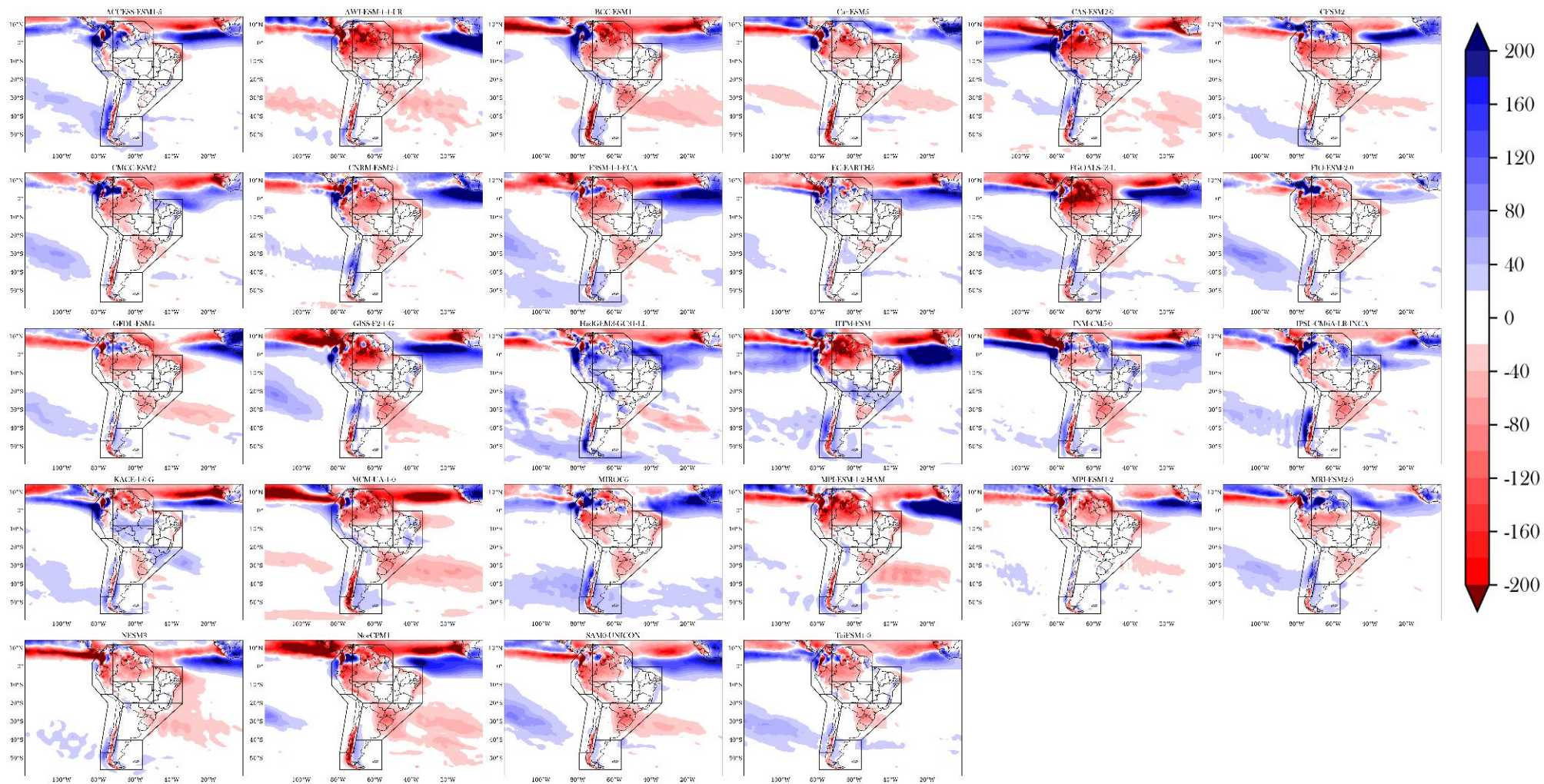


Figura 8 Viés espacial da precipitação acumulada (mm/mês) considerando o período 1995-2014 para o inverno (JJA) referente aos modelos CMIP6 em relação ao GPCP.

Na Figura 7 também são apresentadas as isóbaras climatológicas no inverno. Nota-se que somente alguns modelos são capazes de representar adequadamente a intensidade dos centros do ASPS (1020 hPa) e do ASAS (1024 hPa), são eles: ACCESS-ESM1-5, CMCC-ESM2, GFDL-ESM4, MPI-ESM-1-2-HAM, MRI-ESM2-0, SAM0-UNICON e TaiESM1-0. Nos demais modelos o erro fica em torno de  $\pm 2$  hPa. O posicionamento do ASPS e a incursão do ASAS no continente durante o inverno, são outras características bem capturadas pelos modelos.

### **3.2.2 Temperatura Média do Ar**

Os campos do viés da temperatura média do ar para o período do verão entre os modelos CMIP6 e a reanálise ERA5 são apresentados na Figura 9. Nota-se que os modelos que superestimam as temperaturas sobre a área de atuação do Sistema de Monção da América do Sul também subestimam a precipitação sobre essas regiões e, conseqüentemente, apresentam uma performance insatisfatória ao simular a intensidade da ZCAS. O déficit de precipitação simulado pelos modelos, pode estar associado também à redução da nebulosidade (variável não avaliada), o que permite a maior entrada de radiação solar e, conseqüentemente, provoca o aumento da temperatura do ar. Essa relação entre os campos de temperatura e precipitação é mais evidente sobre o NEB, região na qual a maioria dos modelos apresenta um viés negativo da temperatura média do ar (Figura 9), causado pelo excesso de precipitação simulada, como pode ser visto na Figura 4. O oposto é verificado também no caso da Amazônia, onde o viés positivo da temperatura do ar pode estar associado à subestimativa dos totais pluviométricos. Enquanto durante o inverno (Figura 10), a maioria dos modelos subestima a temperatura sobre o NES e vários a superestimam sobre o NSA. Esse viés quente sobre o NSA pode estar associado ao déficit de precipitação simulado pelos modelos, tendo em vista a dificuldade de capturar a influência da ZCIT sobre o extremo norte da AS.

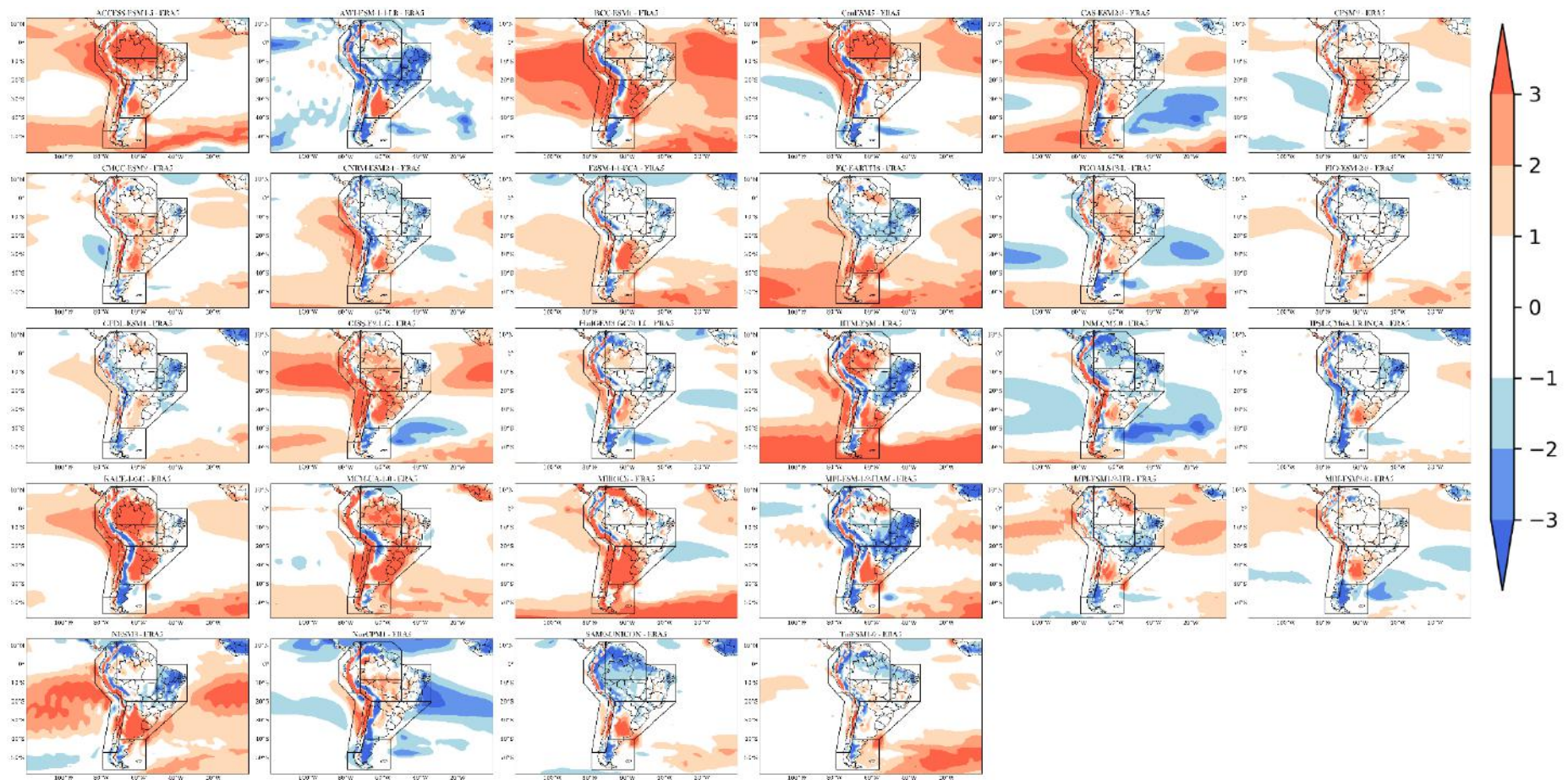


Figura 9 Viés espacial da temperatura média do ar (°C) considerando o período 1995-2014 para o verão (DJF) referente aos modelos CMIP6 em relação ao ERA5.

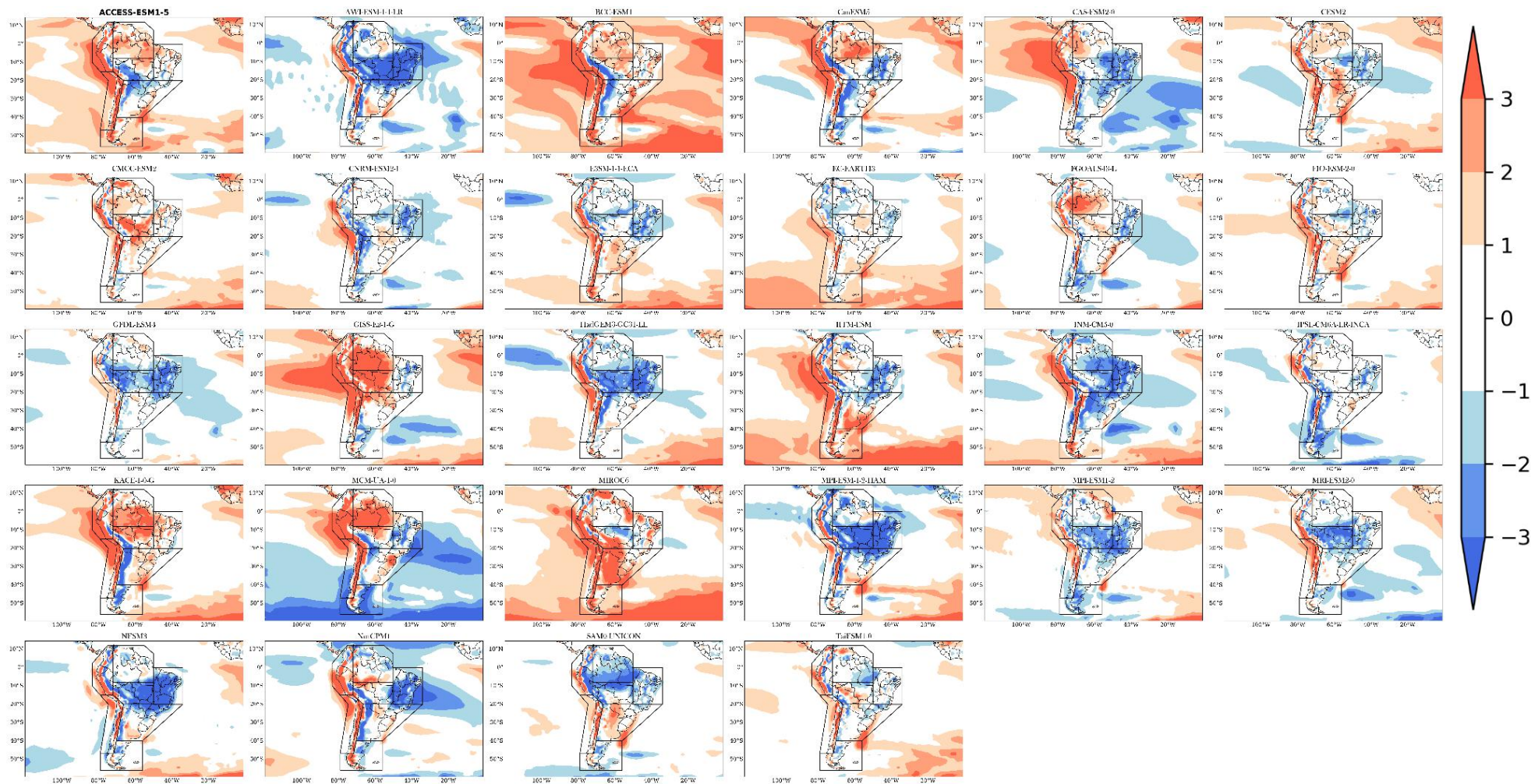


Figura 10 Viés espacial da temperatura média do ar (°C) considerando o período 1995-2014 para o inverno (JJA) referente aos modelos CMIP6 em relação ao ERA5.

