

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Lucas Carvalho Vieira Cavalcante

**Avaliação dos Distúrbios Ondulatórios de Leste no
Atlântico Tropical Sul Utilizando os Modelos do CMIP6**

Campina Grande, Fevereiro de 2024

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA
GRANDE UNIDADE ACADÊMICA DE
CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

LUCAS CARVALHO VIEIRA CAVALCANTE

**AValiação DOS DISTÚRBIOS ONDULATÓRIOS DE LESTE NO ATLÂNTICO
TROPICAL SUL UTILIZANDO OS MODELOS DO CMIP6**

Campina Grande

2024

LUCAS CARVALHO VIEIRA CAVALCANTE

AVALIAÇÃO DOS DISTÚRBIOS ONDULATÓRIOS DE LESTE NO ATLÂNTICO
TROPICAL SUL UTILIZANDO OS MODELOS DO CMIP6

Tese de doutorado submetido ao colegiado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, para obtenção do título de Doutor em Meteorologia.

Área de concentração: Climatologia

Subárea: Sinótica-Dinâmica da Atmosfera Tropical

Orientador: Prof. Dr. Helber Barros Gomes

Coorientador: Prof. Dr. José Ivaldo Barbosa de Brito

Campina Grande

2024

C376a

Cavalcante, Lucas Carvalho Vieira.

Avaliação dos distúrbios ondulatórios de leste no Atlântico Tropical Sul utilizando os modelos do CMIP6 / Lucas Carvalho Vieira Cavalcante. – Campina Grande, 2024.

73 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Helber Barros Gomes, Prof. Dr. José Ivaldo Barbosa de Brito".

Referências.

1. Climatologia. 2. Modelagem Climática. 3. Sinótica-Dinâmica da Atmosfera Tropical. 4. Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) – Nordeste Brasileiro 5. *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP6). 6. Precipitação. I. Gomes, Helber Barros. II. Brito, José Ivaldo Barbosa de. III. Título.

CDU 551.58(043)

LUCAS CARVALHO VIEIRA CAVALCANTE

AVALIAÇÃO DOS DISTÚRBIOS ONDULATÓRIOS DE LESTE NO
ATLÂNTICO TROPICAL SUL UTILIZANDO OS MODELOS DO CMIP6

TESE APROVADA EM 27/02/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **HELBER BARROS GOMES**
Data: 28/02/2024 19:59:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. HELBER BARROS GOMES
Instituto de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Alagoas

Documento assinado digitalmente
 **JOSE IVALDO BARBOSA DE BRITO**
Data: 27/02/2024 21:18:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente
 **MAGALY DE FATIMA CORREIA**
Data: 27/02/2024 18:51:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. MAGALY DE FATIMA CORREIA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente
 **MARIA REGINA DA SILVA ARAGAO**
Data: 27/02/2024 19:02:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente
 **WEBER ANDRADE GONCALVES**
Data: 28/02/2024 16:24:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. WEBER ANDRADE GONÇALVES
Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Documento assinado digitalmente
 **DIRCEU LUIS HERDIES**
Data: 28/02/2024 18:22:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. DIRCEU LUIS HERDIES
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

AGRADECIMENTO

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha família como um todo, mas em especial a meus pais, Rogéria e Luciano, aos meus irmãos, Pedro e Leon, e à minha avó, Luiza.

Meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, Prof. Helber, e ao meu coorientador, Prof. Ivaldo, assim como aos meus antigos orientadores, Profa. Natalia e Prof. Vladimir. Estendo esses agradecimentos a todos os professores que fizeram parte da minha jornada educacional, desde o primeiro dia em que entrei em uma sala de aula até o doutorado. A essa profissão, que foi vivenciada e ministrada por meus pais e avó, não tenho como por em palavras o quanto vocês foram fundamentais na minha vida, e tenho por todos vocês imenso respeito e gratidão. Também não posso deixar de agradecer aos professores que aceitaram fazer parte desta fase tão significativa da minha vida: Profa. Magaly, Profa. Regina, Prof. Dirceu e Prof. Weber.

Um agradecimento especial aos amigos que me acompanham desde os tempos da UFAL: Thominhas, Jessica, JP (João Pedro), aos aventureiros (Matheus, Pedro, Ismael e Thayná). E aos amigos que encontrei nesta nova fase da minha vida acadêmica: Leydson, Ed, Debora, Fabricio, Edson e Ataíde.

(desculpa se esqueci alguém)

Obrigado a todos pela atenção.

RESUMO

Este estudo tem como objetivo avaliar a capacidade dos modelos do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP6) em estimarem as características dos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) sobre o Atlântico Tropical Sul (ATS) que atingem o Nordeste do Brasil (NEB). Inicialmente foi avaliado o skill dos modelos CMIP, AMIP, hist-1950 e highresSST-present, na variável precipitação, através dos dados do *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC), para definir os modelos que melhor reproduzissem os padrões espaciais e temporais da precipitação nas regiões de estudo. No total foram avaliados 17 modelos do CMIP (historical) histórico, 16 do AMIP, 7 do hist-1950 e 10 do highresSST-present. As análises espaciais dos ensembles de cada conjunto de modelos mostraram habilidade dos mesmos em reproduzir os padrões climatológicos de precipitação anual e sazonal, mas com o CMIP apresentando os maiores espalhamentos. Para a intensidade de precipitação, os modelos subestimaram o litoral do NEB e superestimaram o ATS e o norte do NEB. Observou-se ainda que as maiores (menores) incertezas entre os modelos ocorreram em latitudes mais ao norte (sul). Em relação ao ciclo anual da precipitação, os modelos foram capazes de representar o ciclo anual em todas as 8 subáreas, especialmente entre os meses de julho e outubro. Por outro lado, o maior espalhamento foi observado no primeiro semestre do ano, com ênfase sobre o norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e nos modelos CMIP. Baseado nisso foram selecionados os 3 melhores modelos de cada conjunto a fim de avaliar suas habilidades em representar os DOL sobre a área de estudo: CMIP (AS-RCEC.TaiESM1, CAS.FGOALS-f3-L e NCC.NorESM2-MM), AMIP (CAS.FGOALS-f3-L, AS-RCEC.TaiESM1 e CMCC.CMCC-CM2-SR5), hist-1950 (HadGEM3-GC31-HH, CMCC-CM2-VHR4 e ECMWF.ECMWF-IFS-HR) e highresSST (MRI.MRI-AGCM3-2-H, CMCC-CM2-VHR4 e ECMWF.ECMWF-IFS-HR). Para isso foi utilizado um algoritmo objetivo de rastreamento automático em cada modelo. Observou-se que os modelos foram capazes de representar os valores médios de tempo de vida (~ 6 dias) e velocidade de fase ($\sim 7 \text{ m.s}^{-1}$) próximos aos valores climatológicos e aos do ERA5. Por outro lado, maioria dos modelos não conseguiram capturar a variação interanual dos DOL ou a frequência média climatológicos. Todos os modelos conseguiram identificar as duas regiões preferenciais de gênese deste sistema, um sobre o ATS e outro próximo à costa oeste africana. Dessa forma, apesar de muitas melhorias ainda serem necessárias nos modelos CMIP6, os padrões climatológicos de precipitação e as características dos DOL sobre o NEB e ATS adjacente foram representadas pelos modelos, em especial nos modelos atmosféricos e de resolução aumentada (HighResMIP).

Palavras-chave: Distúrbios Ondulatórios de Leste, Nordeste brasileiro, CMIP6, Precipitação

ABSTRACT

This study aims to evaluate the ability of the new phase Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) models to estimate the characteristics of Easterly Waves Disturbances (EWD) over the Tropical South Atlantic (TSA) that reach Northeast Brazil (NEB). Initially, the precipitation variable output of CMIP, AMIP, hist-1950 and highresSST-present models skill was evaluated using the Global Precipitation Climatology Center (GPCC) dataset to define the best models that reproduce the spatial and temporal precipitation patterns over the study regions. In total, 17 historical CMIP, 16 AMI, 7 do hist-1950 and 10 do highresSST-present models were assessed. The ensemble's spatial analysis showed proficiency in reproducing annual and seasonal climatological precipitation patterns but with CMIP exhibiting the highest variability. Models underestimated the precipitation intensity on NEB's coast and overestimated on TSA and NEB's north. Larger (smaller) uncertainties among models were observed at higher (lower) latitudes. Regarding the annual precipitation cycle analysis, 8 subareas were selected and investigated within the total study area. Models effectively represented the annual cycle in all subareas, particularly between July and October. However, greater spread was observed in the first half of the year, emphasizing the northward Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and CMIP models. Based on those analyses, 3 best models from each ensemble were selected to evaluate the model's ability to represent EWD over the study area: CMIP (AS-RCEC.TaiESM1, CAS.FGOALS-f3-L, and NCC.NorESM2-MM), AMIP (CAS.FGOALS-f3-L, AS-RCEC.TaiESM1, and CMCC.CMCC-CM2-SR5), hist-1950 (HadGEM3-GC31-HH, CMCC-CM2-VHR4 e ECMWF.ECMWF-IFS-HR) and highresSST (MRI.MRI-AGCM3-2-H, CMCC-CM2-VHR4 e ECMWF.ECMWF-IFS-HR). An objective automatic tracking algorithm was utilized in each model. It was observed that the models were able to represent mean values of lifetime (~ 6 days) and phase speed (~ 7 m.s⁻¹) close to climatological values and those of ERA5. However, most models failed to capture the EWD's interannual variability or climatological mean frequency. All models successfully identified the two preferential genesis regions of this system, one over the TSA and another near the West African coast. Thus, despite many improvements still being necessary in CMIP6 models, precipitation climatological patterns and EWD's characteristics over NEB and adjacent TSA were represented by the models, especially in atmospheric and high-resolution models (HighResMIP).

Keywords: Easterly waves disturbances, Northeast Brazil, CMIP6, Precipitation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Modelo conceitual do DOL no Oceano Atlântico Norte. As linhas contínuas horizontais são as Isóbaras à superfície; a linha vertical contínua é o eixo do cavado em superfície; e a linha vertical tracejada representa o eixo do cavado em níveis mais altos. Fonte: Riehl (1954).....17
- Figura 2.** Campo médio de linhas de corrente para a (a) Superfície, (b) 850 hPa, (c) 700 hPa, (d) 200 hPa. A separação de categorias é de aproximadamente 3° de longitude. A cruz marca o centro da perturbação em 700 hPa. Velocidade do vento: um traço completo corresponde a 5 m s⁻¹, meio traço a 2,5 m s⁻¹ e nenhum traço a 1 m s⁻¹. Fonte: Reed *et al.* (1977).....19
- Figura 3.** Gráficos de violino mostrando a distribuição das velocidades médias (a) e distância percorrida dos DOL globalmente (vermelho), no HN (verde) e no HS (azul) para DOL rastreados em 700 hPa (acima) e 850 hPa (abaixo). Hollis *et al.* (2023)..... 20
- Figura 4.** Distribuição dos casos observados de DOL no período 1989–2009 por ano (a), mês (b) e tipos de sistemas que os originou (c). Frentes frias (CF), zona de convergência intertropical (ITCZ), aglomerados convectivos de AF da costa oeste da África, vórtices ciclônicos de altos níveis (UTCv). Os números acima das barras representam a frequência dos casos. Fonte: Gomes *et al.*, 2019..... 24
- Figura 5.** Mapa da região de estudo. Em destaque as 8 subáreas: 1 (5-15°S e 45-40°W), 2 (5-15°S e 40-35°W), 3 (5-15°S e 35-30°W), 4 (5-15°S e 30-25°W), 5.1 (5°N-0 e 35-20°W), 5.2 (0-5°S e 35-20°W), 6.1 (5°N-0 e 20-5°W) e 6.2 (0-5°S e 20-5°W)..... 32
- Figura 6.** Esquematização de um box plot 36
- Figura 7.** Precipitação climatológica (mm dia⁻¹) anual (coluna esquerda) e sazonal (coluna direita) para os ensembles dos modelos CMIP (b, g), AMIP (c, h), hist-1950 (d, i) e highresSST-present (e, j), e dados do GPCP (a, f)..... 39
- Figura 8.** BIAS entre a precipitação climatológica (mm dia⁻¹) anual (coluna esquerda) e sazonal (coluna direita) para a diferença entre os ensembles dos modelos CMIP, AMIP, hist-1950 e highresSST-present, e as estimativas do GPCP anual (a, b, c, d) e sazonal (e, f, g, h). 40

- Figura 9.** A região sombreada corresponde ao espalhamento (spread) da precipitação (mm dia⁻¹) anual (coluna esquerda) e sazonal (coluna direita) para os ensembles dos modelos CMIP (a, e), AMIP (b, f), hist-1950 (c, g) e highresSST-present (d, h); e, nos mesmos mapas, a linha tracejada corresponde à média climatológica anual e sazonal da precipitação. 42
- Figura 10.** Comparação direta do ciclo anual dos conjuntos de modelos e observação para as 8 áreas investigadas. Os gráficos de caixas verdes (CMIP), vermelhos (AMIP), cinza (hist-1950) e azul (highresSST-present) representam a distribuição estatística da precipitação mensal para todos os membros nas áreas: 1(a), 2(b), 3(c), 4(d), 5.1(e), 5.2(f), 6.1(g) e 6.2(h). A linha preta corresponde ao dado do GPCP..... 43
- Figura 11.** Diagrama de Taylor para os modelos CMIP (a), AMIP (b), hist-1950 (c) e highresSST-present (d). O desvio padrão normalizado é mostrado nos eixos-x e eixo-y e o coeficiente de correlação é mostrado na linha curvada. Os valores são calculados usando a precipitação média anual nas 8 subáreas mostradas na Figura 2. 47
- Figura 12.** Gráficos com os valores anuais e sazonais de RSME (a), e anuais de R² e TSS (b), correspondentes a média das 8 subáreas para cada modelo..... 50
- Figura 13.** Frequência dos DOL de 1989 a 2019 identificados nos modelos CMIP e AMIP (a); e hist-1950 e highresSST-present (b). Os modelos acoplados correspondem às barras avermelhadas e os atmosféricos às barras azuladas. A linha preta contínua pontilhada representa a frequência dos DOL identificados no ERA5, e a linha contínua representa a frequência climatológica dos DOL de Gomes et al. (2019) 53
- Figura 14.** Mapas de gênese (coluna esquerda) e densidade dos DOL (coluna direita) para a reanálise do ERA5 (a, j) e para os modelos CMIP: NorESM2 (b, k) e TaiESM1(c, l); AMIP: CMCC-CM2 (d, m) e TaiESM1 (e, n); hist-1950: CMCC-CM2-VHR4 (f, o), ECMWF-IFS-HR (g, p); e highresSST: CMCC-CM2-VHR4 (h, q), ECMWF-IFS-HR (i, r). 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização dos DOL sobre a Bacia do Oceano Atlântico Tropical Sul de acordo com estudos referenciados	21
Tabela 2. Projetos de Intercomparação de Modelos (MIP) endossados pelo CMIP6	29
Tabela 3. Centros/Grupos de pesquisa e resolução espacial dos modelos CMIP6	33
Tabela 4. Valores de TSS (anual), RSME (anual e sazonal), BIAS (anual e sazonal), R^2 (anual) e Desvio padrão normalizado dos modelos com a melhor performance de cada conjunto, correspondentes a média das 8 subáreas para cada modelo.....	51
Tabela 5. Características dos DOL dos melhores modelos CMIP6 selecionados e da reanálise do ERA5 identificados por meio do método TRACK	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL	Alagoas
AMIP	Atmospheric Model Intercomparison Project
AS	América do Sul
ATS	Atlântico Tropical Sul
BA	Bahia
CDO	Climate Data Operators
CE	Ceará
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
CCM	Complexos Convectivos de Mesoescala
DECK	Diagnóstico, Avaliação e Caracterização de Klima
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
ERA5	European Centers for Medium-Range Weather Forecasting interim versão 5
ERA-Interim	European Centers for Medium-Range Weather Forecasting interim
GARP	Global Atmospheric Research Programme
GATE	GARP Atlantic Tropical Experiment
GCM	Modelos de Circulação Geral
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GrADS	Grid Analysis and Display System
h	Hora(s)
hPa	Hectopascal
HighResMIP	Projeto de Intercomparação de Modelo de Alta Resolução
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