### 3.2.3 Circulação em Altos e Baixos Níveis

Na Figura 11 são apresentadas as climatologias do escoamento do vento em baixos níveis para o verão referente aos 28 modelos CMIP6. Verifica-se que os modelos AWI-ESM-1-1-LR, CAS-ESM2-0, CNRM-ESM2-1, IITM-ESM, INM-CM5, MPI-ESM-1-2-HAM, MPI-ESM1-2-HR e NESM3 subestimam a magnitude do vento no extremo norte da AS (região de atuação dos ventos alísios de nordeste). Por outro lado, os modelos MCM-UA-1-0, NorCPM1 e SAM0-UNICON superestimam a intensidade do vento nessa região. Os ventos alísios de nordeste têm um papel fundamental no transporte de umidade do Atlântico Equatorial para os trópicos, além de fornecer suporte dinâmico para a manutenção do escoamento noroeste-sudeste que favorece a formação da ZCAS. Além disso, também é importante que os modelos consigam representar o escoamento na região do ASAS, tendo em vista que o mesmo contribui para a convergência de umidade sobre a região continental por meio dos alísios de sudeste. Nesse sentido, nota-se que a maioria dos modelos representa adequadamente o posicionamento do ASAS, exceto os modelos AWI-ESM-1-1-LR, IITM-ESM e NESM3, que parecem simular fraca penetração do ASAS sobre o continente. O fluxo de noroeste para sudeste nos baixos níveis que favorece o transporte de umidade da Amazônia para a região central da AS é bem capturado por poucos modelos, como o HadGEM3-CG31-LL, KACE-1-0-G e MPI-ESM1-2.

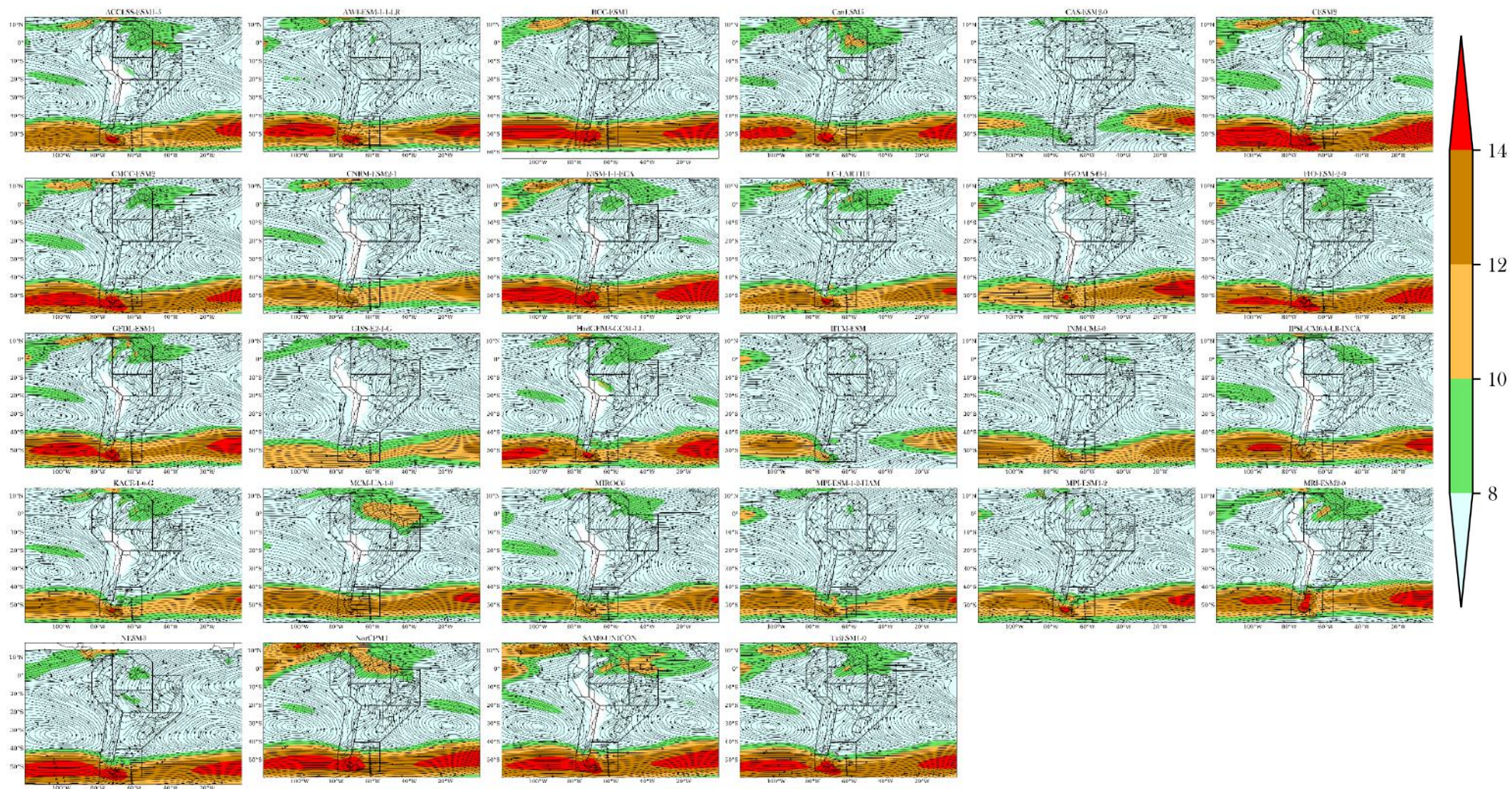


Figura 11 Climatologia (1995-2014) dos campos de linha de corrente e magnitude (m/s) do vento em baixos níveis (850 hPa) referente ao verão austral, elaborada a partir dos 28 modelos CMIP6.

Na Figura 12 são apresentadas as climatologias sazonais do escoamento do vento em altos níveis para o verão austral referente aos 28 modelos CMIP6, onde observa-se que somente 10 modelos não são capazes de representar adequadamente o CNEB e a AB, são eles: AWI-ESM-1-1-LR, CAS-ESM2-0, CNRM-ESM2-1, FGOALS-f3-L, GISS-E2-1-G, IITM-ESM, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR-INCA, MPI-ESM-1-2-HAM e NESM3. Supõe-se, portanto, que essa seja uma das razões para a má representação dos volumes de chuva associados à ZCAS, visto que a AB e o CNEB são sistemas fundamentais para sua formação e permanência. Alguns modelos representam o CNEB com um deslocamento de aproximadamente 5° de longitude para leste, possivelmente ligado ao escoamento da AB com uma grande amplitude em comparação ao observado, uma vez que ambos possuem evidente interação. O modelo GFDL-ESM4 parece representar o máximo da precipitação associada à ZCAS no NEB, ou seja, também deslocado para leste. Outro ponto a ser ressaltado é que não há um padrão entre a representação da AB e do CNEB, e a precipitação simulada sobre a região de atuação da ZCAS. O modelo EC-EARTH3 destaca-se positivamente pelo desempenho na representação de ambos os sistemas climatológicos e na distribuição espacial da precipitação, enquanto o modelo INM-CM5 não simula adequadamente a AB e não é capaz de representar o CNEB, no entanto, é capaz de representar de forma satisfatória o posicionamento da ZCAS, assim como o modelo EC-EARTH3.



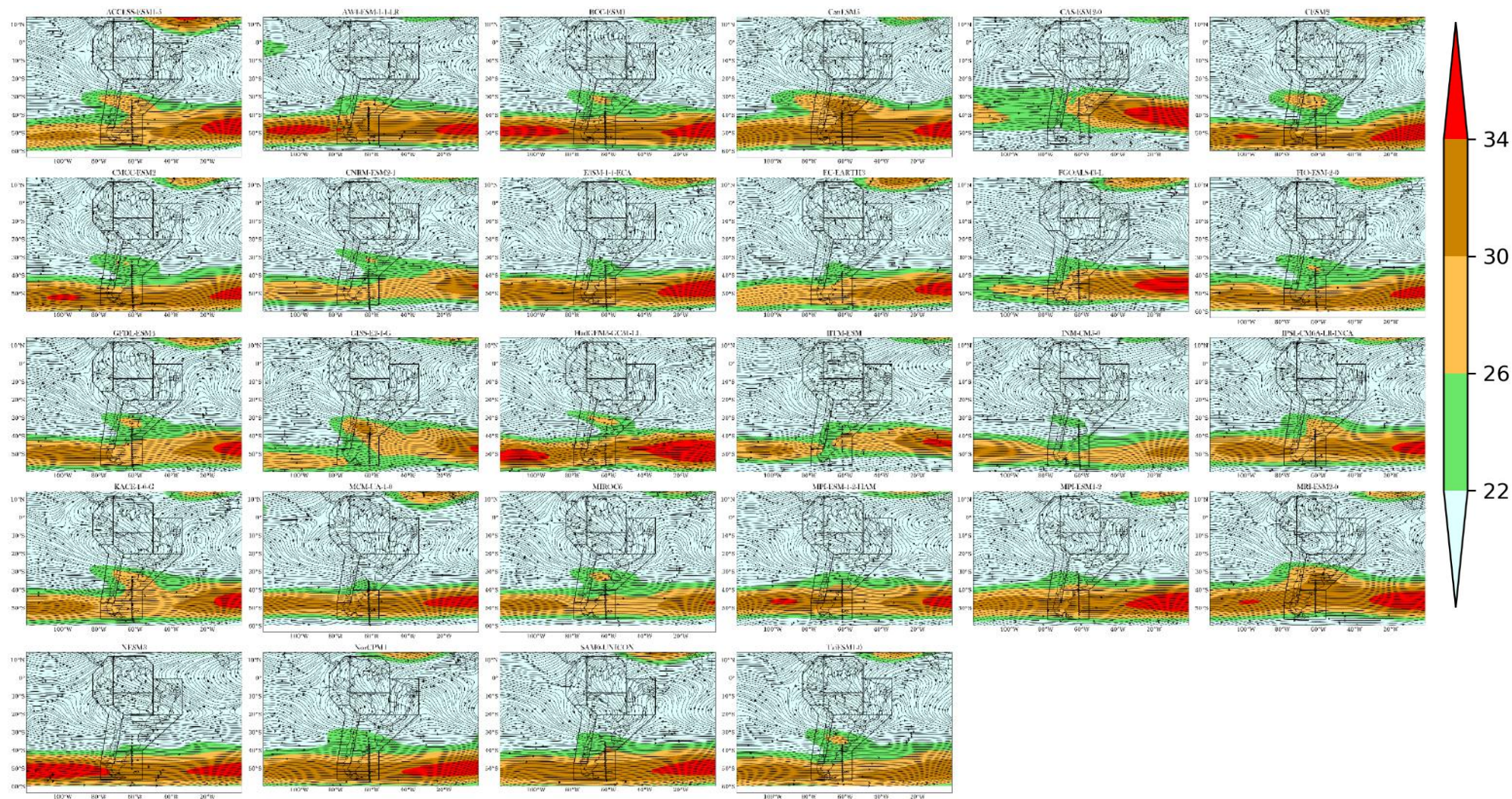


Figura 12 Climatologias (1995-2014) dos campos de linha de corrente e magnitude (m/s) do vento em altos níveis (250 hPa) referente ao verão austral, elaboradas a partir dos 28 modelos CMIP6.

Durante o inverno, além da chuva no leste do NES ser provocada por sistemas de mesoescala (Distúrbios Ondulatórios de Leste), a convergência dos alísios de sudeste nos baixos níveis, quando penetram perpendicularmente na costa do NES, também é importante e teria de ser bem simulada pelos modelos para reproduzir a precipitação observada. Nesse sentido, os modelos apresentam uma performance satisfatória na representação dos ventos alísios de sudeste (Figura 13). Devido a restrições de espaçamento da grade (SCHMIDT; GRISE, 2017), esses processos cruciais para a precipitação, como circulações de mesoescala, não são resolvidos em modelos climáticos de escala global. Além disso, o jato de oeste de baixos níveis não é bem capturado pela maioria dos modelos e a intensidade dos ventos é subestimada (superestimada) sobre o Oceano Pacífico (Atlântico) extratropical. Em altos níveis (Figura 14), metade dos modelos superestima a magnitude da corrente de jato, além de deslocá-lo para norte cerca de 5° de latitude. Essa dificuldade em simular as correntes de jato pode resultar na má representação da frequência e intensidade da atuação de sistemas transientes na AS e no Oceano Atlântico.

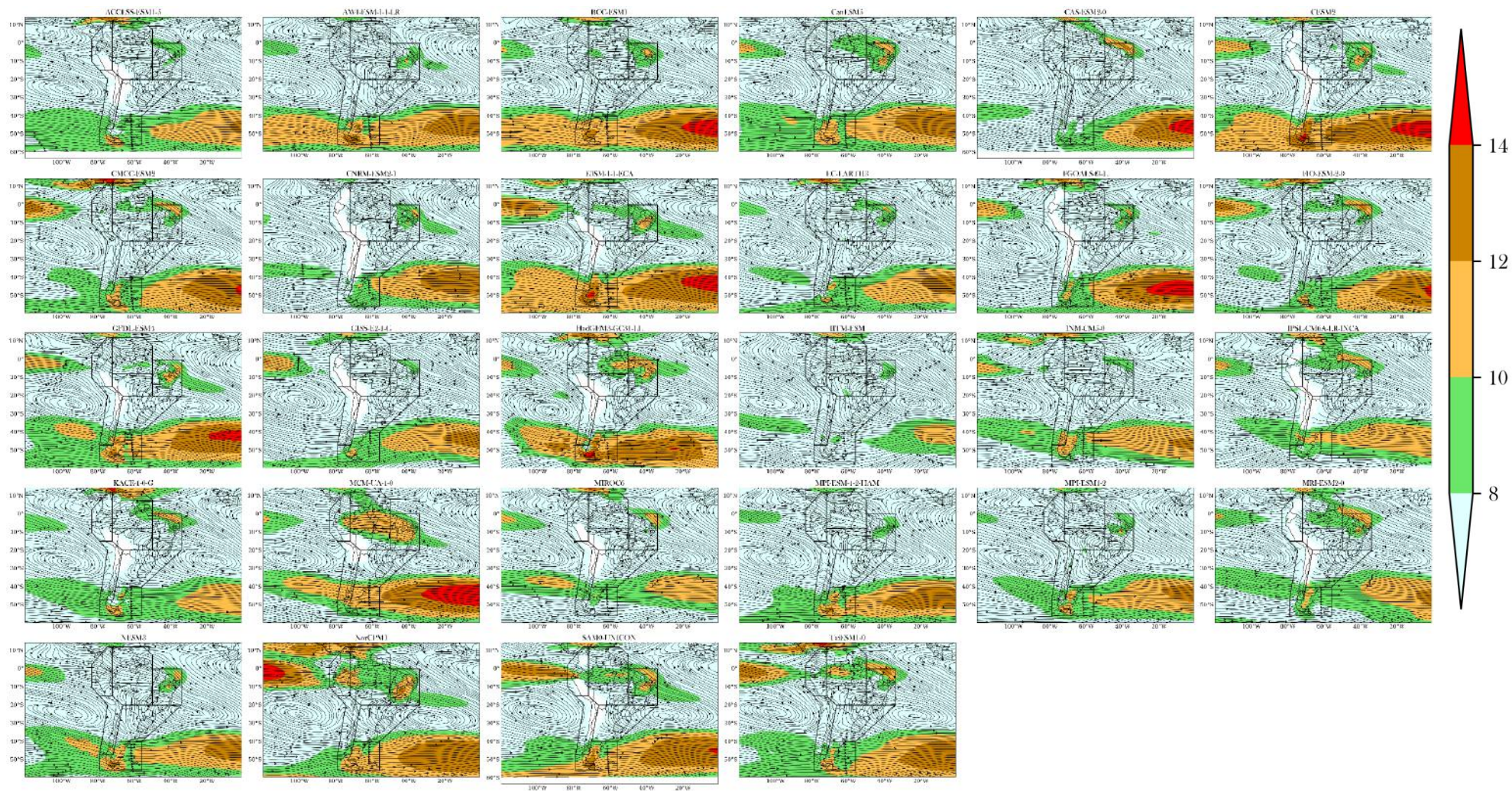


Figura 13 Climatologia (1995-2014) dos campos de linha de corrente e magnitude (m/s) do vento em baixos níveis (850 hPa) referente ao inverno austral, elaborada a partir dos 28 modelos CMIP6

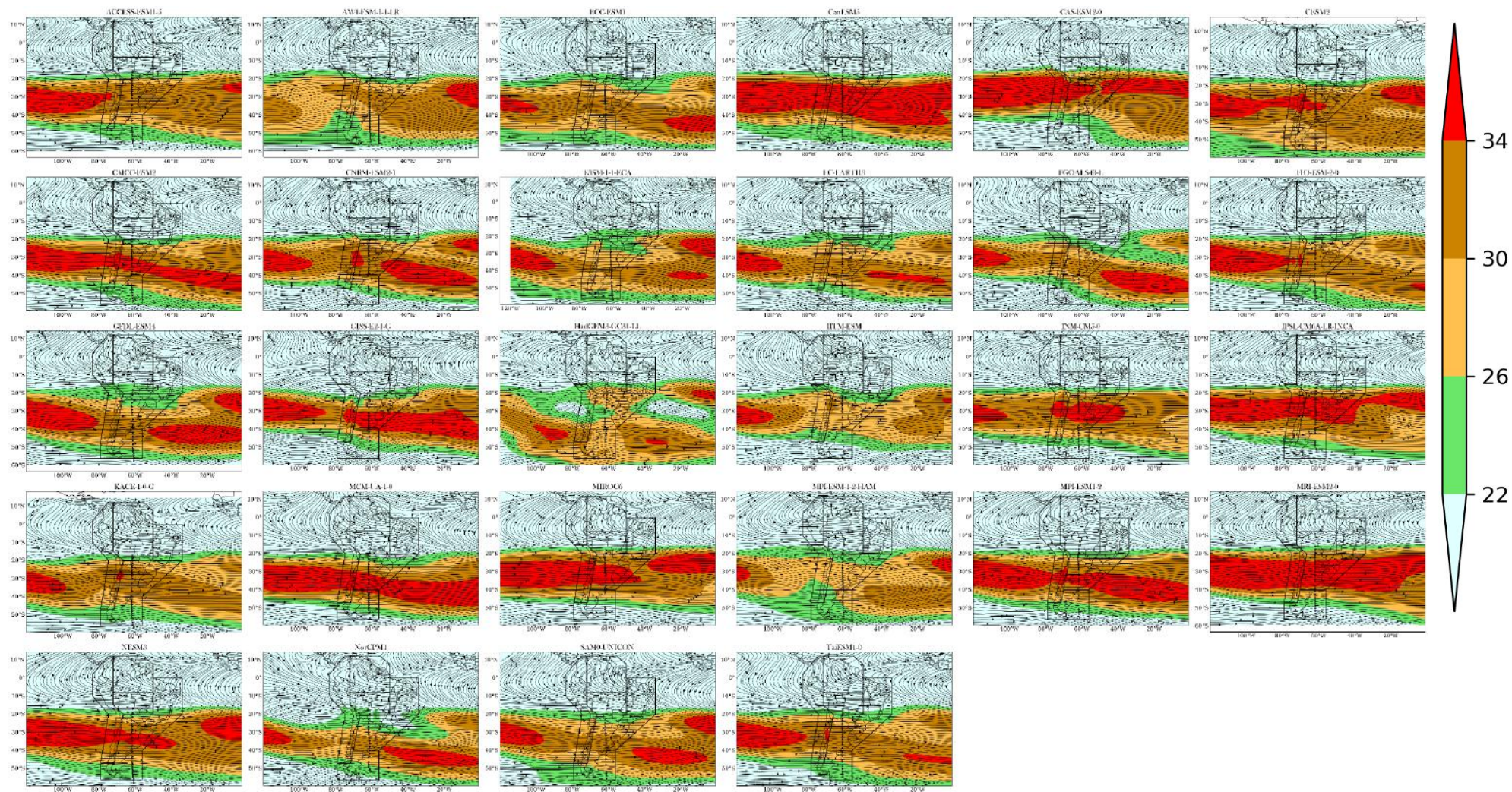


Figura 14 Climatologias (1995-2014) dos campos de linha de corrente e magnitude (m/s) do vento em altos níveis (250 hPa) referente ao inverno austral, elaboradas a partir dos 28 modelos CMIP6.

### 3.2.4. Síntese da Avaliação Subjetiva

A partir da avaliação subjetiva apresentada nesta seção, considerando os resultados apresentados no verão e no inverno, foram selecionados os 10 modelos com melhor performance na AS (Top10-CMIP6-AS): ACCESS-ESM1-5, CESM2, CMCC-ESM2, EC-EARTH3, FIO-ESM-2-0, KACE-1-0-G, MIROC6, MRI-ESM2-0, SAM0-UNICON e TaiESM1-0. Dentre esses 10 modelos, 5 se destacam (Top5-CMIP6-AS): ACCESS-ESM1-5, EC-EARTH3, FIO-ESM2-0, KACE-1-0-G e MRI-ESM2-0.

Em relação às configurações dos modelos com melhor desempenho, somente quatro dos dez modelos selecionados não dispõem da componente associada a química da atmosfera, são eles: EC-EARTH3, FIO-ESM-2-0, SAM0-UNICON e TaiESM1-0. Dentro os dez modelos, apenas três (EC-EARTH3, KACE-1-0-G e MIROC6) não contemplam o ciclo de carbono em suas simulações. Na maioria dos modelos os aerossóis são computados das emissões, com exceção do FIO-ESM-2-0, no qual os aerossóis são prescritos.

### 3.3 Avaliação Objetiva

Nesta seção os modelos CMIP6 são avaliados quanto a sua habilidade em representar o total pluviométrico mensal e a temperatura média mensal do ar, considerando o período 1950-2014 (65 anos) para temperatura e 1980-2014 (35 anos) para a precipitação. Para essa avaliação objetiva utilizam-se Diagramas de Taylor para ambas as variáveis e para cada uma das sete regiões da AS contempladas no AR6. Na Figura 15 e Figura 16 são apresentados os diagramas de Taylor construídos com os dados do total pluviométrico mensal (em mm/mês) e da temperatura média do ar (°C), respectivamente.