JBN	Jatos de Baixos Níveis
JSC	Joint Scientific Committee
Km	Quilômetro(s)
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
MA	Maranhão
mm	Milímetro
m s ⁻¹	Metro por segundo
MIP	Projetos de Intercomparação de Modelos
NEB	Região Nordeste do Brasil
PE	Pernambuco
PB	Paraíba
PI	Piauí
RN	Rio Grande do Norte
SE	Sergipe
VCAN	Vórtice Ciclônico em Altos Níveis
VCMN	Vórtice Ciclônico em Médios Níveis
WGCM	Working Group on Coupled Modelling
WGNE	Working Group on Numerical Experimentation
WCRP	World Climate Research Programme
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS	16
2.1	Geral	16
2.2	Específicos	16
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	DOL no NEB.....	19
3.2	Projetos de intercomparação de modelos climáticos.....	24
3.2.1	CMIP6	27
3.2.2	Avaliação dos modelos do CMIP6 sobre a América do Sul	29
4.	DADOS E METODOLOGIA.....	32
4.1	Área de estudo	32
4.2	Análise Estatística.....	32
4.2.1	Análise espacial	34
4.2.2	Análise da variabilidade temporal	35
4.2.3	Análise do individual dos modelos	36
4.3	Algoritmo de rastreamento automático	37
5.	RESULTADOS.....	38
5.1	Análise espacial.....	38

5.2	Análise da variabilidade temporal.....	43
5.3	Análise do individual dos modelos	44
5.4	Análise do TRACK.....	52
6.	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE	67

1. INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil (NEB) é composto pelos estados de Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA). Devido à sua extensa área territorial de 1.552.175 Km², o que corresponde a cerca de 18% do território brasileiro, e às diferentes características físicas presentes, é possível dividi-lo em sub-regiões conforme os diferentes climas e, consequentemente, regimes de precipitação. Oliveira et al. (2017) identificaram cinco sub-regiões no NEB com características pluviométricas distintas: Litoral Norte, Litoral Sul, Semiárido Norte, Semiárido Sul e Noroeste. Os menores totais anuais de precipitação ocorrem nas regiões semiáridas Norte (654,09 mm ano⁻¹) e Sul (810,42 mm ano⁻¹), de modo que as demais regiões apresentam precipitação superior a 1000 mm ano⁻¹, sendo o litoral norte e o noroeste do NEB as regiões com maior precipitação anual, com aproximadamente 1450 mm ano⁻¹. Rodrigues et al. (2019) observaram que o norte do NEB apresenta a maior variabilidade anual de precipitação. Além disso, observaram a ocorrência das estações chuvosas no norte do NEB entre os meses de fevereiro e maio, no litoral norte, de abril a julho, e no litoral sul e semiárido sul as chuvas ocorrem principalmente no período de dezembro a março.

Processos de escala global, sinótica e regional são responsáveis pela variabilidade climática espacial e interanual do regime de chuva no NEB. Um importante processo no regime de chuvas no norte e oeste do NEB é o aquecimento radiativo da superfície, que, em alguns casos, favorece a formação de Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) (REBOITA et al., 2010). O litoral do NEB, por abranger uma grande zona litorânea, sofre a atuação das brisas marítima e terrestre independentemente da época do ano, as quais podem resultar em linhas de instabilidade sobre o continente (KOUSKY, 1980). Entre os processos de escala sinótica que influenciam o regime de precipitação do NEB encontram-se: a penetração das frentes frias, ou seus remanescentes, entre as latitudes 5°S e 18°S (KOUSKY, 1979; MOLION e BERNARDO, 2002); a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (HASTENRATH E HELLER, 1977; NOBRE, 1993; NOBRE e SHUKLA, 1996; MELO, 2009); Vórtices ciclônicos de altos níveis troposféricos (VCAN) (KOUSKY e GAN, 1981; GAN e KOUSKY, 1986; OLIVEIRA *et al.*, 2013; DOS REIS *et al.*, 2021); Vórtices ciclônicos de médios níveis (VCMN) (FEDOROVA *et al.*, 2016); e Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) ou ondas de leste (NEIVA, 1975; YAMAZAKI e RAO, 1977; FERREIRA *et al.*, 1990; PONTES DA SILVA, 2011; GOMES *et al.*, 2015; GOMES *et al.*, 2019).

A respeito do litoral do NEB, um dos principais sistemas produtores de chuvas no litoral sul são os remanescentes de sistemas frontais (KOUSKY, 1979; FERREIRA e MELLO, 2005). Oliveira et al. (2013) destacaram a atuação do VCAN e da Zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) no regime de precipitação nesta região. Segundo os autores, os litorais norte e sul do NEB apresentam períodos secos e chuvosos em estações opostas de modo que os mecanismos

responsáveis por criar uma sub-região seca, consequentemente, resultam em chuva na outra sub-região. Dessa forma, durante a estação seca no litoral norte, a ação dos VCAN favorece eventos de precipitação extrema no litoral sul, enquanto que durante a estação chuvosa, são formados pela umidade redirecionada da Amazônia através da ZCAS. No entanto, no litoral norte, os DOL são os principais sistemas atuantes no regime de precipitação (YAMAZAKI e RAO, 1977; MOLION e BERNARDO, 2002; FERREIRA e MELLO, 2005). No estudo de Gomes et al. (2019), constatou-se que mais da metade da precipitação total anual do leste do NEB está associada aos DOL. Tais sistemas são perturbações de escala sinótica transientes, que se formam no campo de pressão atmosférica, na faixa tropical do globo terrestre, e se propagam de leste para oeste na região dos ventos alísios. Os DOL podem acarretar transtornos socioeconômicos devido à sua associação com eventos de precipitação extrema. Um exemplo disso ocorreu no dia 27 de maio de 2022 no estado de Pernambuco, onde a precipitação resultante de tal sistema ocasionou mortes e destruição a ponto de o governo pernambucano recorrer ao auxílio das forças armadas (FREITAS, 2022; PORTELA, 2022).

Uma importante questão quando se caracteriza tais sistemas é que, devido ao fato de propagarem-se na corrente Zonal, não apresentam uma estrutura homogênea de modo que suas características variam conforme a região do planeta onde atuam e estação do ano (ASNANI, 1993). Dessa forma, os modelos numéricos tornaram-se ferramentas essenciais para compreender o comportamento de tais sistemas e, ainda assim, comumente observa-se grande discrepância entre seus resultados e os dados observacionais. Neste contexto, grupos de modelagem ao redor do mundo têm desenvolvido esforços conjuntos para preencher essas lacunas e têm tornado as previsões de tempo e de clima cada vez mais confiáveis nos últimos anos.

Os projetos de intercomparação de modelos usados na ciência do clima baseiam-se na ideia de rodar um conjunto de modelos climáticos numéricos sob as mesmas condições e comparar seus resultados (TOUZÉ-PEIFFER, 2020). O *Atmospheric Model Intercomparison Project* (AMIP), iniciado em 1990, foi a primeira tentativa de coordenar estas atividades. Posteriormente diferentes projetos com propostas semelhantes surgiram, entre eles o *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP). Conforme descrito em Eyring *et al.* (2016), o CMIP tem como objetivo entender melhor as mudanças climáticas passadas, presentes e futuras decorrentes da variabilidade natural ou antropogênica em um contexto de vários modelos. Este projeto iniciou-se em 1995, sob o auspício do *Working Group on Coupled Modelling* (WGCM) do *World Climate Research Programme* (WCRP), comparando uns poucos modelos climáticos globais acoplados realizando experimentos usando modelos atmosféricos menos elaborados, acoplados a um oceano dinâmico, uma superfície de terra simples e gelo marinho termodinâmico (MEEHL *et al.*, 1997). Desde então, evoluiu ao longo de seis fases em uma importante atividade de pesquisa internacional envolvendo uma extensa quantidade de modelos que não só introduziu uma nova era para a pesquisa em ciências do clima, mas também se tornou um elemento central

de avaliações nacionais e internacionais de mudanças climáticas. Assim, estudos recentes vêm sendo feitos com o intuito de avaliar o desempenho dos modelos da nova fase do CMIP, o CMIP6, em simular padrões climáticos em diferentes regiões do globo como a Ásia (DONG e DONG, 2021), a África (NGOMA *et al.*, 2021; SHIRU e CHUNG, 2021) e, o de maior interesse para este estudo, a América do Sul (AS; RIVERA e ARNOULD, 2020; DIAS e REBOITA, 2021; FIRPO *et al.*, 2022).

Compreender a evolução dos modelos do CMIP e seu reflexo na melhora da representação do clima atual é de grande importância pois as políticas acerca da adaptação e mitigação das mudanças climáticas normalmente consideram os resultados da geração mais recente dos modelos. Além disso, compreender como os modelos climáticos simulam as variáveis climáticas históricas observadas fornece informações úteis sobre sua confiabilidade na investigação de mudanças futuras.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade dos modelos do CMIP6 em estimarem as características dos DOL sobre o ATS, que atingem o NEB, no clima presente e durante o período de máxima intensidade (Abril a Agosto). Especificamente, pretende-se:

2.2 Específicos

- Avaliar a habilidade dos modelos do CMIP6, na variável precipitação, por meio de uma análise estatística comparativa entre os produtos dos modelos CMIP6 e a estimativa de precipitação do Global Precipitation Climatology Project (GPCP).
- Avaliar a habilidade dos ensembles em representar os padrões climatológicos espaciais, anuais e sazonais, da precipitação sobre as regiões do ATS e NEB;
- Avaliar a habilidade dos ensembles em representar o ciclo anual de precipitação em 8 subáreas dentro do domínio total do estudo;
- Selecionar os três melhores modelos de cada conjunto CMIP, AMIP, hist-1950 e highresSST-present;
- Avaliar as características do ciclo de vida dos DOL nestes modelos e suas diferenças por meio de um algoritmo objetivo de rastreamento automático, usando como base o estudo climatológico proposto por Gomes *et al.* (2019) e os dados de reanálise do European Centers for Medium-Range Weather Forecasting versão 5 (ERA5);

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os DOL ocorrem em várias regiões tropicais ao redor do globo. Apesar disso, a grande maioria dos estudos relacionados a eles concentra-se no Hemisfério Norte (HN), em regiões como Oceano Pacífico ocidental, Mar do Caribe, Oeste da África e o Leste do Oceano Atlântico Norte. Isso se deve ao fato de esses sistemas estarem entre os distúrbios pré-existentes, convectivamente ativos, responsáveis pela gênese de sistemas de grande poder destrutivo como os ciclones tropicais que em sua maioria desenvolvem-se neste hemisfério (RIEHL, 1948; RIEHL, 1954 e GRAY, 1968; ZEHR, 1992; LANDSEA, 1993).

As investigações a respeito das características desses distúrbios foram iniciadas por Reihl (1945), para o Caribe, e Palmer (1952) para as regiões central e oeste do Pacífico. Riehl (1945) foi quem primeiro descreveu as características mais marcantes destes sistemas no HN, como o eixo do cavado na direção nordeste-sudoeste inclinando-se para leste com a altura (Fig. 1) e ar frio na retaguarda do cavado juntamente com valores mais altos de umidade próximos a esta região. Além disso, o autor identificou características locais como maior intensidade entre os níveis de 700 e 500 hPa, velocidade de fase de 6° de longitude por dia, período de 3 a 4 dias e comprimento de onda de 2000-3000 Km.

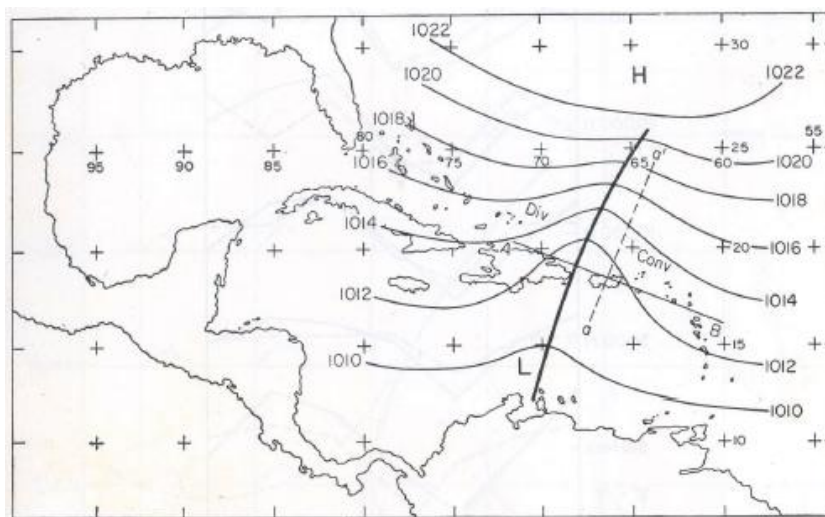


Figura 1. Modelo conceitual do DOL no Oceano Atlântico Norte. As linhas contínuas horizontais são as Isóbaras à superfície; a linha vertical contínua é o eixo do cavado em superfície; e a linha vertical tracejada representa o eixo do cavado em níveis mais altos. Fonte: Riehl (1954).

Por meio de uma técnica de composição usada para estabelecer os campos médios, Reed e Recker (1971) analisaram 18 eventos de DOL que atravessaram o oeste do Pacífico, entre julho e setembro de 1967. Os autores identificaram características regionais dessas ondas, como velocidade de fase de 9 m s^{-1} e comprimento de onda médio de 3500 a 4000 Km. Observou-se as maiores flutuações no vento meridional em baixos (800 hPa) e altos níveis (175 hPa), ambos

em fases opostas. Analisando a estrutura vertical dos DOL os autores identificaram movimentos ascendentes mais intensos próximos ao cavado, com velocidade vertical máxima em 300 hPa, junto com os maiores valores de umidades relativas. Consequentemente esta é a região de maior precipitação e nebulosidade com 2 mm por dia na vizinhança do eixo do cavado e cerca de 0,5 mm por dia próximo ao eixo da crista. Forte convergência ocorre próximo à superfície e divergência em 175 hPa, juntamente com os valores máximos de vorticidade anticiclônica. Os autores identificaram características térmicas desses sistemas como: anomalias frias de temperatura a oeste do cavado, em baixos e altos níveis, além da presença de anomalias quentes entre essas camadas, no nível de 300 hPa.

A expansão da rede de dados observacionais através dos trópicos e os projetos envolvendo programas de campo em grande escala ao redor do mundo auxiliaram no desenvolvimento de modelos de previsão numérica mais sofisticados com o intuito de melhor compreender a dinâmica da atmosfera nesta região. O *Global Atmospheric Research Programme* (GARP) foi um programa de pesquisa internacional comandado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Conselho Internacional de Ciência (CIC) que organizaram importantes experimentos de campo em grande escala, entre eles o *GARP Atlantic Tropical Experiment* (GATE). Este durou de junho a setembro de 1974 e teve como objetivo a identificação dos distúrbios em escala sinótica que atravessaram a região de estudo e a determinação de sua estrutura e propriedades a fim de estudar a interação da convecção de cumulus com características da circulação em grande escala.

Um dos artigos resultantes desse experimento foi o de Reed *et al.* (1977) que determinaram as características médias dos DOL nas proximidades do oeste da África, durante a fase III do GATE, por meio da técnica de composição usada por Reed e Recker (1971). Os autores identificaram um comprimento de onda médio de cerca de 2500 Km e o período médio de 3,5 dias. Os campos médios possibilitaram a caracterização da estrutura vertical desses sistemas (Fig. 2). Entre essas características observou-se: uma onda com eixo nordeste-sudoeste, em 700 hPa, ao sul do jato de leste (Fig. 2c); na superfície (Fig. 2a), um fraco centro de circulação fechada cerca de 5° ao norte do centro de vorticidade máxima da perturbação em 700 hPa; convergência em baixo nível na vanguarda ligeiramente ao sul desse centro (Fig. 2a), limitada pela divergência nos níveis troposféricos superiores (Fig. 2d), região essa marcada por movimentos ascendentes e consequentemente por uma maior cobertura de nuvens convectivas e maior quantidade de precipitação; uma circulação melhor desenvolvida em 850 hPa, onde observa-se um centro de circulação fechada (Fig. 2b). Também identificaram algumas características térmicas desses distúrbios como: núcleo frio abaixo de 650 hPa, núcleo quente entre esse nível e 250 hPa e núcleo frio em níveis mais altos.