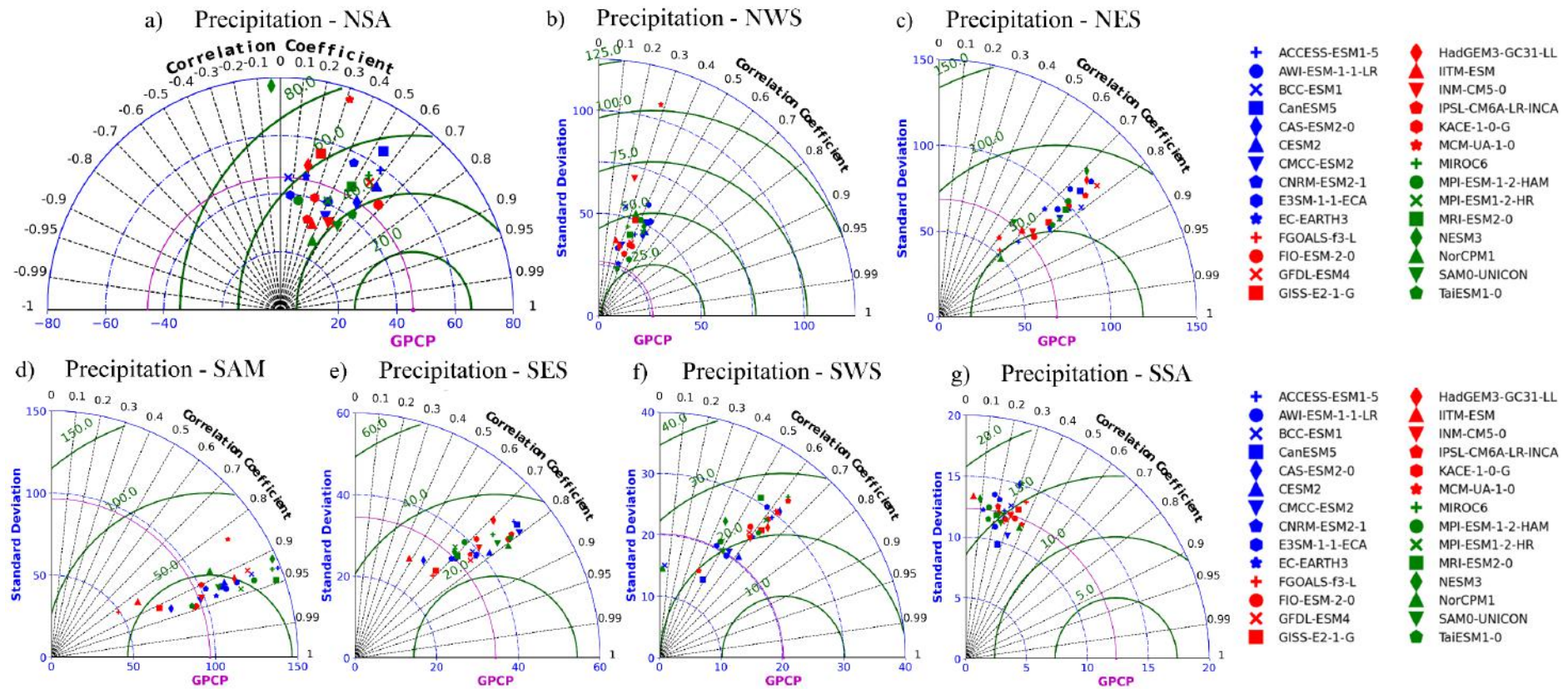


Figura 15 Diagramas de Taylor para as sete regiões pertencentes ao AR6 na AS, elaborados a partir das séries temporais mensais de precipitação acumulada (1980-2014) dos 28 modelos CMIP6 e do GPCP. Nos eixos horizontal e vertical estão os valores dos desvios padrões (DPs) em mm/mês, também representado pelos arcos marcados em linha azul tracejada. A linha rosa sólida marca o desvio padrão da observação (GPCP). A linha radial tracejada preta representa os valores dos coeficientes de correlação temporal (CORR) e por fim, os semicírculos marcados pela linha verde sólida marcam os valores do REQM (em mm/mês).

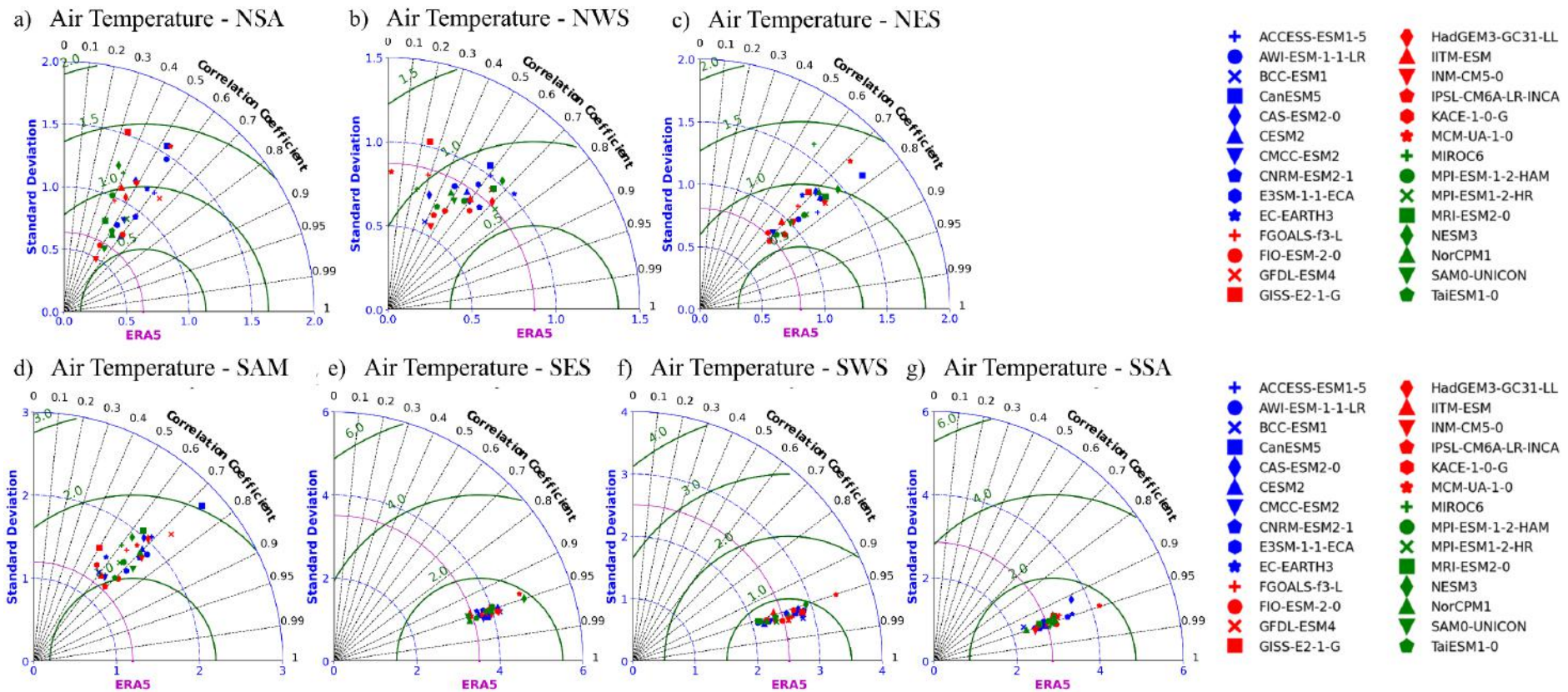


Figura 16 Diagramas de Taylor das sete regiões pertencentes ao AR6 elaborados a partir das séries temporais mensais da temperatura média do ar (1950-2014) dos 28 modelos CMIP6 e da reanálise ERA5. Os eixos horizontal e vertical representam os valores dos desvios padrões em °C/mês, também representado pelos arcos marcados em linha azul tracejada. A linha rosa sólida marca o desvio padrão do dado de referência (ERA5). A linha radial tracejada preta representa os valores dos coeficientes de correlação (CORR) e por fim, os semicírculos marcados pela linha verde sólida marcam os valores do REQM (em °C/mês).

### 3.3.1 NSA

No Norte da América do Sul (NSA) (Figura 15 a), o GPCP apresenta DP de 45,5 mm/mês, enquanto a maioria dos modelos apresenta DP variando entre 20 e 70 mm/mês. A REQM dos modelos não é tão elevada quando comparada com o DP da observação, variando entre 30 e 60 mm/mês, com exceção dos modelos MCM-UA-1-0 e NESM3. A maior parte dos modelos apresenta CORR fraca a moderada, variando entre -0,1 e 0,7. Ademais, nota-se que os modelos divergem bastante entre si quanto aos valores de DP, REQM e CORR. A má performance dos modelos nessa região pode estar associada a dificuldade em simular a ZCIT, a qual tem forte influência no padrão de chuvas do NSA. Dentre os 28 modelos, um se destaca pela baixa performance: NESM3 ( $DP = 77,1$  mm/mês;  $REQM > 80$  mm/mês;  $CORR = -0,04$ ). Por outro lado, o modelo que apresenta melhor performance é o FIO-ESM2.0, com DP próximo da observação (49,5 mm/mês), baixo REQM e maior CORR (0,7).

Em relação a temperatura (Figura 16 a), o ERA5 apresenta DP de 0,6 °C/mês, enquanto a maioria dos modelos apresenta DP variando entre 0,5 e 1,6 °C/mês. A REQM dos modelos é bastante elevada quando comparada ao DP da observação ( $0,7 \leq REQM < 3,0$ ). Os valores de CORR entre os modelos e o ERA5 são baixos, onde as correlações variam entre fraca e moderada. Ademais, o padrão de temperatura do ar sobre o norte da AS está intrinsecamente ligado a precipitação através do aumento/diminuição da nebulosidade, por esse motivo, os modelos também apresentam um desempenho ruim quanto a simulação da temperatura nessa região. Nessa região, somente dois modelos destacam-se pelo bom desempenho, apesar dos valores baixos de CORR, são eles: INM-CM5 ( $DP = 0,5$  °C/mês e  $CORR = 0,5$ ) e IPSL-CM6A-LR-INCA ( $DP = 0,6$  °C/mês e  $CORR = 0,5$ ). O modelo MCM-UA-1-0 destaca-se pela pior performance ( $DP = 1,6$  °C/mês e  $CORR = 0,5$ ).

### 3.3.2 NWS

O Noroeste da América do Sul (NWS; Figura 15 b) é outra região na qual os modelos apresentam uma má performance na representação espacial da chuva. O DP do GPCP é de 26,5 mm/mês, enquanto o DP da maior parte dos modelos oscila entre aproximadamente 25 e 50 mm/mês. Com relação a REQM, 24 modelos apresentam valores entre 25 e 50 mm/mês, ou seja, valores próximos ao DP da observação. A CORR é fraca para a maioria dos modelos, oscilando entre 0,2 e 0,5. Para o NWS o modelo que se destaca negativamente é o MCM-UA-1-0 com DP quatro vezes maior que o valor da observação (107,3 mm/mês),  $REQM > 100$



mm/mês e correlação fraca ( $CORR = 0,3$ ). O modelo com melhor performance é o EC-EARTH3 ( $DP = 27,3$  mm/mês;  $REQM \approx 25$ mm/mês;  $CORR = 0,3$ ), apesar da fraca  $CORR$ .

Na temperatura (Figura 16 b), os modelos também apresentam valores de  $REQM$  elevados ( $REQM > 3,0$  °C/mês) em comparação ao DP do ERA5, que nessa região é  $0,9$  °C/mês. No entanto, a maioria dos modelos é capaz de simular melhor o desvio padrão anual de temperatura, possivelmente porque é uma região com poucas variações sazonais de temperatura. A maior discrepância entre os modelos é na correlação temporal, tendo em vista que alguns modelos apresentam correlação muito fraca e outros forte. Nessa região, dois modelos merecem destaque pela boa performance: EC-EARTH3 ( $DP = 1,0$  °C/mês;  $REQM = 0,7$  °C/mês e  $CORR = 0,7$ ) e MPI-ESM1-2-HR ( $DP = 0,9$  °C/mês;  $REQM = 0,8$  °C/mês e  $CORR = 0,7$ ). Assim como no NSA, o modelo com a pior performance é o MCM-UA-1-0, que apesar da boa performance na representação do DP ( $0,8$  °C/mês), a correlação é muito fraca ( $0,03$ ) e o valor da  $REQM$  muito alto ( $3,8$  °C/mês).

### 3.3.3 NES

No Nordeste da América do Sul (NES; Figura 15 c), a maioria dos modelos apresenta uma correlação forte com relação à precipitação observada ( $0,7 \leq CORR < 0,9$ ). O DP da observação é  $68,3$  mm/mês e grande parte dos modelos tem dificuldade de representar o DP dessa região, dessa forma, os valores variam entre  $49$  e  $121$  mm/mês. Ainda em relação ao DP, o modelo NESM3 apresenta aproximadamente o dobro do DP observado ( $DP = 121$  mm/mês), além do alto valor de  $REQM$  ( $96,6$  mm/mês), apesar da correlação forte ( $0,7$ ). Por fim, três modelos destacam-se pela boa performance na representação da chuva no NES com valores de  $REQM < 60$  mm/mês, são eles: ACCESS-ESM1-5 ( $DP = 63,7$  mm/mês e  $CORR = 0,7$ ), IITM-ESM ( $DP = 69,9$  mm/mês e  $CORR = 0,7$ ) e SAM0-UNICON ( $DP = 70,3$  mm/mês e  $CORR = 0,6$ ).

Em relação a temperatura (Figura 16 c), nota-se um padrão semelhante ao NSA: apenas alguns modelos apresentam um valor de DP próximo do observado ( $0,8$  °C/mês). A distribuição espacial da temperatura é bem representada pela maioria dos modelos, tendo em vista que  $21$  modelos apresentam valores de  $CORR \geq 0,7$  (forte). A  $REQM$  da maioria dos modelos também é baixa comparada a DP do ERA5. No NES, quatro modelos destacam-se pela boa performance: BCC-ESM1 ( $DP = 0,8$  °C/mês e  $CORR = 0,7$ ), FIO-ESM2-0 ( $DP = 0,9$  °C/mês e  $CORR =$

0,7), IPSL-CM6A-LR-INCA ( $DP = 0,8$  °C/mês e  $CORR = 0,7$ ) e TaiESM1-0 ( $DP = 0,8$  °C/mês;  $REQM = 0,6$  °C/mês e  $CORR = 0,7$ ). Em relação a pior performance, apenas dois modelos apresentaram valores de  $REQM > 2,0$  °C/mês, apesar da correlação forte: AWI-ESM-1-1-LR ( $DP = 1,3$  °C/mês e  $CORR = 0,7$ ) e MPI-ESM-1-2-HAM ( $DP = 1,1$  °C/mês e  $CORR = 0,7$ ).

### 3.3.4 SAM

Dentre todas as sete regiões avaliadas, o SAM (Figura 15 d) é a região na qual os modelos apresentam a melhor performance:  $0,8 \leq CORR < 0,95$ ,  $REQM \leq 70$  mm/mês (exceto o MCM-UA-1-0) e metade dos modelos (14) possui valores de DP próximos do observado ( $90 \leq DP \leq 120$  mm/mês). A região do SAM apresenta um ciclo sazonal de chuva bem definido, o que pode estar associado a boa performance dos modelos quanto a correlação temporal. O DP do GPCP é 96,6 mm/mês e, semelhante as outras regiões avaliadas, o modelo MCM-UA-1-0 destaca-se pela baixa performance ( $DP = 129,3$  mm/mês;  $REQM = 77,5$  mm/mês) em simular a precipitação na região do SAM, apesar da correlação forte (0,8). Nessa região, cinco modelos destacam-se pelo bom desempenho: CMCC-ESM2 ( $DP = 97,4$  mm/mês e  $CORR = 0,93$ ), CNRM-ESM2-1 ( $DP = 102,9$  mm/mês e  $CORR = 0,91$ ), EC-EARTH3 ( $DP = 107,2$  mm/mês e  $CORR = 0,94$ ), FIO-ESM2-0 ( $DP = 93,4$  mm/mês e  $CORR = 0,94$ ), INM-CM5 ( $DP = 98,4$  mm/mês e  $CORR = 0,93$ ), IPSL-CM6A-LR-INCA ( $DP = 92,3$  mm/mês e  $CORR = 0,94$ ) e TaiESM1-0 ( $DP = 91,1$  mm/mês e  $CORR = 0,94$ ).

Na região de Monção da AS (Figura 16 d), as variações de temperatura estão associadas a entrada de massas de ar frio ao longo do ano e ao aumento/redução da nebulosidade, principalmente no verão austral, quando ocorre o pico da estação chuvosa. No SAM, a REQM dos modelos não é tão elevada quando comparada ao DP do observado (1,2 °C/mês). A correlação temporal dos modelos varia entre moderada e forte. O DP do observado é bem representado pela maioria dos modelos indicando que uma boa performance em simular a variação temporal da temperatura. Sendo assim, o modelo IPSL-CM6A-LR-INCA (CanESM5) destaca-se pelo melhor desempenho com  $DP = 1,2$  °C/mês e  $CORR = 0,7$  ( $DP = 2,8$  °C/mês e  $CORR = 0,7$ ).

### 3.3.5 SES

No Sudeste da América do Sul (SES; Figura 15 e), a maioria dos modelos apresenta uma correlação temporal forte ( $0,7 \leq CORR \leq 0,8$ ). Apenas dois modelos apresentam uma correlação moderada, são eles: CAS-ESM2-0 ( $CORR = 0,6$ ) e IITM-ESM ( $CORR = 0,5$ ). O DP do observado é 34,4 mm/mês e o SES é a segunda região na qual a maioria os modelos apresenta uma boa performance na representação do desvio padrão anual da chuva ( $29 \leq DP \leq 50$  mm/mês). A REQM dos modelos não é tão elevada quando comparada ao DP do GPCP ( $20 < REQM < 40$  mm/mês). Sendo assim, os modelos EC-EARTH3 ( $DP = 38,6$  mm/mês e  $CORR = 0,8$ ) e AWI-ESM-1-1-LR ( $DP = 34,7$  mm/mês e  $CORR = 0,7$ ) destacam-se pelo bom desempenho em representar a chuva no SES, enquanto o modelo IITM-ESM ( $DP = 27,7$  mm/mês e  $CORR = 0,5$ ) se destaca pela pior performance.

Em relação a temperatura do ar (Figura 16 e), o SES é uma das três regiões na qual os modelos apresentam um bom desempenho na representação da temperatura, tendo em vista que os valores de correlação são altos ( $CORR \geq 0,9$  – muito forte). A REQM dos modelos também é pequena comparada ao DP da reanálise (3,5 °C/mês). Além disso, os modelos apresentam uma boa performance na representação da variação temporal da temperatura ( $3,5 \leq DP \leq 5$ ). O modelo com melhor desempenho é o MCM-UA-1-0 com DP igual do observado, baixo valor da REQM (1,0 °C/mês) e  $CORR = 0,96$ .

### 3.3.6 SWS

No SWS (Figura 15 f), a maioria dos modelos possui correlação moderada ( $0,5 \leq CORR < 0,7$ ). Dois modelos se destacam pela fraca ou nenhuma correlação temporal: BCC-ESM1 (0,06) e NorCPM1 (0,03). O DP do GPCP é 20,2 mm/mês e quatro dos vinte e oito modelos têm um valor de DP igual/muito próximo do observado, são eles: CESM2 (20,9 mm/mês), CMCC-ESM2 (20,7 mm/mês), E3SM-1-1-ECA (20,5 mm/mês) e SAM0-UNICON (20,2 mm/mês). Todos os modelos apresentaram valores de REQM próximos ao DP observado, com exceção de quatro deles: CAS-ESM2-0 (43,8 mm/mês), CNRM-ESM2-1 (45,5 mm/mês), IPSL-CM6A-LR-INCA (43,5 mm/mês) e MRI-ESM2-0 (46,7 mm/mês). O modelo que se destaca pela melhor performance é o EC-EARTH3 ( $DP = 24,8$  mm/mês;  $REQM = 29,7$  mm/mês;  $CORR = 0,6$ ).

Em relação a temperatura do ar (Figura 16 f), o SWS é a região na qual os modelos demonstraram a melhor performance quanto a representação da temperatura média do ar.

Destaca-se, primeiramente, os valores de  $REQM < 1 \text{ }^\circ\text{C/mês}$  (exceto para o MCM-UA-1-0) inferiores ao DP do ERA5 ( $2,5 \text{ }^\circ\text{C/mês}$ ). Além disso, a correlação temporal dos modelos é muito forte ( $CORR \geq 0,95$ ). O DP também é bem simulado pelos modelos ( $2,0 < DP < 3,5 \text{ }^\circ\text{C/mês}$ ). Dentre os 28 modelos, somente 1 se destaca pelo pior desempenho apesar do alto valor de correlação espacial (0,95): MCM-UA-1-0 ( $DP = 3,4 \text{ }^\circ\text{C/mês}$ ).

### 3.3.7 SSA

O Sul da América do Sul (SSA; Figura 15 g) é a região na qual os modelos representam melhor o desvio padrão anual da precipitação: o DP do observado é  $12,4 \text{ mm/mês}$  enquanto o DP dos modelos varia entre  $9,7$  e  $15,1 \text{ mm/mês}$ . No SSA, os totais pluviométricos são menores em comparação às demais regiões, por esse motivo, os modelos são capazes de simular adequadamente o desvio padrão da chuva. O SSA também é a região na qual os modelos apresentaram os menores valores de  $REQM$  ( $10 < REQM < 20 \text{ mm/mês}$ ). Apesar disso, é a região na qual os modelos apresentam a pior correlação temporal ( $0 < CORR \leq 4$ ). Nesse sentido, o FIO-ESM-2-0 (IITM-ESM) é o modelo que melhor (pior) representa a chuva no SSA com valores de  $DP = 12,2 \text{ mm/mês}$  e  $CORR = 0,3$  ( $DP = 13,4 \text{ mm/mês}$  e  $CORR = 0,05$ ).

Assim como nas regiões do SES e SWS, os modelos também apresentam um bom desempenho na representação da temperatura do ar no SSA (Figura 16 g). O DP observado é  $2,9 \text{ }^\circ\text{C/mês}$  e a maioria dos modelos têm valores de DP entre  $2,0$  e  $3,5 \text{ }^\circ\text{C/mês}$ , exceto o CAS-ESM2-0 e o MCM-UA-1-0. A  $REQM$  dos modelos é baixa, inferior a  $2,5 \text{ }^\circ\text{C/mês}$ . Em relação a correlação temporal, os valores de  $CORR$  dos modelos são superiores a  $0,9$ , indicando uma correlação forte. Nessa região, o modelo que se destaca pela melhor performance é o MPI-ESM-1-2-HAM ( $DP = 2,9 \text{ }^\circ\text{C/mês}$  e  $CORR = 0,9$ ).

### **3.3.8 Síntese da Avaliação Objetiva**

No geral, é evidente que os modelos apresentam a pior performance na representação da precipitação nos extremos norte (NSA e NWS) e sul (SWS e SSA) da AS, onde a correlação varia entre muito fraca e fraca. Sobre a representação do DP da precipitação simulada, os modelos apresentam o melhor desempenho em regiões com menores totais pluviométricos, como o SSA. De forma geral, a região na qual os modelos apresentaram a melhor (pior) performance foi a SAM (SWS). Além disso, todos os 10 modelos que se destacaram positivamente na avaliação subjetiva, também apresentaram uma performance boa e/ou razoável para simular a precipitação na avaliação objetiva.

Em relação a temperatura média do ar, os modelos apresentam a pior performance no norte da AS (NSA, NWS e NES) e na região do SAM, onde a correlação varia entre muito fraca e moderada. Sobre a representação do DP da temperatura do ar simulada pelos modelos, os modelos apresentam o melhor desempenho no sul da AS (SES, SWS e SSA). Além disso, os valores de correlação temporal nessas regiões são superiores a 0,9 (muito forte). Por fim, a região na qual os modelos apresentaram a melhor (pior) performance foi o SWS (NSA).

### **3.4. Comparação dos conjuntos 28-CMIP6, Top10-CMIP6-AS e Top5-CMIP6-AS**

Nesta seção os três conjuntos de modelos (28-CMIP6, Top10-CMIP6-AS e Top5-CMIP6-AS) são comparados quanto às suas habilidades em representar as climatologias da precipitação para o verão e o inverno austrais, contrapondo-os ao GPCP. Ademais, também são apresentados os ciclos anuais da precipitação e da temperatura média do ar para as sete regiões contempladas no AR6, considerando o período 1950-2014 (65 anos) para temperatura e 1980-2014 (35 anos) para precipitação. O principal objetivo desta etapa é verificar se há melhorias entre os conjuntos Top10-CMIP6-AS e Top5-CMIP6-AS em comparação ao conjunto 28-CMIP6.