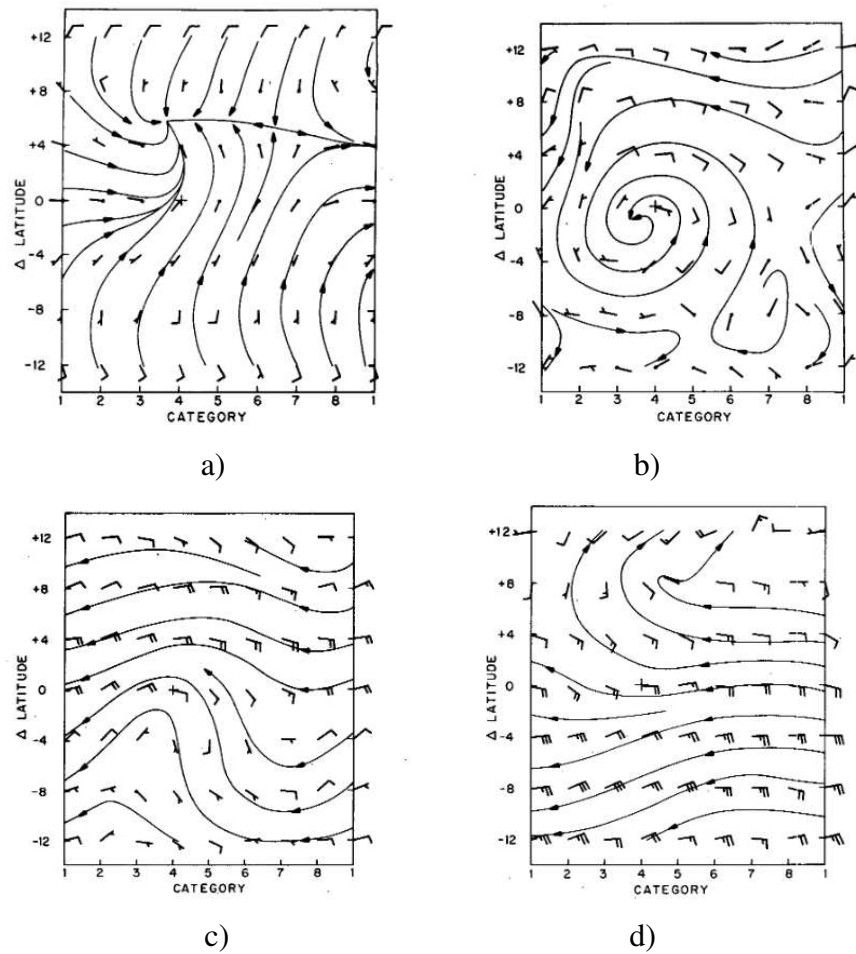


Figura 2. Campo médio de linhas de corrente para a (a) Superfície, (b) 850 hPa, (c) 700 hPa, (d) 200 hPa. A separação de categorias é de aproximadamente 3° de longitude. A cruz marca o centro de vorticidade máxima da perturbação em 700 hPa. Velocidade do vento: um traço completo corresponde a 5 m s^{-1} , meio traço a $2,5 \text{ m s}^{-1}$ e nenhum traço a 1 m s^{-1} . Fonte: Reed *et al.* (1977)

Reed *et al.* (1977) também observaram algumas pequenas diferenças entre o comportamento das ondas no continente e no oceano. Ao longo do oceano, os comprimentos de onda eram mais curtos, as vorticidades eram maiores em todos os níveis, especialmente na superfície, e o eixo da onda horizontal era mais inclinado em níveis próximos ao núcleo da corrente de jato de médios níveis. No continente, dois centros de circulação eram evidentes na superfície, um localizado abaixo do centro em altos níveis e o outro deslocado 10° para o norte.

Hollis *et al.* (2023) realizaram a primeira tentativa de propor uma climatologia global dos DOL aplicando uma combinação do algoritmo de rastreamento automático TRACK (HODGES 1995; 1999) e critérios objetivos a todas as bacias oceânicas. Os resultados do estudo constatarem a atividade de DOL em todas as bacias oceânicas tropicais de ambos os hemisférios, com mais atividade no Atlântico Norte e no Pacífico Norte. No entanto, em algumas regiões tal atividade destacou-se apenas em determinados níveis, em 700 hPa (Oceano Atlântico Sul, Oceano Pacífico Sul) ou em 850 hPa (Oceano Pacífico Norte central, Oceano Índico Sul), com maior atividade em 700 hPa. Os autores identificaram uma maior ocorrência entre as latitudes

10-15° de cada hemisfério, preferencialmente nos meses quentes, com cerca do dobro da frequência em comparação com a estação fria. Ao analisar a velocidade média dos DOL (Fig. 4a) os autores identificaram uma ampla variação, variando de quase estacionárias a velocidades superiores a 20 m s⁻¹, no entanto, em sua maioria apresentando uma velocidade média entre 5 e 10 m s⁻¹, e decaindo entre 7,5 e 8 m s⁻¹ dependendo do nível e do hemisfério. Embora as distribuições hemisféricas sejam extremamente semelhantes, os DOL no HN são ligeiramente mais rápidos do que os do HS em cerca de 0,4 m s⁻¹, um padrão que está presente em ambos os níveis. As médias e limites superiores do percentil 75 e valores discrepantes são mais rápidos em 700 hPa, um fato que faz sentido do ponto de vista físico, já que os ventos são normalmente mais rápidos em níveis mais elevados da atmosfera devido à falta de atrito. A intensidade máxima dos DOL, definida como o centro de maior magnitude durante o ciclo de vida de cada onda, foi de, na média global, aproximadamente 2,6 x 10⁻⁵ s⁻¹ em 700 hPa e 3,4 x 10⁻⁵ s⁻¹ em 850 hPa, com a mediana do HN ligeiramente superior à do HS. A distância de propagação dos DOL (Fig. 4b) apresentou valores entre 2.000-4.000 Km, com um comprimento médio de cerca de 3.000 Km para todos os níveis e hemisférios.

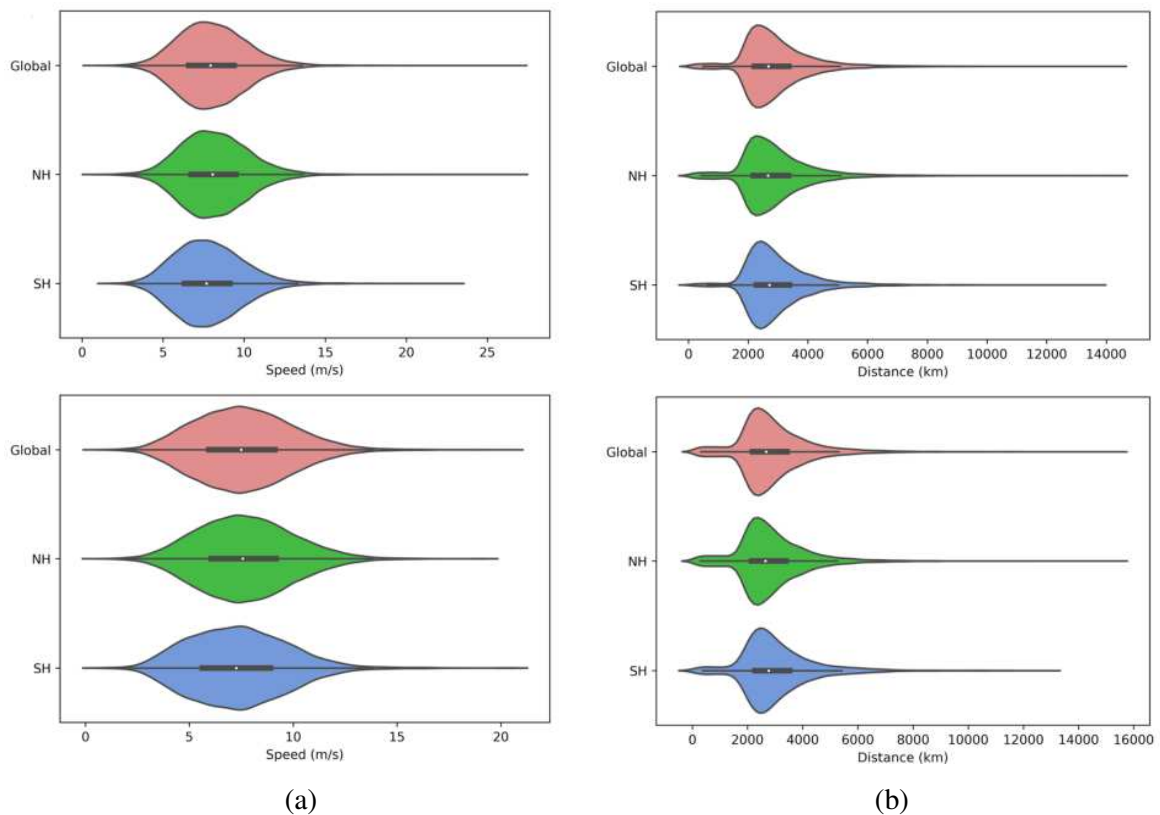


Figura 3. Gráficos de violino mostrando a distribuição das velocidades médias (a) e distância percorrida dos DOL globalmente (vermelho), no HN (verde) e no HS (azul) para DOL rastreados em 700 hPa (acima) e 850 hPa (abaixo). Fonte: Hollis *et al.* (2023)

3.1 DOL no NEB

Apesar do baixo número de estudos acerca dos DOL no Hemisfério Sul (HS), em comparação com o HN, alguns importantes estudos foram feitos para a região tropical do ATS, próximo à costa brasileira. Conforme já discutido por Asnani (1993), como cada um destes estudos realizado para esta região apresentou um método de identificação e um período de estudo diferentes para a análise dos DOL, apesar das semelhanças, as características encontradas por eles foram distintas. Dessa forma, a tabela 1 apresenta algumas das características dos DOL no ATS obtidas por diferentes autores.

Tabela 1. Caracterização dos DOL sobre a Bacia do Oceano Atlântico Tropical Sul de acordo com estudos referenciados.

Período (dias)	Comprimento (km)	Velocidade (m s^{-1})	Nível (hPa)	Método	Referência
4-6	6000	14	700-300	v, análise espectral	NEIVA, 1975
4	4000	10	-	satélite	YAMAZAKI, 1975
3-5	-	12	-	Radiossondagem	KAYANO, 1979
3-6	6200	12	850	v, ROLE, análise espectral	CHOU, 1990
4	3500-4500	10-13	1000-500	v, EOF e EEOF	ESPINOZA, 1996
3,5-3,8	2900-3800	9,8-11,6	700	v, composição, satélite	MOTA, 1997
3-6	-	-	850-500	v, radiossondagem	COUTINHO, 2007
3-9	2000-4000	6-12	700	Análise espectral, v, composição, satélite	DIEDHIOU <i>et al.</i> , 2010
5	4000	10	850 e 700	v, satélite, radiossondagem	TORRES E FERREIRA, 2011
5,3	4307	9,5	1000-200	u, v, w, composição, análise sinótica	PONTES DA SILVA, 2011
5,5	4500	9,5	1000-200	u, v, w, composição, Track	GOMES <i>et al.</i> , 2015
4-6	4500	9,5	1000-200	u, v, w, composição, Track	GOMES <i>et al.</i> , 2019

Entre os primeiros estudos acerca dos DOL no HS encontra-se o de Neiva (1975), que por meio das análises espectrais e espectrais cruzadas identificou a existência de distúrbios do tipo onda que se propagam para o oeste com inclinação noroeste-sudeste (característica dos DOL no HS). Os dados utilizados neste estudo consistem em componentes do vento para 5 níveis da troposfera (700 a 200 hPa) e compreendem um período de 411 dias, além de dados nas estações dos Aeroportos da Parnaíba e da Ilha da Ascensão. No entanto, como apontado por Wallace e Chang (1972), a análise espectral da nebulosidade não é particularmente adequada para o estudo de distúrbios das ondas tropicais, ao invés disso os autores sugerem a inspeção visual direta por meio de seções longitudinais em função do tempo para faixas zonais (CHANG, 1970; YAMAZAKI, 1975; YAMAZAKI E RAO, 1977).

Hall (1989) analisando uma série temporal de perfis atmosféricos e sequências de imagens de satélite para a Ilha de Ascensão identificou uma mudança drástica na componente meridional do vento com a passagem de um DOL, positiva (negativa) na vanguarda (retaguarda).

O autor observou que maior atividade convectiva encontra-se sobre o eixo desse sistema e por sua vez é inclinado na mesma direção de propagação.

Yamazaki e Rao (1977) observaram que no período do inverno esses distúrbios penetraram uma zona muito estreita ao longo da costa do NEB, sendo limitados a oeste pelo semiárido brasileiro. Barbosa *et al.* (2006) propõem que forçantes de escala sinótica como os DOL ao interagirem com uma convecção iniciada por fatores locais (aquecimento e brisa) podem intensificá-las e prolongar o seu deslocamento.

O estudo de Ferreira *et al.* (1990) mostrou que tais distúrbios ao interagirem com as circulações locais intensificam a convergência de baixo nível causando fortes chuvas nas costas leste e norte do NEB. Ainda observaram ondas com características diferentes nos trimestres MAM (outono) e JJA (inverno). No outono ocorrem ondas mais curtas (em torno de 4300 Km) e lentas (velocidade de 10 m s^{-1}), enquanto que no inverno ocorrem ondas mais longas (em torno de 6900 Km) e rápidas.

Outro importante estudo acerca deste sistema foi o de Pontes da Silva (2011) que em sua dissertação de mestrado estudou a contribuição dos DOL para a precipitação na costa do NEB nas estações chuvosas de 2006 a 2010. O estudo mostrou uma ocorrência média de 23 casos de DOL por ano com pequena variabilidade interanual, com cada caso resultando em uma precipitação média de 16-20 mm entre a costa do estado de PE e a costa do estado de RN. Seu trabalho também mostrou que os DOL são responsáveis por 70% das chuvas durante a estação chuvosa entre o litoral de AL e o leste de RN, 60% entre o leste de AL e o Agreste do RN, e 50% entre SE e demais áreas do RN, mas houve uma contribuição significativa nas latitudes mais ao sul da costa da BA. O autor construiu composições de variáveis meteorológicas (vento, vorticidade relativa ciclônica, divergência, radiação de onda longa emergente, precipitação, omega e umidade relativa) desde 2 dias antes (-2) até 2 dias depois (+2) dos DOL atingirem a costa do NEB. Por meio destas, o autor constatou que os DOL apresentaram estrutura organizada em baixos níveis, sobretudo no nível de 1000 hPa, com anomalia de vorticidade relativa ciclônica e convergência entre os dias -2 e 0, além de núcleos úmidos e ascendentes associadas a estes observados durante esse período. As anomalias negativas de radiação de onda longa e positivas de precipitação definiram a propagação dos DOL, podendo ser acompanhadas até um dia após a chegada da maioria dos eventos ao litoral do NEB. Os DOL apresentam, em baixos e médios níveis, vorticidade ciclônica e, em altos níveis, vorticidade anticiclônica. No entanto, o autor observou certa variação nessas características conforme a latitude, em 5°S observou-se anomalia ciclônica em baixos níveis até 700 hPa, mas em 9°S a anomalia foi anticiclônica já a partir de 900 hPa, se estendendo até 500 hPa, com anomalias fracas de vorticidade relativa em 13°S.

Gomes *et al.* (2015) estudaram os padrões dos DOL que se propagam em direção ao NEB

durante as estações chuvosas de dois anos: um ano com DOL com menor atividade convectiva (2006) e outro com maior atividade convectiva (2007). Para a identificação dos sistemas os autores, além do método de Pontes da Silva (2011) usando composições das variáveis meteorológicas, também foi utilizado um método automático de identificação e rastreamento desses sistemas, desenvolvido por Hodges (1995, 1999), chamado TRACK. Este método em sua maioria tem sido aplicado para os DOL que se desenvolvem na costa leste africana (HOPSCH *et al.*, 2007; SERRA *et al.*, 2010; THORNCROFT e HODGES, 2001). No entanto, o estudo de Gomes *et al.* (2015) foi o primeiro a usar este método para detectar e caracterizar os DOL no AS com ênfase no NEB. Por meio destes, os autores identificaram, nas duas estações chuvosas, DOL rasos que se estenderam de 1000 a 700 hPa com: convergência horizontal entre 1000 e 850 hPa e divergência em 700 hPa; anomalias negativas (positivas) em baixos níveis e altos (médio) da atmosfera. Características como: vorticidade ciclônica, convergência/divergência; anomalias de vento, associadas a DOL em todos os níveis, foram observadas entre os dias -2 e 0.

Embora vários autores tenham estudado DOL em diferentes regiões do mundo, poucos fizeram uma análise climatológica observacional de longo prazo. Gomes *et al.* (2019) realizou um estudo climatológico sobre as atividades dos DOL no ATS durante o período de 21 anos, entre 1989 e 2009, usando a metodologia proposta por Gomes *et al.* (2015) para a identificação dos sistemas. Por meio de ambos os métodos uma série de informações a respeito do comportamento deste sistema nesta região foram obtidas, como uma variabilidade interanual de 16 a 40 eventos, uma média de 25 DOL por ano e um desvio padrão de cerca de 6. Dos 518 DOL detectados manualmente, 342 (66%) foram rastreadas pelo TRACK, onde a maioria das ondas não rastreadas tiveram sua formação muito próxima à costa do continente e, devido ao critério de tempo mínimo do sistema não ter sido satisfeito (1,5 dias) ou da distância de viagem mínima (500 Km), o TRACK não conseguiu rastreá-los. Os autores observaram que 97% atingiu o litoral do NEB em algum momento de sua evolução, 64% apresentaram características convectivas significativas e 14% deles chegaram a alcançar a região amazônica; desses casos, a maior frequência ocorreu entre os meses de abril e agosto (estação chuvosa), com 429 casos encontrados, de modo a representar ao menos 60% da precipitação total da região da costa de AL ao leste da PB; os demais meses apresentaram menos da metade dos casos, em comparação com a estação chuvosa, de modo que os períodos com menor frequência se situa entre outubro e dezembro (Fig. 3 b); São mais frequentes nos anos de La Niña, especialmente em anos com episódios de ENOS mais fortes ou de maior duração (Fig. 3a). Algumas diferenças em relação aos DOL Africanos também foram pontuadas pelos autores como a menor intensidade nos campos sinóticos, incluindo nebulosidade e fenômenos adversos associados, o que dificulta sua identificação, e a não relação com as correntes de jatos em sua gênese. Em relação a gênese destes sistemas, os autores identificaram cinco sistemas associados, onde o principal deles são

os remanescentes frontais que se propagam em baixas latitudes resultando em 72,20% dos casos, seguidos pelos aglomerados convectivos da costa oeste da África (10,04%), ZCIT (6,37%) e VCAN (1,54%), como pode ser observado na figura 3c.

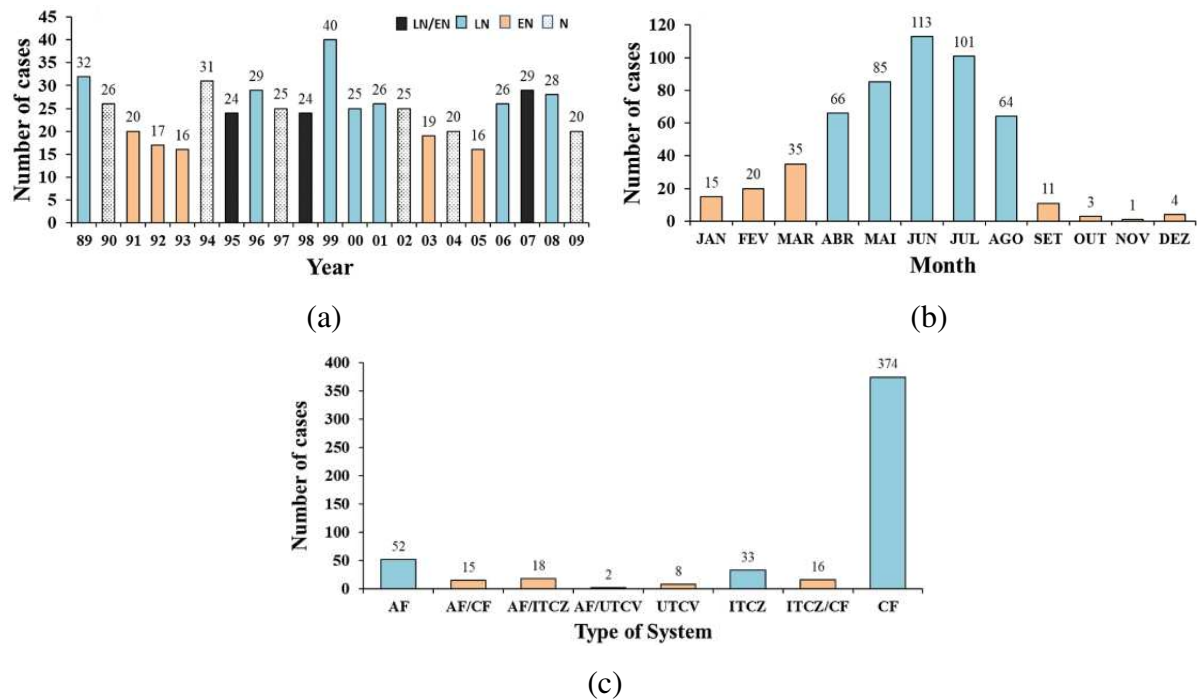


Figura 4. Distribuição dos casos observados de DOL no período 1989–2009 por ano (a), mês (b) e tipos de sistemas que os originou (c). Frentes frias (CF), zona de convergência intertropical (ITCZ), aglomerados convectivos de AF da costa oeste da África, vórtices ciclônicos de altos níveis (UTCv). Os números acima das barras representam a frequência dos casos. Fonte: Gomes et al., 2019.

3.2 Projetos de intercomparação de modelos climáticos

Os projetos de intercomparação entre modelos numéricos foram impulsionados pelo *Global Atmospheric Research Program* (GARP), que se trata de um programa estabelecido em 1967 com o objetivo de coordenar a pesquisa do tempo e do clima internacionalmente (TOUZÉ-PEIFFER, 2020). Uma das primeiras decisões de seu comitê organizador foi criar o *Working Group on Numerical Experimentation* (WGNE), cujo intuito é promover o diálogo entre os grupos de modelagem, para assim facilitar projetos de intercomparação entre modelos atmosféricos usados tanto para a previsão do tempo quanto para a pesquisa climática. A fim de comparar diferentes modelos ou diferentes versões do mesmo modelo em condições semelhantes, protocolos de intercomparação foram projetados e levaram à publicação de vários artigos. Os primeiros protocolos de intercomparação de modelos climáticos surgiram posteriormente como uma série de iniciativas autônomas. No entanto, até o final dos anos 80, essas diferentes iniciativas permaneceram isoladas. Isso levou o *Joint Scientific Committee* (JSC) do *World Climate Research Programme* (WCRP) a solicitar uma comparação sistemática

e abrangente de modelos climáticos atmosféricos. Uma vez que para a realização desta tarefa seria necessário uma série de simulações complexas, o acesso a poderosos recursos de computação tornou-se essencial para o surgimento do projeto. Tal problema foi contornado com o auxílio do *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL), levando à criação do Programa de Diagnóstico e Intercomparação do Clima no LLNL em 1989, e, um ano depois, o surgimento do seu primeiro grande projeto, o *Atmospheric Model Intercomparison Project* (AMIP).

O AMIP foi projetado para comparar a resposta dos Modelos de Circulação Geral (GCMs) atmosféricos, que são modelos que simulam o comportamento da atmosfera em escala espacial global e em escalas temporais sazonais e interanuais. O primeiro objetivo do projeto foi identificar diferenças entre o produto dos modelos, sob o mesmo protocolo, e compará-los com observações a fim de validar seu desempenho. Para isso, foram estabelecidos alguns parâmetros. Os anos de 1979 a 1988 foram escolhidos como o período de simulação, e o protocolo impôs a todos os modelos condições de contorno específicas, com valores padronizados para a constante solar e as concentrações atmosféricas de CO₂, bem como a temperatura média da superfície do mar observada e distribuições de gelo marinho. Além disso, os produtos das simulações tiveram que ser fornecidos em um formato padrão (GATES, 1992). Como o objetivo do AMIP não era apenas descobrir quais as diferenças entre os modelos atmosféricos, mas também para entendê-los, nos anos posteriores ao projeto, houve a organização de 26 subprojetos de diagnóstico a fim de analisar os resultados do AMIP (GATES *et al.*, 1999). A importância de tal projeto foi tamanha que, graças a ele, os modeladores climáticos tiveram pela primeira vez acesso a uma estrutura institucional para comparar e avaliar o desempenho de seu modelo. De modo que, em 1995, 31 grupos de modelagem haviam participado do experimento, representando quase toda a comunidade de modelagem atmosférica (TOUZÉ-PEIFFER, 2020).

Já no final da década de 1960, foi reconhecido que o oceano desempenha um papel fundamental no clima, e foram feitas tentativas de acoplar GCMs atmosféricos e oceânicos (MANABE E BRYAN, 1969). No entanto, esses modelos acoplados eram complexos e exigiam uma alta capacidade computacional. Assim, foi apenas na década de 80 que os modelos acoplados começaram a ser desenvolvidos cada vez mais para representar as interações dinâmicas entre a atmosfera, o oceano e a criosfera. Como consequência, o CMIP nasceu com o intuito de suprir duas necessidades vigentes na época. A necessidade de se criar um projeto semelhante ao AMIP para GCMs acoplados e, por conta do crescente interesse da comunidade científica mundial em relação às mudanças climáticas antropogênicas, a necessidade de mais simulações de modelos acoplados capazes de realizar tal análise (TOUZÉ-PEIFFER, 2020).

Como a estrutura original do CMIP refletia essas duas motivações, o CMIP foi inicialmente dividido em duas fases complementares: o CMIP1 que adaptou os principais objetivos do AMIP para modelos acoplados; e o CMIP2 que comparou as mudanças climáticas

simuladas por modelos acoplados sob um aumento de 1% de CO₂ ao ano. A partir de 1997, essa segunda fase estava, portanto, diretamente alinhada com a comparação realizada no Relatório Complementar à Avaliação Científica do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (HOUGHTON *et al.*, 1992). Devido às limitações de processamento de dados e recursos de arquivamento naquela época, CMIP1 e CMIP2 incluíram apenas alguns campos de saída e em uma resolução temporal grosseira: por exemplo, temperatura da superfície, precipitação e pressão do nível do mar foram calculadas em média ao longo de um mês. Esta amostra aproximada foi uma forte limitação para análises baseadas em experimentos. Por conta disso, em 1999, foi lançada uma nova fase, CMIP2 +, para incluir mais campos de modelo e, caso possível, dados diários. No entanto, esta nova fase representou um trabalho adicional significativo para os grupos de modelagem e, no final, CMIP2 + foi capaz de coletar apenas 12 conjuntos completos de resultados (MEEHL *et al.*, 2005).

Apesar de não ser o papel principal do projeto, o CMIP1 e CMIP2 desempenharam um papel importante no Terceiro Relatório de Avaliação (TAR) do IPCC (no momento da elaboração do relatório o CMIP2 + ainda não tinha sido concluído). Por conta disso, na fase posterior do projeto, o CMIP3, foi incluído projeções futuras de mudanças climáticas sob diferentes cenários de emissões, de modo que, entre os doze experimentos do CMIP3, dez testaram a resposta dinâmica do clima a várias concentrações de CO₂ (estável ou evoluindo com o tempo) a fim de ajudar o Quarto relatório do IPCC (AR4). Por essa razão o projeto foi planejado com antecedência suficiente para que as análises baseadas nos experimentos fossem usadas no AR4. Nesta fase o papel do CMIP de organizar e coordenar a pesquisa climática, embora presente também nas fases anteriores, também adquiriu uma nova dimensão. Na verdade, o CMIP3 foi a primeira fase do CMIP a dar acesso aberto a todos os dados de seus experimentos. Enquanto que nas anteriores, apenas alguns grupos de modelagem ao redor do mundo tiveram acesso aos dados e os analisaram, os dados do CMIP3 foram disponibilizados para qualquer estudante ou pesquisador em todo o mundo.

O sucesso do CMIP3 foi tamanho que cada vez mais cientistas de fora da comunidade de pesquisa do clima se interessaram em usar os resultados do CMIP em suas próprias áreas de especialização. Portanto, a fase posterior, o CMIP5, foi projetado para satisfazer não apenas as motivações da comunidade de modelagem climática, mas também as de muitos usuários diferentes. Para isso foi incorporado algumas das ideias e sugestões de muitas pessoas e de uma série de workshops e reuniões. Esses workshops envolveram cientistas com uma ampla gama de interesses, incluindo modelagem climática, modelagem biogeoquímica, modelagem de avaliação integrada, impactos da mudança climática, análise climática, processos climáticos e observações climáticas. (TAYLOR *et al.*, 2012).

Com o intuito de considerar as várias solicitações expressas, o CMIP5 incluiu mais

experimentos do que o CMIP3. As análises das simulações conduzidas nesses diferentes experimentos formaram a base do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (TOUZÉ-PEIFFER, 2020). No entanto, os prazos impostos pela redação do relatório do IPCC acabaram por colocar muita pressão sobre os pesquisadores. Além disso, o CMIP5 tem sido extremamente exigente em termos de recursos computacionais e de tempo, e bloqueou outras pesquisas em centros de modelagem (EYRING *et al.*, 2016). Em particular, questionou-se a importância atribuída aos cenários nas fases anteriores do CMIP, porque, embora sejam centrais nos relatórios do IPCC, são de pouca utilidade para a compreensão dos próprios processos climáticos, pois envolvem muitas suposições diferentes que tornam difícil interpretar seus resultados. Portanto, foi decidido que os cenários não pertenceriam aos experimentos centrais do CMIP6, os experimentos que todos os grupos participantes deveriam realizar, mas aos *Projetos de Intercomparação de Modelos* (MIP) endossados pelo CMIP que tratam-se de experimentos secundários em uma base voluntária. Dessa forma, ao pensar sobre o projeto do CMIP6, houve uma vontade comum da comunidade de modelagem de desacoplar os experimentos do CMIP do IPCC e reorganizar o CMIP de modo que o projeto deveria ser centrado em torno de três questões científicas principais (EYRING *et al.*, 2016): “Como o sistema da Terra responde às forçantes?”, “Quais são as origens e consequências dos vieses sistemáticos dos modelos?” e “Como podemos avaliar as mudanças climáticas futuras, dada a variabilidade climática interna, previsibilidade climática e incertezas nos cenários?”.

3.2.1 CMIP6

Uma parte importante do CMIP é a disponibilização dos produtos dos vários modelos em um formato padronizado para a comunidade científica. Conforme o projeto foi evoluindo a coordenação do mesmo tornou-se mais complexa à medida que incluía um número maior de modelos com processos mais complexos e, conseqüentemente, houve um crescimento na diversidade e no volume dos produtos solicitados ao CMIP. Para atender a essa demanda, tornou-se necessário revisar a organização do CMIP. Após uma longa e ampla consulta que envolveu os centros de modelagem que contribuem com o CMIP, bem como as comunidades que contam com os produtos dos modelos CMIP para seus trabalhos de desenvolvimento e pesquisa. Resultou em uma nova fase do CMIP, o CMIP6, que possui três componentes principais (EYRING *et al.*, 2016).

A primeira componente tem o objetivo de manter a continuidade e ajudar e documentar as características básicas dos modelos nas diferentes fases do CMIP. Esta consiste nas simulações históricas do CMIP e os experimentos que compõem o DECK (*Diagnóstico, Avaliação e Caracterização de Klima*). A simulação histórica do CMIP (historical ou esm-hist) abrange o período de extensas medições instrumentais de temperatura de 1850 até o presente. O

DECK compreende quatro experimentos de linha de base: (a) uma simulação histórica do AMIP (*Atmospheric Model Intercomparison Project*), (b) uma simulação de controle pré-industrial (piControl ou esm-piControl), (c) uma simulação forçada por um aumento abrupta na concentração de CO₂ de quatro vezes (abrupto $-4 \times \text{CO}_2$) e (d) uma simulação forçada por um aumento de 1% ao ano de CO₂ (1pctCO₂). Os experimentos DECK foram escolhidos com o objetivo de fornecer continuidade nas fases passadas e futuras do CMIP, para evoluir o menos possível ao longo do tempo, para incorporar simulações que os centros de modelagem executam como parte do ciclo de desenvolvimento dos seus modelos e ser relativamente independente das forçantes e objetivos científicos de uma fase específica do CMIP (EYRING *et al.*, 2016).