Na Figura 17, são apresentadas as climatologias sazonais da precipitação elaboradas a partir do GPCP e dos 3 conjuntos CMIP6. Além disso, na Figura 18, também são apresentados os campos do viés espacial da precipitação para os mesmos conjuntos em relação ao observado. Durante o verão, a atuação da ZCIT sobre o Oceano Pacífico é melhor simulada pela média dos

28 modelos (Figura 17 b), apresentando-se como uma banda única. Por outro lado, sobre o Oceano Atlântico não são observadas melhorias significativas entre os conjuntos, onde os três configuram a ZCIT com banda-dupla sobre a mesma região. Na Seção 3.1 foi destacado que todos os modelos deslocam a ZCIT para o sul a partir da sua posição climatológica, tal qual é observado na Figura 17. No interior do continente, os 3 conjuntos têm uma performance bastante semelhante: déficit de precipitação sobre o NSA e um viés positivo sobre NES, NWS e SSA. No inverno, a principal mudança pode ser observada na representação da ZCIT sobre o Oceano Atlântico, que é melhor simulada pelos conjuntos Top10 e Top5 (Figura 17 g, h). Os totais pluviométricos sobre o SES e o NSA são melhor representados pelo conjunto Top5-CMIP6-AS (Figura 17 h e Figura 18 f). Em geral, não é possível identificar diferenças significativas entre os três conjuntos (28-CMIP6, Top10-CMIP6-AS, Top5-CMIP6-AS).

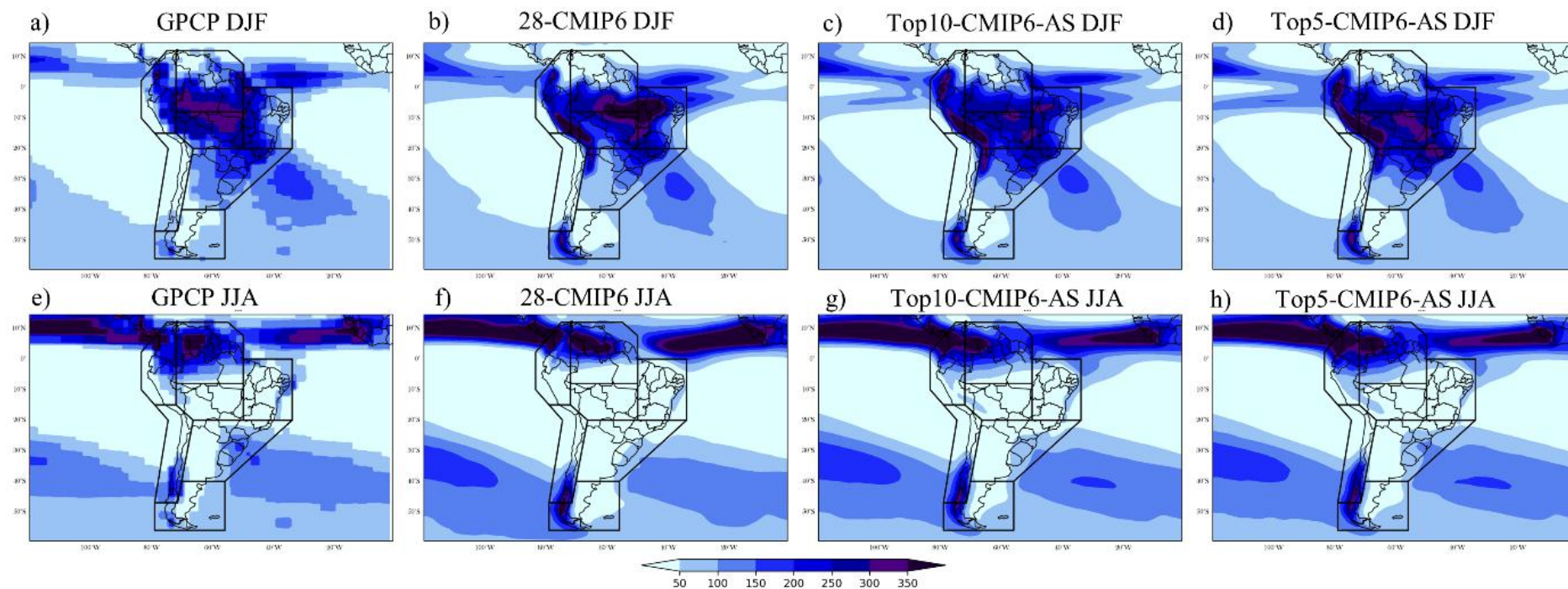


Figura 17 Climatologia da precipitação (mm/mês) durante o verão (painel superior) e inverno (painel inferior) austrais elaboradas a partir do GPCP e dos conjuntos 28-CMIP6, Top10-CMIP6-AS e Top5-CMIP6-AS.

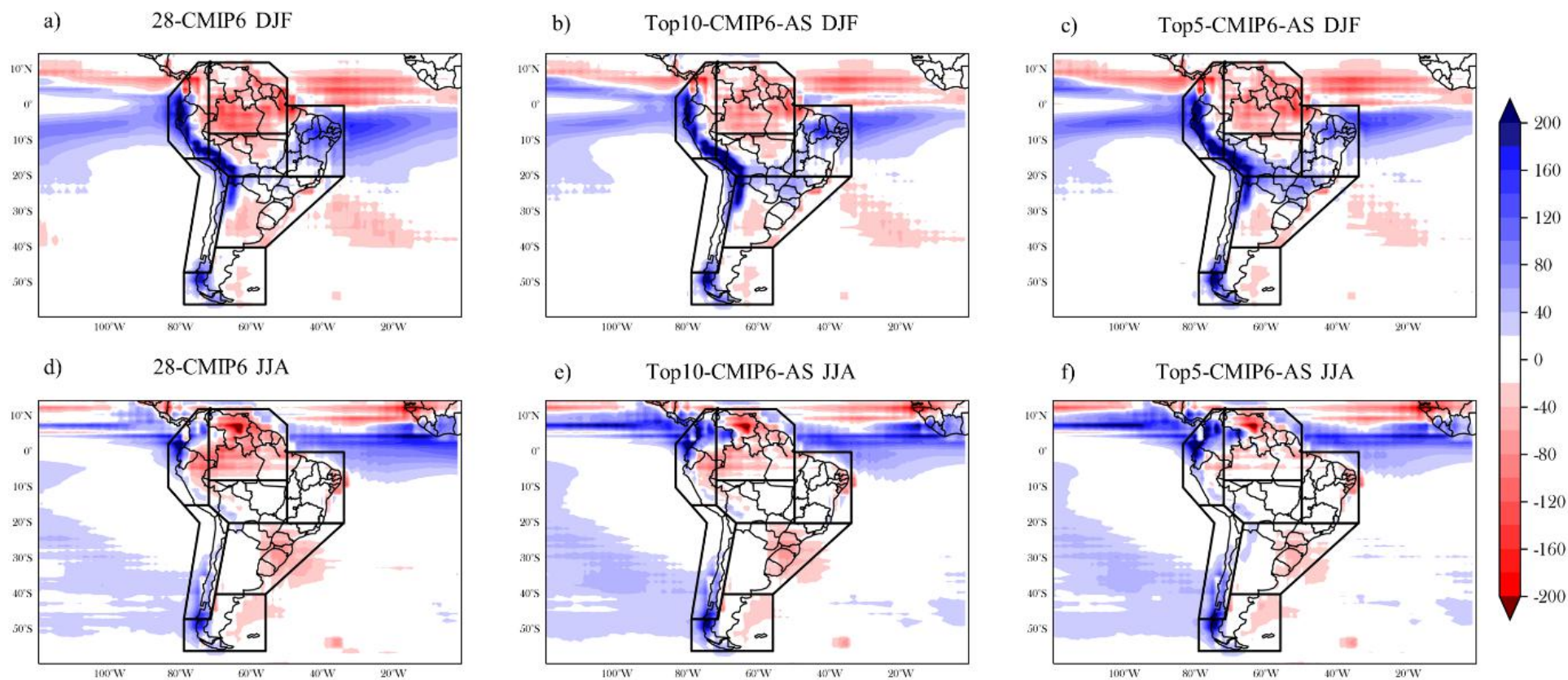


Figura 18 Viés da precipitação (mm/mês) de verão (painel superior) e de inverno (painel inferior) para os conjuntos de modelos (28-CMIP6, Top10-CMIP6-AS e Top5-CMIP6) em relação ao GPCP.



Na Figura 19 são apresentados os ciclos anuais da precipitação para as sete regiões do AR6 elaborados a partir dos 3 conjuntos CMIP6 e o GPCP. Sobre o NSA, os três conjuntos subestimam a precipitação, contudo o Top10-CMIP6-AS apresenta uma melhora significativa na representação do ciclo anual da precipitação em comparação ao 28-CMIP6, com máximo em maio e mínimo em setembro, e valores mais próximos ao observado, assim como mostra o ciclo anual do GPCP. O conjunto Top5-CMIP6-AS apresenta o máximo de precipitação em junho, ou seja, com um mês de atraso. No NWS, ocorre superestimativa da precipitação nos três conjuntos, e mais uma vez o Top10-CMIP6 se sobressai, exibindo máximo em abril e mínimo em agosto, assim como observado. Importante ressaltar que ambas (NSA e NWS) são regiões nas quais os modelos apresentam a pior performance na representação espacial da precipitação, como discutido na Seção 3.2.1. Sobre o NES, a habilidade dos conjuntos pra representar o ciclo anual é satisfatória, apesar da superestimativa de janeiro a maio, e da leve subestimativa de julho a novembro. Nessa região, mais uma vez a performance do Top10-CMIP6-AS destaca-se positivamente. O SAM é a região na qual os modelos apresentam o melhor desempenho, como foi destacado na Seção 3.3.4. Nessa região, o conjunto 28-CMIP6 apresenta performance ligeiramente melhor que os demais. Sobre o SES, os três conjuntos subestimam a precipitação na maior parte do ano e representam adequadamente seu ciclo anual, sendo o Top5-CMIP6-AS o conjunto com melhor performance. No SWS, além da precipitação ser superestimada pelos três conjuntos, o máximo que deveria ocorrer em maio-junho, é simulado com um mês de atraso (em junho-julho). Nessa região destaca-se o 28-CMIP6 com valores mais próximo ao GPCP. Finalmente, para o SSA o ciclo anual não é bem representado por nenhum dos três conjuntos, mas de qualquer forma, os valores do conjunto 28-CMIP6 estão mais próximos à observação. No decorrer da avaliação apresentada nas Seções 3.2 e 3.3, foi observado que as regiões que compõem o sul da AS (SSA e SWS) são aquelas nas quais os modelos enfrentam dificuldade em reproduzir os padrões espaciais e temporais de precipitação. No caso do SSA, essa característica também se reflete no ciclo anual, na qual os três conjuntos não foram capazes de simular adequadamente os totais pluviométricos observados, sobretudo durante o inverno.