Os quatro experimentos DECK e as simulações históricas do CMIP são adequados para quantificar e compreender características importantes de resposta às mudanças climáticas. Juntos, esses experimentos documentam o clima médio e as características de resposta dos modelos. As credenciais dos modelos do CMIP são estabelecidas por meio da realização do DECK e das simulações históricas do CMIP, portanto, esses experimentos são exigidos para todos os modelos. Eles devem ser executados para cada configuração de modelo usada nos MIPs endossados pelo CMIP. Uma mudança na configuração do modelo inclui qualquer mudança que possa afetar suas simulações além do ruído esperado de diferentes realizações. Isso incluiria, por exemplo, uma mudança na resolução do modelo, processos físicos ou tratamento químico atmosférico. Se um ESM for usado tanto no modo de emissão de CO₂ quanto no modo de concentração de CO₂ em MIPs endossados por CMIP6 subsequentes, então ambos os controles de emissão e concentração, e simulações históricas devem ser feitas e serão idênticas em todas as forçantes, exceto o tratamento de CO₂ (EYRING *et al.*, 2016).

A segunda componente consiste em padrões comuns, coordenação, infraestrutura e documentação com o intuito de facilitar a distribuição dos produtos dos modelos e a caracterização dos conjuntos de modelos. E a terceira trata-se de um conjunto de MIPs (Tabela 2), específicos para uma fase do CMIP (CMIP6), e que se baseiam nas simulações históricas do DECK e CMIP para abordar uma grande variedade de questões específicas e preencher as lacunas científicas das fases anteriores do CMIP.

Tabela 2. Projetos de Intercomparação de Modelos (MIP) endossados pelo CMIP6. Fonte: EYRING *et al.* (2016).

MIP's	
AerChemMIP	Aerosols and Chemistry Model Intercomparison Project
C ⁴ MIP	Coupled Climate Carbon Cycle Model Intercomparison Project
CDRMIP	The Carbon Dioxide Removal Model Intercomparison Project
CFMIP	Cloud Feedback Model Intercomparison Project
DAMIP	Detection and Attribution Model Intercomparison Project
DCPP	Decadal Climate Prediction Project
FAFMIP	Flux-Anomaly-Forced Model Intercomparison Project
GeoMIP	Geoengineering Model Intercomparison Project
GMMIP	Global Monsoons Model Intercomparison Project
HighResMIP	High-Resolution Model Intercomparison Project
ISMIP6	Ice Sheet Model Intercomparison Project for CMIP6
LS3MIP	Land Surface, Snow and Soil Moisture
LUMIP	Land-Use Model Intercomparison Project
OMIP	Ocean Model Intercomparison Project
PAMIP	Polar Amplification Model Intercomparison Project
PMIP	Palaeoclimate Modelling Intercomparison Project
RFMIP	Radiative Forcing Model Intercomparison Project
ScenarioMIP	Scenario Model Intercomparison Project
VolMIP	Volcanic Forcings Model Intercomparison Project
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
DynVarMIP	Dynamics and Variability Model Intercomparison Project
SIMIP	Sea Ice Model Intercomparison Project
VIACS AB	Vulnerability, Impacts, Adaptation and Climate Services Advisory Board

3.2.2 Avaliação dos modelos do CMIP6 sobre a América do Sul

Tendo em vista a complexidade que é representar certos padrões climáticos locais em modelos e dado o impacto que cada fase do CMIP gera na comunidade científica mundial, os produtos da nova fase do CMIP, CMIP6, não demoraram a ser analisados com o intuito de simular padrões climáticos em diferentes regiões do globo. Até o momento, alguns estudos foram feitos com esse objetivo para a América do Sul (AS).

Em uma análise preliminar, Rivera e Arnould (2020) avaliaram o desempenho das simulações históricas dos modelos CMIP6 a fim de listar um conjunto de modelos que melhor representam a variabilidade da precipitação no sudoeste da AS. Días *et al.* (2021) constataram que a maioria dos modelos CMIP6 possui limitações em reproduzir corretamente as características de precipitação da Monção sul-americana. Ortega *et al.* (2021) avaliaram as simulações históricas de precipitação e temperatura dos modelos CMIP5 e CMIP6 em algumas regiões da América Central e do Sul, e constataram que a média do conjunto dos modelos CMIP6 apresenta desempenho semelhante aos melhores modelos CMIP5 em relação à precipitação e também simulou melhor a variação de temperatura com altitude nos Andes em comparação com o CMIP5.

Os resultados de Firpo et al. (2022) apresentaram um melhor desempenho dos modelos CMIP6 em reproduzir os padrões espaciais de precipitação no inverno, de junho a agosto, de modo que os melhores desempenhos ocorreram na Bacia do Prata e na Monção da AS, e o pior no NEB. No verão, houve uma subestimação da precipitação média na região amazônica e uma superestimação sobre o NEB e, segundo os autores, isso pode ter relação com as limitações dos modelos em simular a física de nuvens. Outra causa atribui-se a deficiência que muitos modelos tiveram em simular a corrente de Jato de Baixos Níveis, um importante mecanismo de transporte de calor e umidade de baixas para altas latitudes nos meses de verão (REBOITA et al, 2010). Uma causa para o déficit de precipitação nas regiões amazônicas durante o verão é a mudança de 1 a 2 meses na estação chuvosa na hora de simular o ciclo anual de precipitação. Por outro lado, os modelos capturam adequadamente o ciclo anual sobre o NEB apesar de superestimarem a precipitação nos meses chuvosos.

Ao avaliar 40 modelos que compreendem o CMIP3, CMIP5 e CMIP6, Medeiros et al. (2022) identificaram deficiências na representação de extremos climáticos de precipitação na AS tropical indicando a necessidade de melhorias contínuas nos modelos CMIP. De modo que o desempenho dos modelos varia conforme o índice investigado e a macrorregião do Brasil analisada. As regiões Norte e Nordeste (Sudeste e Sul) apresentam as maiores (menores) incertezas na representação dos extremos climáticos. Apesar do estudo indicar que nenhum dos modelos individualmente destacou-se como o melhor, e todos apresentaram dificuldade em simular as tendências observadas, a avaliação do conjunto indicou que os modelos CMIP3 apresentam melhor desempenho para o NEB, o CMIP5 para o Centro-Oeste e o CMIP6 para as regiões Norte, Sudeste e Sul. Dessa forma, apesar do avanço dos modelos CMIP6 em simular extremos climáticos de precipitação em latitudes médias, tal melhoria não foi observada em todas as regiões brasileiras.

Bazzanella *et al.* (2023) avaliaram o desempenho de 28 modelos do CMIP6 na representação do clima na AS, com ênfase no verão e inverno. Os autores constataram algumas características comuns a todos os modelos como melhor desempenho no inverno, uma dupla tendência da ZCIT no verão e no inverno, subestimação da precipitação na região norte do Brasil e superestimação na costa oeste da AS e NEB durante o verão. No inverno, a ZCIT é melhor representada pelos modelos em relação ao verão. Os modelos apresentaram dificuldade em simular o posicionamento da ZCIT, de modo que este sistema é melhor representado no inverno. Tal dificuldade se refletiu no fraco desempenho dos modelos na região Norte do Brasil e no norte da costa oeste da AS. Na região continental, os modelos simulam um excesso de precipitação sobre o norte da AS e o sul da costa oeste da AS. Os autores selecionaram 7 dentre os 28 modelos que melhor simulam o clima na região da AS (ACCESS-ESM1-5, CMCC-ESM2, EC-EARTH3, KACE-1-0-G, MIROC6, MRI-ESM2-0 e TaiESM1-0). Isso ocorreu devido ao

bom desempenho destes na representação dos sistemas meteorológicos que caracterizam o clima da AS (ZCIT, Corrente de jato subtropical e polar, Alta da Bolívia e cavado do NEB). Os modelos EC-EARTH3 e TaiESM1-0 apresentam o melhor desempenho nas regiões NEB e Centro-Oeste do Brasil, e um desempenho inferior na avaliação objetiva da temperatura média do ar na região Norte do Brasil. No entanto, 10 dos 28 modelos não conseguiram representar adequadamente sistemas como o cavado do NEB e a Alta da Bolívia, resultando em uma simulação deficiente da ZCAS, como os modelos AWI-ESM-1-1-LR, CAS-ESM2-0, IITM-ESM e NESM3 que além disso mostraram a menor habilidade em representar a ZCIT entre os modelos avaliados.

4 DADOS E METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

A área de estudo (Fig. 5) está restrita às latitudes 5°N-20°S e às longitudes 0°-60° W. Esta área compreende a maior parte do território brasileiro, incluindo todo o NEB e parte das regiões Norte e Sudeste, e parte do ATS que corresponde a todo o litoral do NEB até próximo à costa oeste africana. O objetivo é capturar os padrões climáticos de precipitação presentes no Brasil e no ATS adjacente. Conforme foi discutido na introdução, a fim de melhor representar os diferentes regimes de precipitação do NEB e a variedade de sistemas meteorológicos que atuam nesta região, a área total foi dividida em 8 subáreas: a área 1 (5-15°S e 45-40°W) representa o semiárido; a área 2 (5-15°S e 40-35°W), a costa do NEB; as áreas 3 (5-15°S e 35-30°W) e 4 (5-15°S e 30-25°W) representam o percurso dos DOL até atingirem o NEB; e as áreas 5.1 (5°N-0° e 35-20°W), 5.2 (0-5°S e 35-20°W), 6.1 (5°N-0° e 20-5°W) e 6.2 (0-5°S e 20-5°W) representam a região da ZCIT, divididas a fim de melhor representar seu deslocamento sazonal.

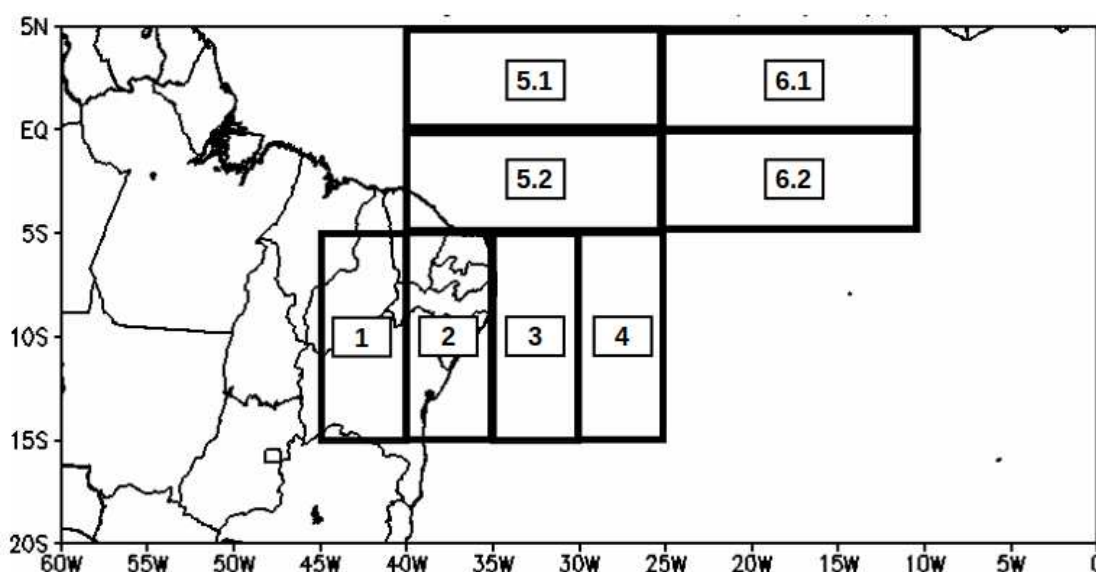


Figura 5. Mapa da região de estudo. Em destaque as 8 subáreas: 1 (5-15°S e 45-40°W), 2 (5-15°S e 40-35°W), 3 (5-15°S e 35-30°W), 4 (5-15°S e 30-25°W), 5.1 (5°N-0° e 35-20°W), 5.2 (0-5°S e 35-20°W), 6.1 (5°N-0° e 20-5°W) e 6.2 (0-5°S e 20-5°W).

4.2 Análise Estatística

Como o objetivo deste trabalho é avaliar a habilidade dos modelos do CMIP6 em representar os padrões climatológicos de precipitação e padrões de circulação atmosférica associados aos DOL, foram utilizados os produtos dos modelos atmosféricos do experimento DECK (AMIP) e das simulações históricas dos modelos acoplados, atmosfera e oceano, do CMIP6 (historical), todos na melhor resolução espacial possível. Além destes, tendo em vista que o sistema a ser analisado apresenta uma extensão relativamente pequena comparada a outros

sistemas de escala sinótica, o MIP utilizado neste trabalho foi o Projeto de Intercomparação de Modelo de Alta Resolução (HighResMIP). Este conjunto de experimentos tem como objetivo avaliar o papel da resolução dos modelos na representação dos processos relevantes para o sistema climático, medindo o desempenho das simulações dos modelos climáticos com resolução horizontal aumentada de aproximadamente 50 Km ou 25 Km na atmosfera e no oceano (HAARSMA et al., 2016). Para este estudo, foram utilizados os produtos do HighResMIP, tanto para os modelos acoplados (hist-1950) quanto para os modelos atmosféricos (highresSST-present).

Cada modelo do CMIP6 apresenta múltiplos membros na forma de “r i p f”, onde “r” representa as condições iniciais, “i” os métodos de inicialização, “p” os processos físicos e “f” as condições das forçantes. Todos os modelos utilizados neste estudo são do membro r1i1p1f1, o que significa que a integração dos modelos parte do mesmo ponto de inicialização e que as forças externas, incluindo gases de efeito estufa, irradiância solar, ozônio e aerossóis, são prescritas conforme seus valores históricos. Todos os modelos utilizados estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Centros/Grupos de pesquisa e resolução espacial dos modelos CMIP6.

Centros/Grupos de Modelagem	Institutos (ID)	Nome do Modelo (Resolução longitude x latitude)
CMIP (historical)		
Research Center for Environmental Changes	AS-RCEC	TaiESM1 (0.9°x1.25°)
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	BCC	BCC-CSM2-MR (1.1° × 1.1°)
Chinese Academy of Sciences	CAS	FGOALS-f3-L (1.3° × 1°)
Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	CMCC	CM2-SR5 (1.3° × 0.9°)
		CM2-HR4 (0.9° x 1.25°)
EC-EARTH consortium	EC-EARTH	EC-Earth3 (0.7° × 0.7°)
		EC-Earth3-Veg (0.7° × 0.7°)
Institute for Numerical Mathematics	INM	INM-CM4-8 (2° × 1.5°)
		INM-CM5-0 (2° × 1.5°)
Max Planck Institute for Meteorology	MPI-M	MPI-ESM1-2-HR (0.9° × 0.9°)
Meteorological Research Institute	MRI	MRI-ESM2-0 (1.1° × 1.1°)
Norwegian Climate Centre	NCC	NorESM2-MM (0.9° × 1.3°)
National Center for Atmospheric Research	NCAR	CESM2 (1.3° × 0.9°)
		CESM2-WACCM (1.3° × 0.9°)
		CESM2-WACCM-FV2 (1.9° x 2.5°)
National Oceanic and Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	NOAA	GFDL-CM4 GFDL-ESM4 (1° × 1°)
	GFDL	
Seoul National University	SNU	SAM0-UNICON (1.3° × 0.9°)
AMIP		
Research Center for Environmental Changes	AS-RCEC	TaiESM1 (0.9°x1.25°)
Chinese Academy of Meteorological Sciences	CAMS	CAMS-CSM1-0 (1° × 1°)
Chinese Academy of Sciences	CAS	FGOALS-f3-L (1.25° × 1.00°)
Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	CMCC	CM2-SR5 (1.3° × 0.9°)

EC-EARTH consortium	EC-EARTH	EC-Earth3 (0.7° × 0.7°) EC-Earth3-Veg (0.7° × 0.7°) EC-Earth3-AerChem (0.7° × 0.7°) EC-Earth3-CC (3° × 2°)
Institute for Numerical Mathematics	INM	INM-CM4-8 (2° × 1.5°) INM-CM5-0 (2° × 1.5°)
Max Planck Institute for Meteorology	MPI-M	MPI-ESM1-2-HR (0.93° × 0.93°)
National Center for Atmospheric Research	NCAR	CESM2 (1.3° × 0.9°) CESM2-WACCM (1.3° × 0.9°) CESM2-WACCM-FV2 (1.9° × 2.5°)
National Oceanic and Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	NOAA GFDL	GFDL-CM4 (1° × 1°) GFDL-ESM4 (1° × 1°)
hist-1950		
European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	ECMWF	ECMWF-IFS-HR (0.50° × 0.50°)
Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	CMCC	CM2-VHR4 (0.23° × 0.31°)
Research Center for Environmental Changes	AS-RCEC	HiRAM-SIT-LR (0.56° × 0.70°)
Chinese Academy of Sciences	CAS	FGOALS-f3-H (° × °)
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	BCC	BCC-CSM2-MR (1.1° × 1.1°)
Max Planck Institute for Meteorology	MPI-M	MPI-ESM1-2-XR (0.47° × 0.47°)
Met Office Hadley Centre	MOHC	HadGEM3-GC31-HM (0.23° × 0.35°)
highresSST-present		
European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	ECMWF	ECMWF-IFS-HR (0.50° × 0.50°) ECMWF-IFS-LR (1.0° × 1.0°)
Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL	IPSL-CM6A-ATM-HR (0.70° × 0.50°)
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	MIROC	NICAM16-8S (0.28° × 0.28°)
Max Planck Institute for Meteorology	MPI-M	MPI-ESM1-2-XR (0.47° × 0.47°)
Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	CMCC	CM2-VHR4 (0.23° × 0.31°)
Research Center for Environmental Changes	AS-RCEC	HiRAM-SIT-LR (0.56° × 0.70°)
Chinese Academy of Meteorological Sciences	CAMS	CAMS-CSM1-0 (0.46° × 0.46°)
Met Office Hadley Centre	MOHC	HadGEM3-GC31-HM (0.23° × 0.35°)
Meteorological Research Institute	MRI	MRI-AGCM3-2H (0.56° × 0.56°)

Para a avaliação da destreza dos modelos foi utilizado como parâmetro as estimativas de precipitação do Global Precipitation Climatology Project Versão 3 (GPCP; HUFFMAN et al., 2020; BAZZANELA et al., 2023), que consistem em um conjunto de dados mensais do produto de dados de pluviômetro e de estimativas de satélite disponíveis a partir de 1983 na resolução espacial de 0,5° × 0,5° latitude/longitude.

A robustez dos produtos dos modelos CMIP6 e seus ensembles foram avaliadas em diferentes escalas de tempo, anuais e sazonais (de abril a agosto), comparando as estimativas de precipitação do GPCP com base em análise e validação estatística. Por conta disso, nessa etapa

do estudo o período utilizado é de 1983 a 2014, que corresponde ao intervalo de tempo comum entre os dados do GPCP e os produtos dos modelos, todos redimensionados para uma grade intermediária de $1^\circ \times 1^\circ$. Como discutido anteriormente, os DOL são os sistemas que mais influenciam no regime de precipitação no litoral do NEB e seu período de maior atuação é de abril a agosto (GOMES *et al.*, 2019), dessa forma, neste estudo foi dada uma maior ênfase neste intervalo.

4.2.1 Análise espacial

Antes de realizar uma análise mais específica do comportamento dos modelos em cada subárea, nesta etapa inicial da análise busca-se avaliar de forma mais ampla a coerência dos ensembles dos modelos CMIP6 com os dados do GPCP utilizando a área total do estudo (Fig. 5). Para isso foram elaborados mapas, anuais e sazonais com base nos ensembles dos conjuntos de modelos CMIP, AMIP, hist-1950 e highresSST-present. Esses mapas baseiam-se em parâmetros estatísticos calculados pelo software *Climate Data Operators* (CDO) em cada um dos pontos de grade do domínio total (p) apresentado na Figura 5, são eles: Média aritmética (Eq. 1), Erro Médio (BIAS; Eq. 2) e Spread (Eq. 3). Onde são representados os valores de precipitação dos modelos individualmente (P_p), dos ensembles (E_p) e dos dados do GPCP (O_p) em cada ponto de grade (n) do domínio total apresentado na Figura 5.

$$MEAN = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n (E_p) \quad (1)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{p=1}^n (E_p)}{n} - \frac{\sum_{p=1}^n (O_p)}{n} \quad (2)$$

$$SPREAD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{p=1}^n (P_p - E_p)^2} \quad (3)$$

4.2.2 Análise da variabilidade temporal

Esta parte da análise objetiva verificar o nível de concordância e coerência da variação temporal dos produtos dos ensembles dos modelos CMIP6 antes de discriminar por cada modelo individualmente. Desta forma, a fim de avaliar a destreza dos modelos em simular a variabilidade anual de precipitação, foram elaborados diagramas Box Plot (TUKEY, 1977). Esse método apresenta um esboço da distribuição dos dados subjacentes baseados em cinco valores da amostra, a saber: valor mínimo, quartil inferior, mediana, quartil superior e valor máximo (WILKS, 2011). Para o cálculo foram utilizadas as saídas dos modelos CMIP, AMIP, hist-1950 e highresSST-present em cada uma das 8 subáreas da figura 5. Sobreposto a cada um dos diagramas foram plotados uma curva que representa os dados climatológicos do GPCP. A partir deste diagrama, foi possível identificar outras características adicionais, como por exemplo,

localização, dispersão, assimetria, comprimento da cauda e outliers (valores discrepantes).

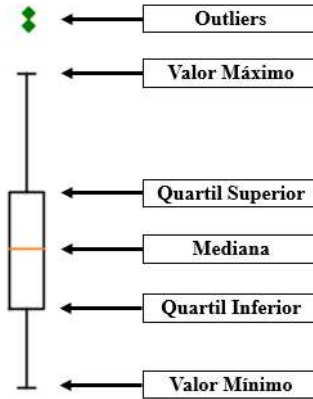


Figura 6. Esquemática de um box plot.

4.2.3 Análise individual dos modelos

A avaliação individual dos modelos foi realizada com base no diagrama de Taylor (TAYLOR, 2001), cujo parâmetro consiste na correlação de Pearson (R^2 ; Eq. 4), entre os valores de precipitação simulados (P_i) e observados (O_i), e o desvio padrão normalizado de cada modelo (Eq. 5), ou seja, o desvio padrão do modelo (σ_P) dividido pelo desvio padrão do GPCP (σ_O). Para isso foram utilizados valores de precipitação média anual em cada uma das 8 subáreas, e de cada modelo individualmente.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2}} \quad (4)$$

$$\sigma_N = \frac{\sigma_P}{\sigma_O} \quad (5)$$

Além deste, a fim de fazer com ranking baseado na performance de cada modelo, outros parâmetros estatísticos foram usados como o Erro médio quadrático (RMSE) e o Taylor Skill Score (TSS). Onde R^2 é o coeficiente de correlação do padrão espacial entre as saídas do modelo e a observação; R^2_L é o mais alto valor alcançável (aqui, definido com 1); e σ_P e σ_O são os desvios padrões simulados e observados, respectivamente.

$$TSS = \frac{4(1+R^2)^2}{\left(\frac{\sigma_P}{\sigma_O} + \frac{\sigma_O}{\sigma_P}\right)^2 (1+R^2_L)^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (7)$$

4.3 Algoritmo de rastreamento automático.

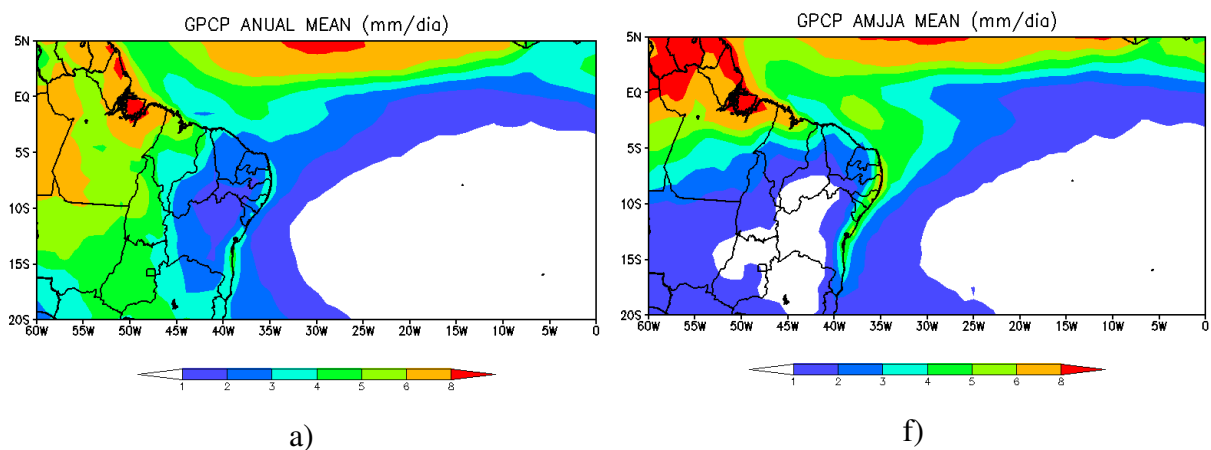
Nesta etapa do estudo, foram usados os produtos dos modelos que melhor performaram na etapa anterior. Com isso, foram obtidos dados das componentes zonal e meridional do vento, a cada 6h, no período de tempo correspondente à climatologia proposta por Gomes et al. (2019), de 1989 a 2009. Como referência, também foram utilizados dados de reanálise do European Centers for Medium-Range Weather Forecasting Interim versão 5 (ERA5) com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ para o mesmo período. Vale ressaltar que, dependendo do modelo, a quantidade de níveis verticais disponíveis diverge; de modo que, para a maioria dos modelos, os níveis disponíveis são: 850, 500 e 250 hPa, enquanto alguns deles apresentam também os níveis de 925, 700, 600 e 50 hPa.

Para a identificação dos DOL nos modelos CMIP6 foi utilizado o método automático de identificação e rastreamento, TRACK (HODGES, 1995 e 1999). O TRACK identifica e rastreia os DOL a partir de um limiar mínimo de vorticidade relativa e cujo sistema atende a certos requisitos de tempo de vida e distância percorrida. Como os DOL que atuam no ATS e ATN apresentam características distintas, como a intensidade e a distância percorrida (ASNANI, 1993), em ambos os estudos, houve a necessidade de adaptar o algoritmo de rastreamento possibilitando a identificação dos sistemas na costa do NEB. As principais mudanças estão na resolução em que o algoritmo de rastreamento é aplicado, que é alterado de T42 (~310 Km) para T63 (~210 Km), a distância mínima percorrida pelo DOL é reduzida para 500 Km (~ 5°), uma persistência de pelo menos 1,5 dias e limiar de vorticidade relativa de pelo menos $-0.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. O algoritmo foi aplicado no nível de 850 hPa, onde os centros de vorticidade relativa são mais intensos e melhor identificados. Tais mudanças foram feitas devido à amplitude dos DOL ser menor no HS, quando comparada às do HN, e por apresentar a formação do sistema, através do TRACK, próxima a costa do NEB (GOMES et al, 2019). Dessa forma, os critérios de identificação e rastreamento usados neste estudo são os mesmos de Gomes *et al.* (2015, 2019).

5 RESULTADOS

5.1 Análise espacial

A Figura 7 mostra a climatologia anual (coluna esquerda) e sazonal (coluna direita) da precipitação para os ensembles dos modelos CMIP (Fig. 7b, g), AMIP (Fig. 7c, h), hist-1950 (Fig. 7d, i) e highresSST-present (Fig. 7e, j), e para o GPCP (Fig. 7a, f). Por meio do mapa do GPCP foi possível identificar uma área de baixa ou nenhuma precipitação no ATS situada sobre a localização correspondente à Alta Subtropical, assim como se observou áreas com precipitação média superior a 4 mm dia^{-1} , posicionadas nas regiões correspondentes à ZCIT e ao norte do Brasil, região marcada por forte atividade convectiva. Nos mapas sazonais, observou-se uma área com ausência de precipitação sobre a bacia do São Francisco (Fig. 7f). Estas áreas foram simuladas em todos os ensembles, sendo o highresSST-present o que melhor representou a sua extensão (Fig. 7e). Outra característica observada foram áreas de precipitação superior a 3 mm dia^{-1} nos litorais do NEB, as quais correspondem à área de atuação dos DOL no NEB (Gomes et al., 2019). No mapa anual do GPCP (Fig. 7a) observou-se dois núcleos, um no litoral norte e outro no litoral sul; e no mapa sazonal (Fig. 7f) observou-se uma área mais ampla de precipitação superior a 4 mm dia^{-1} que abrange todo o leste do NEB. O ensemble AMIP foi o que melhor representou ambas as áreas (Fig. 7c, h), enquanto os ensembles com resolução aumentada (HighResMIP) apresentaram dificuldade nesta representação, em especial o hist-1950 (Fig. 7d, i). No geral, tanto nos mapas anuais quanto nos sazonais, os padrões espaciais de grande escala foram capturados em todos os ensembles avaliados, porém com limitações quanto à intensidade da precipitação, especialmente no litoral do NEB e na ZCIT. Dentre todos os ensembles, o CMIP foi o que apresentou maiores diferenças tanto na intensidade quanto no posicionamento dos padrões de precipitação observados.