## Ciclo Anual da Precipitação

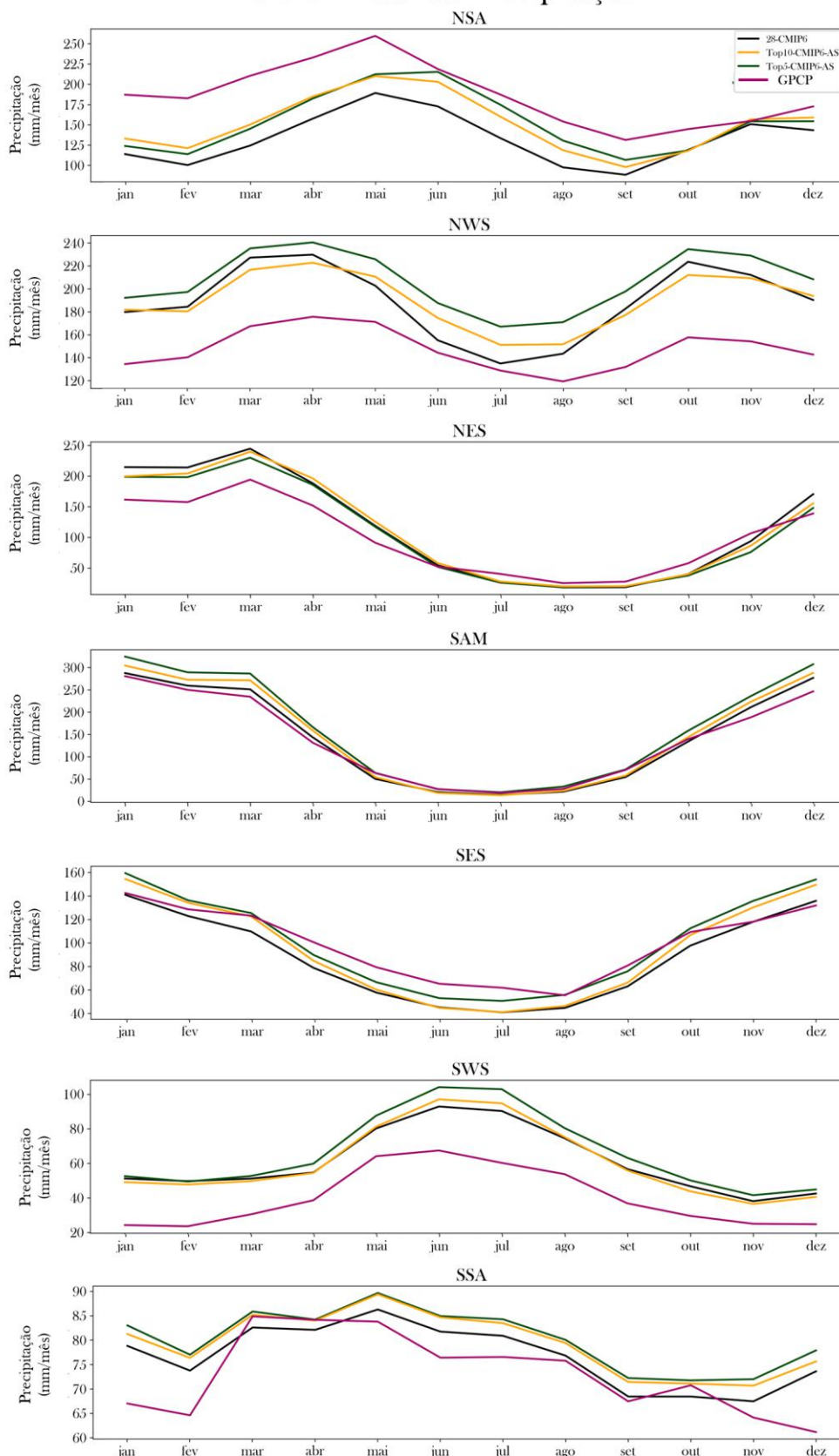


Figura 19 Ciclo anual da precipitação para a observação (GPCP - linha rosa) e os conjuntos 28-CMIP6 (linha preta), Top10-CMIP6-AS (linha laranja) e Top5-CMIP6-AS (linha verde) calculado sobre o período 1980-2014 para as 7 regiões contempladas no AR6.

Em relação a temperatura média do ar, são apresentados os ciclos anuais na Figura 20 para as sete regiões do AR6 elaborados a partir dos três conjuntos CMIP6 e o ERA5. Sobre o NSA, todos os conjuntos superestimam a temperatura na maior parte do ano e antecipam o mínimo em um mês em relação ao observado, que de fato ocorre em julho. Os máximos que ocorrem em setembro e outubro são melhor representados pelos conjuntos Top5-CMIP6-AS e Top10-CMIP6-AS. No NWS também ocorre superestimativa da temperatura, sendo o Top10-CMIP6-AS o conjunto que se apresenta a melhor performance. Sobre o NES observa-se subestimativa da temperatura do ar na maior parte do ano e a performance dos conjuntos Top10-CMIP6-AS e Top5-CMIP6-AS apresenta uma melhora em relação ao 28-CMIP6. No SAM, os conjuntos apresentam um ciclo anual mais pronunciado, superestimando as temperaturas nos meses quentes e subestimando-a nos meses mais frios do ano. Nessa região (SAM) o Top10-CMIP6-AS e Top5-CMIP6-AS apresentam uma ligeira melhora em relação ao 28-CMIP6. No SES, no SWS e no SSA os conjuntos fazem uma ótima representação do ciclo anual da temperatura, apesar da superestimativa ao longo de todo o ano que ocorre no SWS. Nessas três regiões destacam-se como melhores conjuntos, o Top5-CMIP6-AS no SES e o 28-CMIP6 no SWS e no SSA.

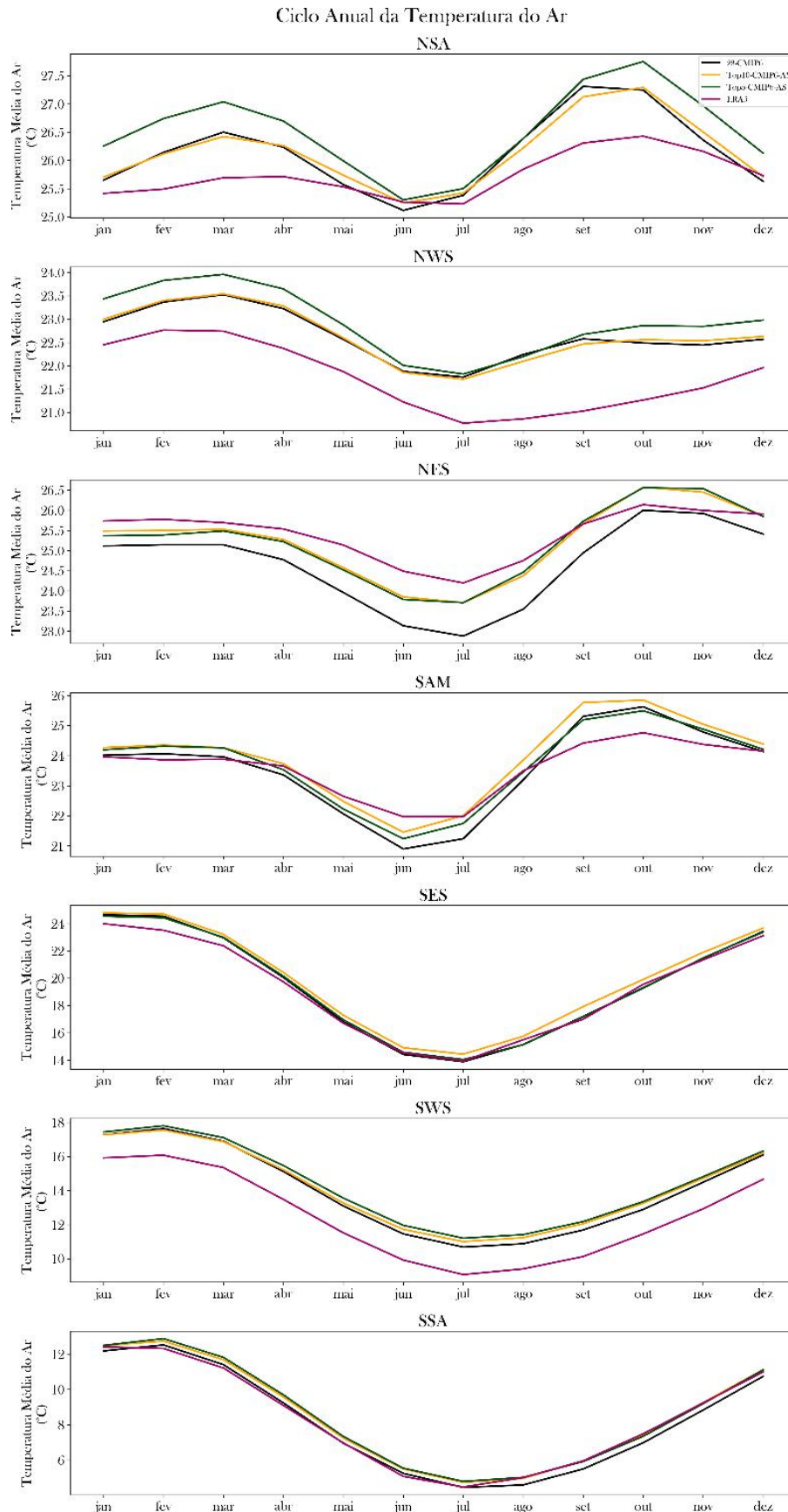


Figura 20 Ciclo anual da temperatura média do ar para o observado (ERA5 - linha rosa) e os conjuntos CMIP6 (linha preta), CMIP6-AS 5 (linha verde) e CMIP6-AS 10 (linha laranja) calculado sobre o período 1980-2014 para as 7 regiões contempladas no AR6.

## 4. Conclusões

O presente estudo avalia a performance de 28 modelos CMIP6 na representação do clima presente (1995-2014) na AS. As climatologias de verão e inverno da precipitação, temperatura do ar, PNMM e vento em baixos e altos níveis são avaliadas espacialmente, de forma subjetiva. A partir da avaliação subjetiva, selecionam-se os 10 melhores modelos, e desses os 5 melhores para simular o clima na AS. Uma avaliação objetiva das séries de precipitação e de temperatura do ar considerando cada um dos 28 modelos é elaborada para as sete regiões do CMIP6 na AS. O conjunto formado pelos 10 (Top10-CMIP6-AS) e pelos 5 (Top5-CMIP6-AS) melhores modelos para a AS, são confrontados com o conjunto formado pelos 28 (28-CMIP6) modelos CMIP6 utilizados neste estudo. Uma avaliação espacial desses três conjuntos é elaborada, confrontando-os com dados observacionais e de reanálise. Ademais, os ciclos anuais da precipitação e da temperatura do ar dos três conjuntos são comparados para determinar se seria mais vantajoso trabalhar com um conjunto pré-selecionado de modelos (Top10-CMIP6-AS ou Top5-CMIP6-AS) do que com o conjunto total. É interessante ressaltar que dentre os sete modelos apontados com o melhor desempenho no estudo de DIAS, REBOITA, (2021), apenas dois (EC-EARTH3 e TaiESM1-0) compõem o Top10-CMIP6-AS do presente estudo. Isso se deve ao fato de que o conjunto dos modelos contemplados na avaliação dos autores foi diferente daqueles utilizados no presente estudo. Além disso, o trabalho de DIAS, REBOITA, (2021) se restringe ao estudo da representação do clima na AS tropical e, portanto, não engloba as regiões do SSA, SWS, e, o NSA e NWS como um todo, e são nessas regiões que os modelos apresentam maior dificuldade na representação espacial e temporal das variáveis analisadas, sobretudo a precipitação.

Os resultados da avaliação subjetiva dos padrões espaciais da precipitação, mostram que todos os modelos apresentam um desempenho melhor no inverno, que é a estação seca para a maior parte do continente sul americano, comparativamente à estação chuvosa (verão), como já observado em ORTEGA *et al.*, (2021b). Durante o verão, todos os modelos apresentam um viés de ZCIT dupla muito comum em modelos climáticos globais, associado a má representação do acoplamento oceano-atmosfera, sobretudo no Pacífico Tropical (ADAM *et al.*, 2017; ORTEGA *et al.*, 2021b; TIAN; DONG, 2020). Outra característica comum a todos os modelos é a subestimativa da precipitação sobre o NSA e superestimativa no NWS, no SWS e no NES no verão. Por outro lado, os modelos são capazes de simular razoavelmente os padrões de temperatura do ar, com exceção do viés frio simulado no NES pela maioria dos modelos. No

geral, o ASAS e ASPS são bem representados pelos modelos. Em altos níveis, somente 10 modelos não são capazes de representar adequadamente o CNEB e a AB, resultando na má simulação da ZCAS por parte desses modelos.

Durante o inverno, a ZCIT é representada adequadamente pelos modelos, no entanto, eles tendem a subestimar a faixa de precipitação que se estende sobre o Atlântico. Outra característica comum é o excesso (déficit) de precipitação sobre o sul do SWS (norte do NSA e norte do NWS). Assim como no verão, os modelos também apresentam um desempenho razoável na simulação dos padrões espaciais de temperatura média do ar. O ASAS e ASPS são bem representados, alinhados à boa simulação dos ventos alísios de sudeste. Nos altos níveis, todos os modelos superestimam a magnitude dos Jatos Subtropical e Polar.