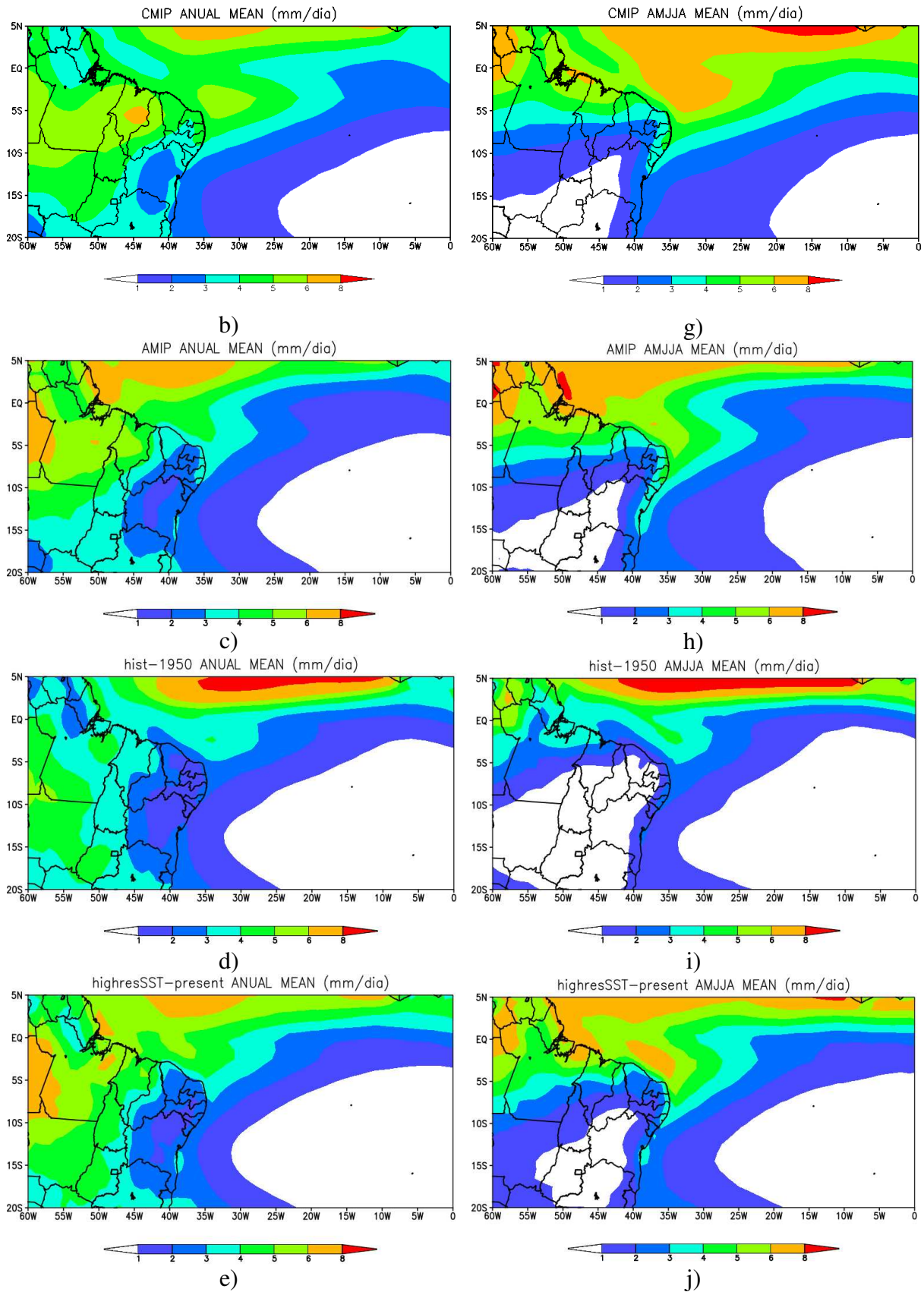
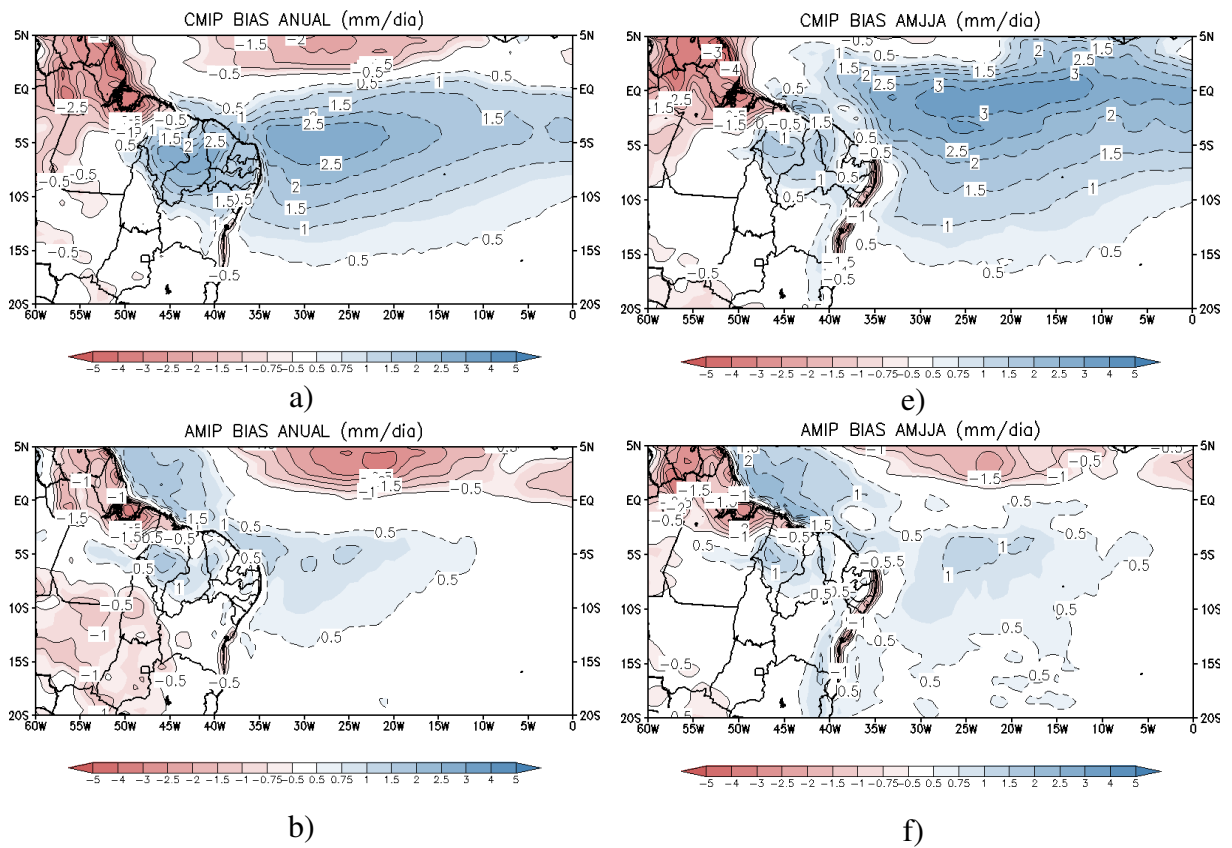


Figura 7. Precipitação climatológica (mm dia^{-1}) anual (coluna esquerda) e sazonal (coluna direita) para os ensembles dos modelos CMIP (b, g), AMIP (c, h), hist-1950 (d, i) e highresSST-present (e, j), e dados do GPCP (a, f).

A Figura 8 ilustra o BIAS anual (coluna esquerda) e sazonal (coluna direita), que representa a diferença entre os ensembles dos modelos CMIP (Fig. 8a, e), AMIP (Fig. 8b, f),

hist-1950 (Fig. 8c, g) e highresSST-present (Fig. 8d, h); e os dados do GPCP. Nota-se que todos os ensembles superestimaram os valores de precipitação nas regiões norte do NEB e na faixa latitudinal do ATS próxima, especialmente o ensemble do CMIP com BIAS de $+2,5 \text{ mm dia}^{-1}$ no mapa anual (Fig. 8a) e $+3 \text{ mm dia}^{-1}$ no mapa sazonal (Fig. 8e), sobre o ATS adjacente. Baixos valores de BIAS foram observados nos mapas HighResMIP (Fig. 8c, d, g, h) nesta mesma região. Em todos, observou-se subestimação da precipitação no litoral do NEB, especialmente nos mapas sazonais, período de máxima atividade dos DOL. Os maiores valores de BIAS nesta região ocorreram nos modelos de resolução aumentada, hist-1950 ($-2,5 \text{ mm dia}^{-1}$) e highresSST-present (-2 mm dia^{-1}). Nos mapas anuais, isso também pôde ser visto, porém com menor intensidade, nos mapas HighResMIP (Fig. 8c, d), e nos mapas CMIP (Fig. 8a) e AMIP (Fig. 8b) concentrado na costa da Bahia. Os mapas sazonais dos ensembles HighResMIP apresentaram BIAS próximos a 0 mm dia^{-1} na região do semiárido do NEB (Fig. 8c, d), corroborando com a melhor representação destes da região de subsidência sobre a bacia do São Francisco (Fig. 7f). Além disso, parte da região Norte do Brasil apresentou subestimativas de precipitação em todos os ensembles. De forma geral, os desvios se acentuaram mais nos mapas sazonais e nos ensembles do CMIP (Fig. 8a, e).



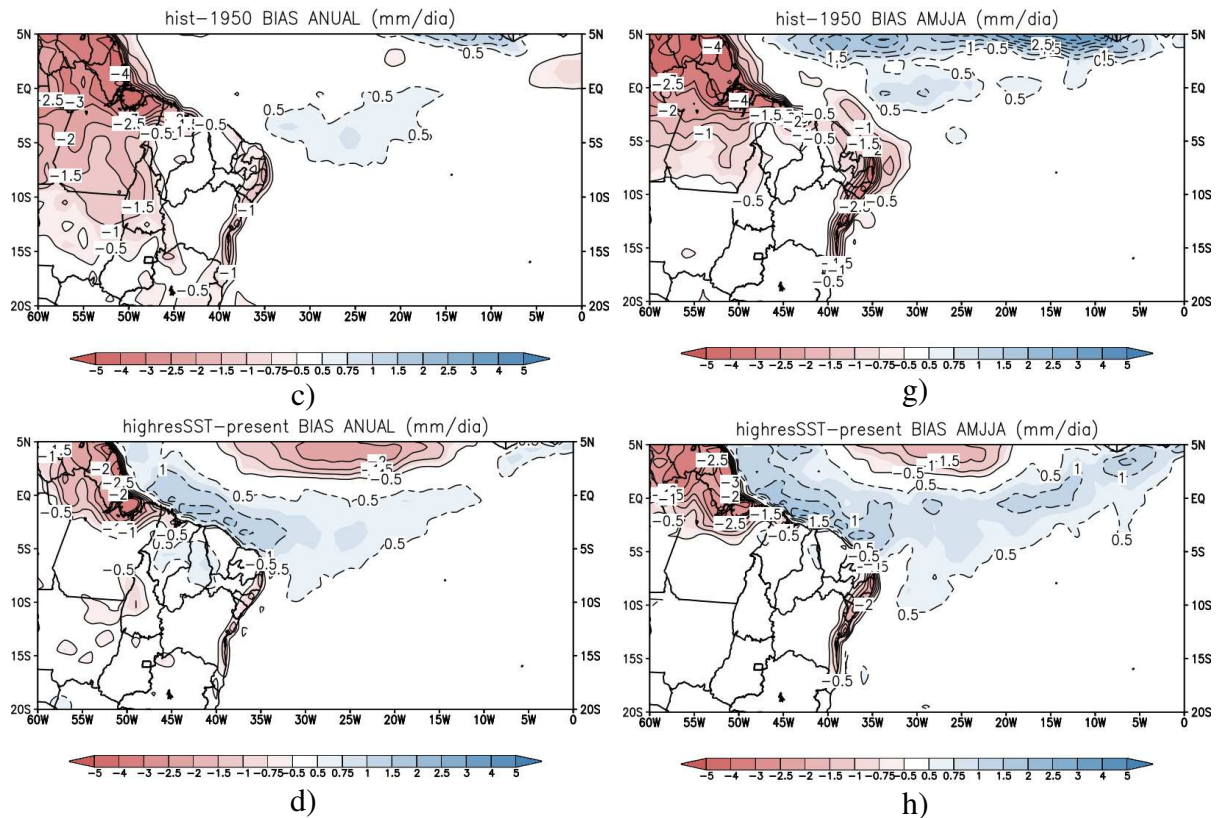


Figura 8. BIAS entre a precipitação climatológica (mm dia^{-1}) anual (coluna esquerda) e sazonal (coluna direita) para a diferença entre os ensembles dos modelos CMIP, AMIP, hist-1950 e highresSST-present, e as estimativas do GPCP anual (a, b, c, d) e sazonal (e, f, g, h).

Avaliando os mapas de espalhamento (Fig. 9), os ensembles apresentaram maior incerteza em latitudes mais ao norte, com valores de magnitude diminuindo conforme se desloca para latitudes mais ao sul. Estes resultados indicam que os modelos tendem a simular a precipitação em sentidos diferentes quanto mais próximo da faixa da ZCIT. Utilizando como parâmetro a linha de espalhamento igual a 1 mm dia^{-1} em cada mapa, observa-se que nos mapas do CMIP esta linha situa-se próxima à latitude 15°S sobre o continente e 10°S sobre o ATS no mapa anual (Fig. 9a), enquanto que no mapa sazonal (Fig. 9e) esta linha encontra-se próxima a 8°S no continente e 12°S no ATS. Este comportamento é observado em todos os ensembles e de forma mais acentuada no hist-1950, de modo que a linha supracitada localiza-se próxima a 20°S no continente e a 5°S no ATS no mapa anual (Fig. 9c). Dessa forma, observa-se um maior grau de incerteza sobre o continente em comparação com o ATS, em especial nos mapas anuais. Os mapas sazonais do HighResMIP foram os que apresentaram os menores valores de incerteza sobre o continente, especialmente o hist-1950 onde observa-se uma região com valor menor ou igual a $0,25 \text{ mm dia}^{-1}$ posicionada sobre a bacia do São Francisco (Fig. 9g). Nos mapas sazonais (Fig. 9; coluna direita), destacam-se o litoral do NEB, cujo grau de incerteza observado é superior às áreas que o circundam, especialmente nos ensembles CMIP (Fig. 9e) e AMIP (Fig. 9f).

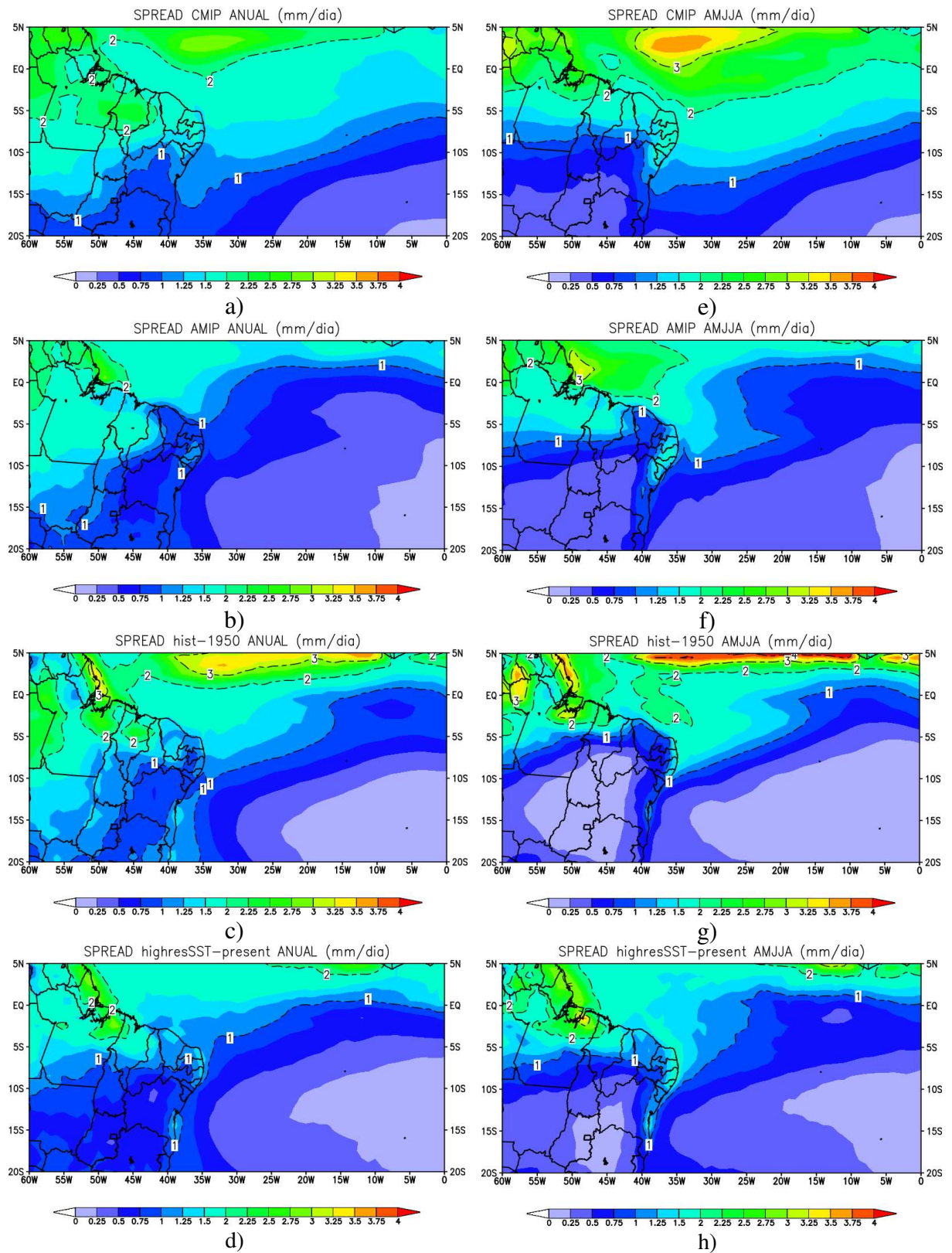
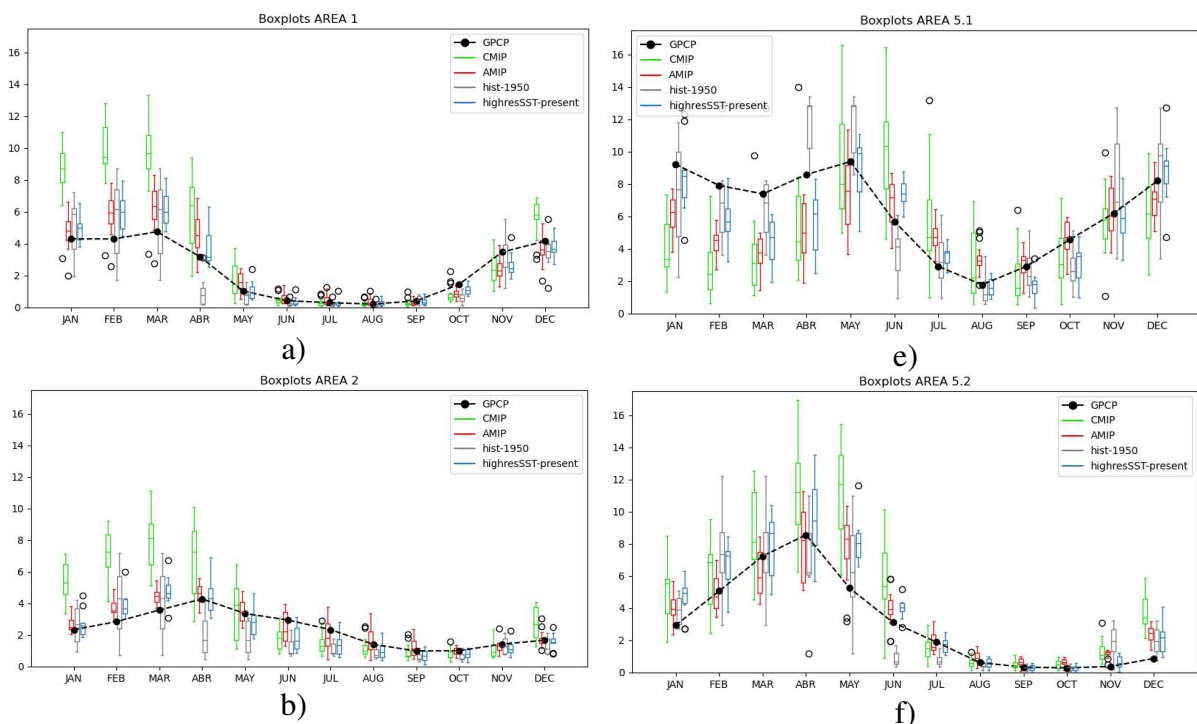


Figura 9. A região sombreada corresponde ao espalhamento (spread) da precipitação (mm dia^{-1}) anual (coluna esquerda) e sazonal (coluna direita) para os ensembles dos modelos CMIP (a, e), AMIP (b, f), hist-1950 (c, g) e highresSST-present (d, h); e, nos mesmos mapas, a linha tracejada corresponde à média climatológica anual e sazonal da precipitação.