Com relação à avaliação objetiva da precipitação e da temperatura do ar, nota-se que todos os modelos que compõem o conjunto Top10-CMIP6-AS apresentam uma performance boa e/ou razoável na análise objetiva. Os resultados mostram que os modelos apresentam a pior performance na representação da precipitação nos extremos norte (NWS e NSA) e sul (SWS) da AS, alinhado ao que foi observado na análise subjetiva. Nas regiões do NES, SAM e SES, os modelos EC-EARTH3 e FIO-ESM2-0 (MCM-UA-1-0 e NESM3) são os que apresentam a melhor (pior) performance. Na avaliação objetiva da temperatura média do ar, verifica-se que os modelos apresentam uma boa performance, no entanto, sobre o NSA e NWS os modelos apresentam os menores valores de correlação. A variação temporal da temperatura no sul da AS é melhor representada pelos modelos em comparação às demais regiões do AR6.

Os resultados da avaliação do ciclo anual mostram que o desempenho dos conjuntos AS (Top5-CMIP6-AS e Top10-CMIP6-AS) em comparação ao GPCP/ERA5 depende da região analisada, enquanto as melhorias observadas entre os conjuntos AS em relação ao conjunto 28-CMIP6 são mais evidentes nas regiões nas quais os modelos apresentam a pior performance nas avaliações subjetiva e objetiva, como no NSA e NWS, para precipitação, e no NSA e NES, para a temperatura. Além disso, nota-se que os conjuntos Top10-CMIP6-AS e Top5-CMIP6-AS continuam apresentando as mesmas dificuldades observadas no conjunto 28-CMIP6 na representação do ciclo anual da precipitação no NSA e NWS (SWS) com a antecipação do pico mínimo (máximo) de chuvas. Nas regiões do SAM e SES, os conjuntos fazem uma representação boa e/ou satisfatória do ciclo anual da temperatura e precipitação. A dificuldade em encontrar um conjunto que melhor represente todo o clima na AS ocorre devido a sua grande

diversidade climática. Dessa forma, a escolha dos modelos deve ser feita baseada na região e variável de interesse, de cada pesquisa.

Em relação aos modelos selecionados pelo bom desempenho, os que mais se destacam positivamente são aqueles que compõem o conjunto Top10-CMIP6-AS: ACCESS-ESM1-5, EC-EARTH3, FIO-ESM2-0, KACE-1-0-G e MRI-ESM2-0. Estes apresentam uma boa performance na representação da ZCIT, JS e JP, além da AB e CNEB, que são sistemas característicos que atuam durante a primavera e verão austral na AS. Em contrapartida, a utilização dos modelos AWI-ESM-1-1-LR, CAS-ESM2-0, IITM-ESM e NESM3 não é recomendada para estudos sobre a AS, tendo em vista o péssimo desempenho apresentado pelos mesmos em todas as avaliações. Além disso, esses modelos também não são capazes de capturar os principais sistemas climatológicos que atuam na AS, como a AB e o CNEB, além de apresentarem a pior performance na representação da ZCIT, dentre todos os 28 modelos avaliados no presente estudo. Na configuração desses modelos, nenhum deles contempla a componente química da atmosfera e os aerossóis são prescritos nas simulações.

Através dos resultados encontrados no presente trabalho, é evidente que o desempenho dos modelos depende da região de estudo e que não é possível selecionar um único conjunto que apresente uma boa performance em todas as regiões da AS. A má performance dos modelos no NSA e NWS pode estar atrelada sobretudo a dificuldade em simular o posicionamento da ZCIT, que tem forte impacto no padrão de chuvas nessas regiões. Enquanto no SSA e SWS, essa má performance pode estar relacionada a má representação das correntes de jato, além da influência da orografia da Cordilheira dos Andes. Uma das limitações deste trabalho é a ausência de uma análise estatística mais aprofundada, a fim de identificar a natureza dos erros encontrados e propor um diagnóstico do(s) modelo(s) em busca da causa do erro. Além disso, também é necessário verificar se os modelos que compõem o Top10-CMIP6-AS também são capazes de capturar as tendências observadas de aumento/redução nos extremos de temperatura e precipitação no clima presente, tais como a tendência de aumento de eventos extremos de precipitação no sul do Brasil (REGOTO *et al.*, 2021).

Espera-se que este trabalho possa servir de apoio para outros cientistas que necessitem selecionar modelos CMIP6 em suas pesquisas na AS. Nesse sentido é importante ressaltar, que apesar dos 10 modelos aqui selecionados apresentarem boa/razoável performance para representar os principais sistemas meteorológicos nos baixos e altos níveis da atmosfera, isso

não garante que mantenham o mesmo desempenho na representação de todas as demais variáveis. Dessa forma recomenda-se avaliar a climatologia da variável de interesse no clima de referência, antes de utilizar suas projeções.



## 5. Referências

- ADAM, Ori; SCHNEIDER, Tapio; BRIENT, Florent. Regional and seasonal variations of the double-ITCZ bias in CMIP5 models. **Climate Dynamics** **2017** **51:1**, [s. l.], v. 51, n. 1, p. 101–117, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-017-3909-1>. Acesso em: 8 nov. 2022.
- ADLER, Robert F. *et al.* The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). **Journal of Hydrometeorology**, [s. l.], v. 4, n. 6, p. 1147–1167, 2003.
- ALMAZROUI, Mansour *et al.* Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. **Earth Systems and Environment** **2021** **5:2**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 155–183, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41748-021-00233-6>. Acesso em: 8 nov. 2022.
- ARIAS, Paola *et al.* Climate change in South America: new insights from the most recent IPCC assessment report. **AGUFM**, [s. l.], v. 2021, p. GC51B-05, 2021. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021AGUFMGC51B..05A/abstract>. Acesso em: 8 nov. 2022.
- BELLUCCI, A.; GUALDI, S.; NAVARRA, A. The Double-ITCZ Syndrome in Coupled General Circulation Models: The Role of Large-Scale Vertical Circulation Regimes. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 23, n. 5, p. 1127–1145, 2010. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/23/5/2009jcli3002.1.xml>. Acesso em: 8 nov. 2022.
- DERECZYNSKI, Claudine *et al.* Downscaling of climate extremes over South America – Part I: Model evaluation in the reference climate. **Weather and Climate Extremes**, [s. l.], v. 29, p. 100273, 2020.
- DIAS, Cássia Gabriele; REBOITA, Michelle Simões. Assessment of CMIP6 Simulations over Tropical South America. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 1282–1295, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/249703>. Acesso em: 8 nov. 2022.
- FOSS, Marilei; CHOU, Sin Chan; SELUCHI, Marcelo Enrique. Interaction of cold fronts with the Brazilian Plateau: a climatological analysis. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 37, n. 9, p. 3644–3659, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.4945>. Acesso em: 8 nov. 2022.
- GOMES, Helber B. *et al.* Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. **Climate Dynamics** **2019** **53:3**, [s. l.], v. 53, n. 3, p. 1393–1411, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-019-04667-7>. Acesso em: 21 nov. 2022.
- HERSBACH, Hans *et al.* The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, [s. l.], p. qj.3803, 2020. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.3803>.

KALNAY, E. *et al.* The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [s. l.], v. 77, n. 3, p. 437–472, 1996. Disponível em: [https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/77/3/1520-0477\\_1996\\_077\\_0437\\_tnyrp\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/77/3/1520-0477_1996_077_0437_tnyrp_2_0_co_2.xml). Acesso em: 8 nov. 2022.

LANGERWISCH, F. *et al.* Potential effects of climate change on inundation patterns in the Amazon Basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 2247–2262, 2013.

LEMES, Murilo da Costa Ruv; REBOITA, Michelle Simões; TORRES, Roger Rodrigues. MUDANÇA NO USO E COBERTURA DA TERRA NA BACIA DO RIO TIETÊ E SEUS IMPACTOS NA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE (TS). **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 27, n. 0, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/68836>. Acesso em: 8 nov. 2022.

LI, Gen; XIE, Shang Ping. Tropical Biases in CMIP5 Multimodel Ensemble: The Excessive Equatorial Pacific Cold Tongue and Double ITCZ Problems. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 1765–1780, 2014. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/27/4/jcli-d-13-00337.1.xml>. Acesso em: 8 nov. 2022.

MONTEVERDE, Corrie; DE SALES, Fernando; JONES, Charles. Evaluation of the CMIP6 Performance in Simulating Precipitation in the Amazon River Basin. **Climate 2022, Vol. 10, Page 122**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 122, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2225-1154/10/8/122/htm>. Acesso em: 26 nov. 2022.

MUKAKA, Mavuto; MOULTON, Lawrence H. Comparison of empirical study power in sample size calculation approaches for cluster randomized trials with varying cluster sizes and a continuous outcome endpoint. **Open Access Medical Statistics**, [s. l.], v. 6, p. 1, 2016. Disponível em: [www.dovepress.com](http://www.dovepress.com). Acesso em: 8 nov. 2022.

O'NEILL, Brian C. *et al.* The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, [s. l.], v. 9, n. 9, p. 3461–3482, 2016.

ORTEGA, Geusep *et al.* Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 41, n. 15, p. 6713–6735, 2021a. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.7221>. Acesso em: 8 nov. 2022.

ORTEGA, Geusep *et al.* Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 41, n. 15, p. 6713–6735, 2021b. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.7221>. Acesso em: 22 nov. 2022.

PABÓN-CAICEDO, José Daniel *et al.* Observed and Projected Hydroclimate Changes in the Andes. **Frontiers in Earth Science**, [s. l.], v. 8, p. 61, 2020.

REGOTO, Pedro *et al.* Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 41, n. 11, p. 5125–5142, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.7119>. Acesso em: 8 nov. 2022.

ROBERTSON, Andrew W.; MECHOSO, Carlos R. Interannual and Interdecadal Variability of the South Atlantic Convergence Zone. **Monthly Weather Review**, [s. l.], v. 128, n. 8, p. 2947–2957, 2000. Disponível em: [https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/128/8/1520-0493\\_2000\\_128\\_2947\\_iaivot\\_2.0.co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/128/8/1520-0493_2000_128_2947_iaivot_2.0.co_2.xml). Acesso em: 21 nov. 2022.

SCHNEIDER, Tapio; BISCHOFF, Tobias; HAUG, Gerald H. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. **Nature** 2014 **513:7516**, [s. l.], v. 513, n. 7516, p. 45–53, 2014. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature13636>. Acesso em: 8 nov. 2022.

SUN, Xiaoming; COOK, Kerry H.; VIZY, Edward K. The South Atlantic Subtropical High: Climatology and Interannual Variability. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 30, n. 9, p. 3279–3296, 2017. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/30/9/jcli-d-16-0705.1.xml>. Acesso em: 21 nov. 2022.

TAYLOR, Karl E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 106, n. D7, p. 7183–7192, 2001. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2000JD900719>. Acesso em: 8 nov. 2022.

TAYLOR, Karl E.; STOUFFER, Ronald J.; MEEHL, Gerald A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [s. l.], v. 93, n. 4, p. 485–498, 2012. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/93/4/bams-d-11-00094.1.xml>. Acesso em: 8 nov. 2022.

TIAN, Baijun; DONG, Xinyu. The Double-ITCZ Bias in CMIP3, CMIP5, and CMIP6 Models Based on Annual Mean Precipitation. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 47, n. 8, p. e2020GL087232, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020GL087232>. Acesso em: 8 nov. 2022.

ZILLI, Marcia T.; CARVALHO, Leila M.V.; LINTNER, Benjamin R. The poleward shift of South Atlantic Convergence Zone in recent decades. **Climate Dynamics** 2018 **52:5**, [s. l.], v. 52, n. 5, p. 2545–2563, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-018-4277-1>. Acesso em: 8 nov. 2022.

ZUBIETA, Ricardo *et al.* Comparative Analysis of Climate Change Impacts on Meteorological, Hydrological, and Agricultural Droughts in the Lake Titicaca Basin. **Water** 2021, **Vol. 13, Page 175**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 175, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/2/175/htm>. Acesso em: 8 nov. 2022.