5.2 Análise da variabilidade temporal

Os gráficos da figura 10 representam a variação da precipitação anual, em cada subárea, por meio de box plot para os modelos CMIP (caixa verde), AMIP (caixa vermelha), hist-1950 (caixa cinza) e highresSST-present (caixa azul), tendo como parâmetro o GPCP (linha preta pontilhada). Desta forma, observou-se que todos os conjuntos de modelos conseguiram capturar o ciclo anual de precipitação em todas as subáreas. Os conjuntos dos modelos apresentaram maior espalhamento no primeiro semestre do ano (janeiro a junho), ou seja, quanto menor (maior) a caixa do box plot, menor (maior) será o espalhamento entre os membros e, consequentemente, menor (maior) será o grau de incerteza dos conjuntos. Neste mesmo período, observou-se as maiores discrepâncias em relação aos dados do GPCP de modo que houve superestimação dos valores de precipitação em todas as áreas, com exceção das 5.1 e 6.1, onde houve subestimação. Tanto o grau de incerteza quanto a discrepância com os dados do GPCP foram mais acentuados nas subáreas correspondentes à ZCIT (5.1, 5.2, 6.1 e 6.2), em especial na parte norte (5.1 e 6.1), e nos modelos CMIP. Nas demais subáreas, os modelos apresentaram maior proximidade com a curva do GPCP ao menos entre julho e outubro, de modo que nas subáreas 2, 3 e 4 essa proximidade estendeu-se até dezembro e na subárea 1 estendeu-se de maio a outubro. O comportamento dos modelos AMIP e HighResMIP apresentou padrões semelhantes, destoando consideravelmente dos modelos CMIP. Apesar disso, os modelos hist-1950 destoaram significativamente desses nos meses de abril a junho nas áreas 1, 2, 3 e 5.2 (Fig. 10a, b, c, f).



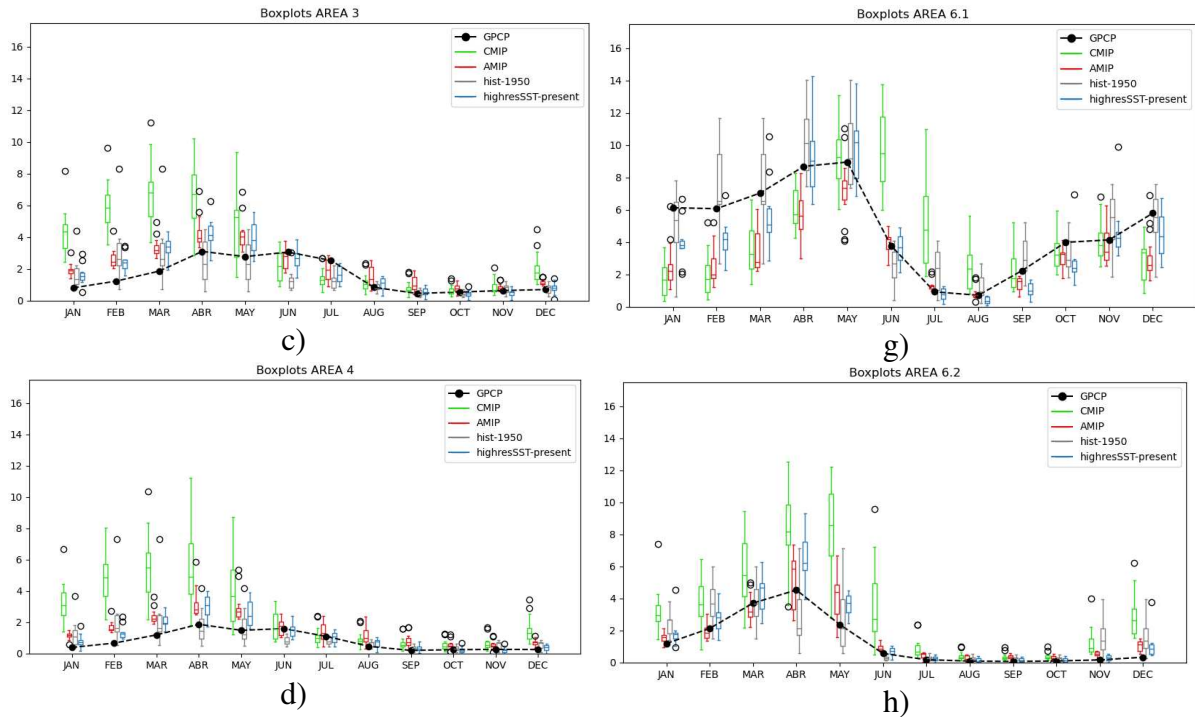


Figura 10. Comparação direta do ciclo anual dos conjuntos de modelos e observação para as 8 áreas investigadas. Os gráficos de caixas verdes (CMIP), vermelhos (AMIP), cinza (hist-1950) e azul (highresSST-present) representam a distribuição estatística da precipitação mensal para todos os membros nas áreas: 1(a), 2(b), 3(c), 4(d), 5.1(e), 5.2(f), 6.1(g) e 6.2(h). A linha preta corresponde ao dado do GPCP.

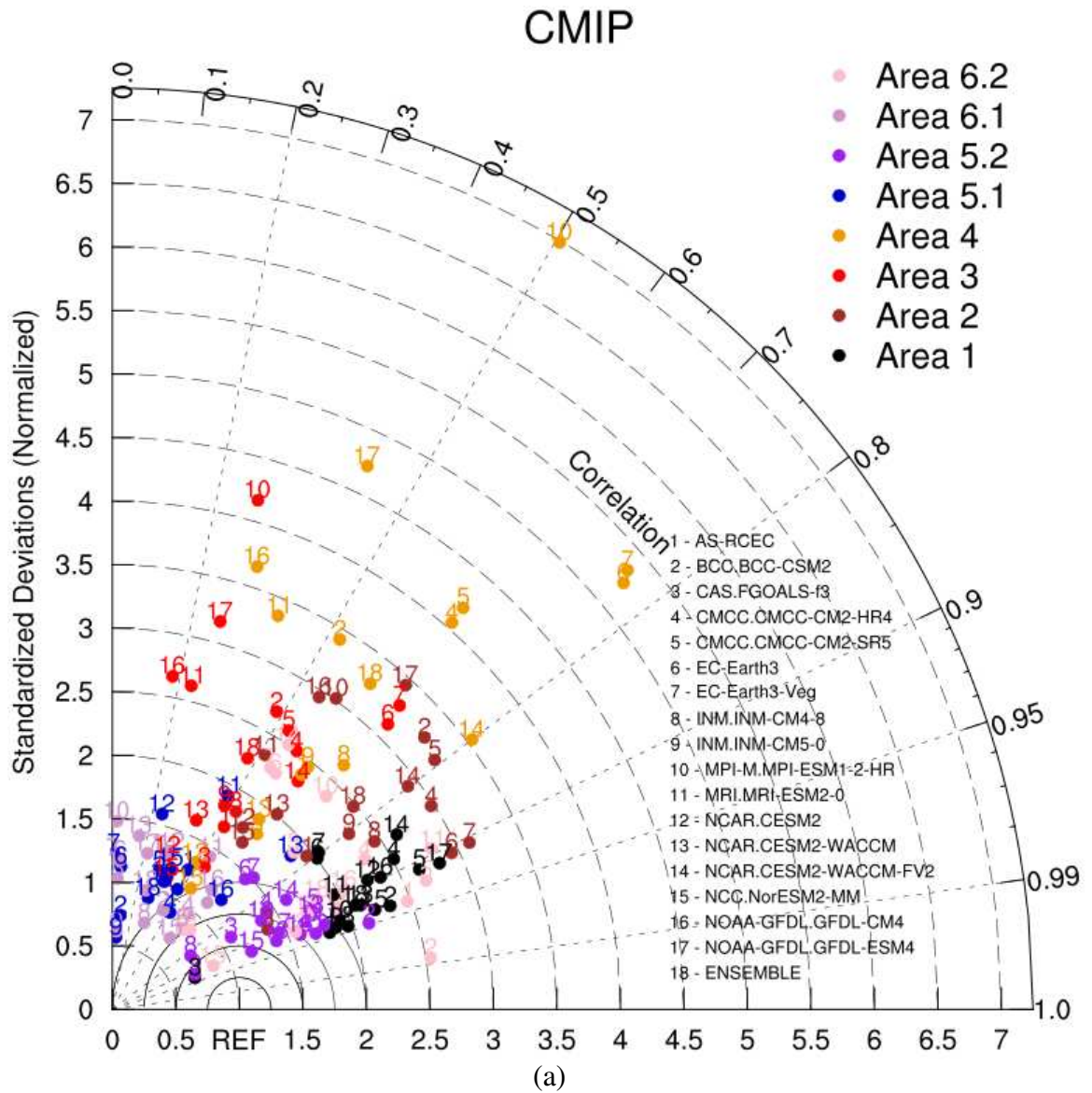
5.3 Análise individual dos modelos

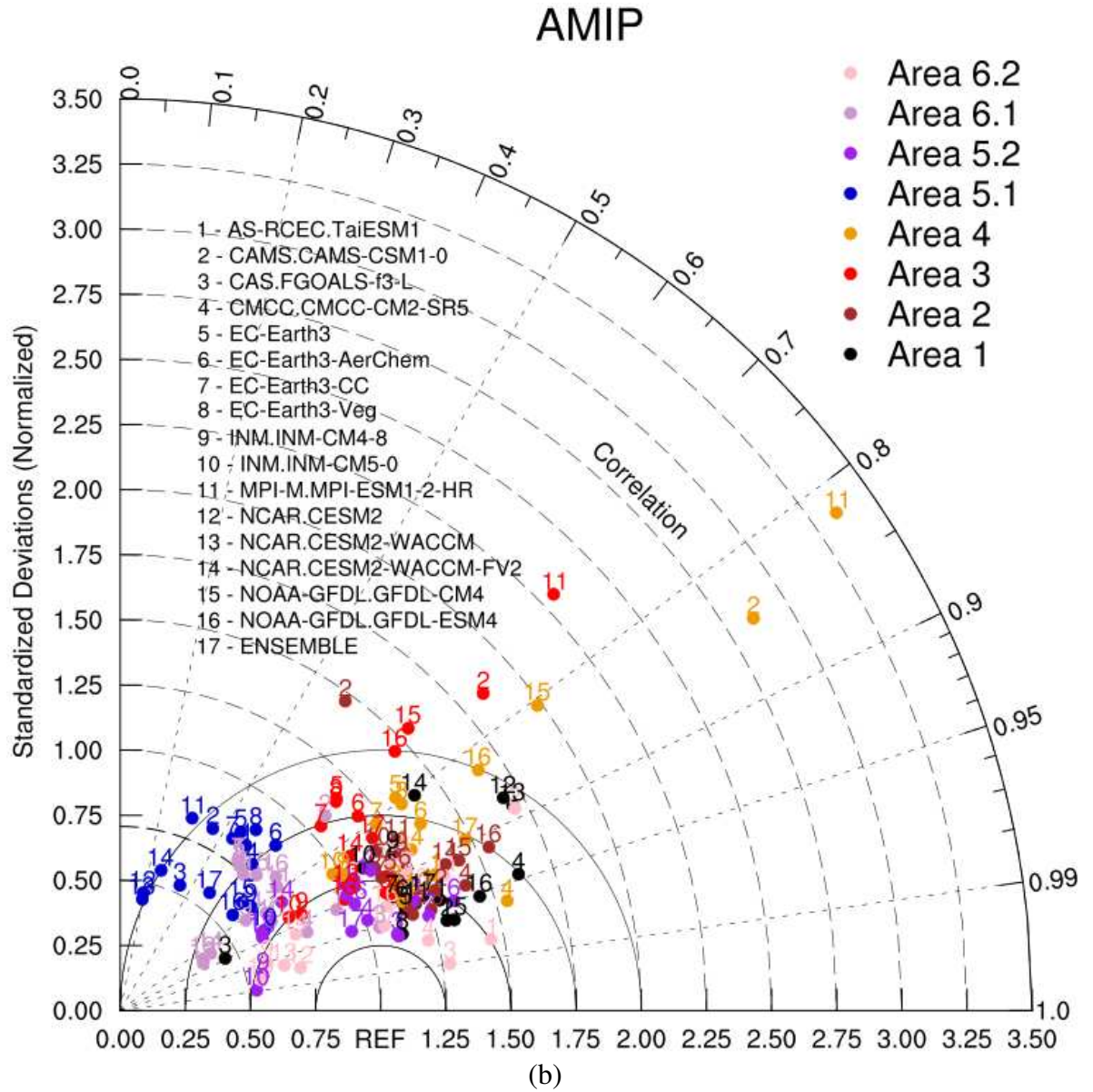
Para a análise individual, foram usados os diagramas de Taylor para os modelos CMIP (Fig. 11a), AMIP (Fig. 11b), hist-1950 (Fig. 11c) e highresSST-present (Fig. 11d), para os valores médios anuais de precipitação nas 8 subáreas. A partir desse diagrama, pode-se avaliar a habilidade de cada modelo e ensemble em reproduzir os padrões de precipitação nas diversas áreas selecionadas, em termos de desvio padrão normalizado (eixo-x e eixo-y) e coeficiente de correlação (linha curvada). Os modelos CMIP, AMIP, hist-1950 e highresSST-present apresentaram valores de desvio padrão normalizado (correlação) entre 0,57-6,99 (0,001-0,987), 0,37-3,35 (0,28-0,990), 0,14-4,52 (0,018-0,96) e 0,73-2,26 (0,398-0,993), respectivamente. Avaliando apenas a correlação, os modelos acoplados apresentaram valores próximos a 0, como observado nos modelos MPI-M.MPI-ESM1-2-HR (0,001) e EC-Earth3-Veg (0,009) do CMIP, e no modelo BCC-CSM2-MR (0,018) do hist-1950. Os modelos highresSST-present apresentaram os melhores valores de correlação, sendo, junto com o modelo HadGEM3-GC31-HH do hist-1950, os únicos com correlação superior a 0,90 na área 5.1. Dentre os modelos do CMIP, AMIP e do highresSST-present a área 6.2 apresentou os maiores valores, seguido da 5.2 e 1. A área 5.1 apresentou os menores valores nos modelos AMIP e highresSST-present e o segundo menor no CMIP (6.1 em primeiro). Ou seja, observou-se um melhor desempenho dos

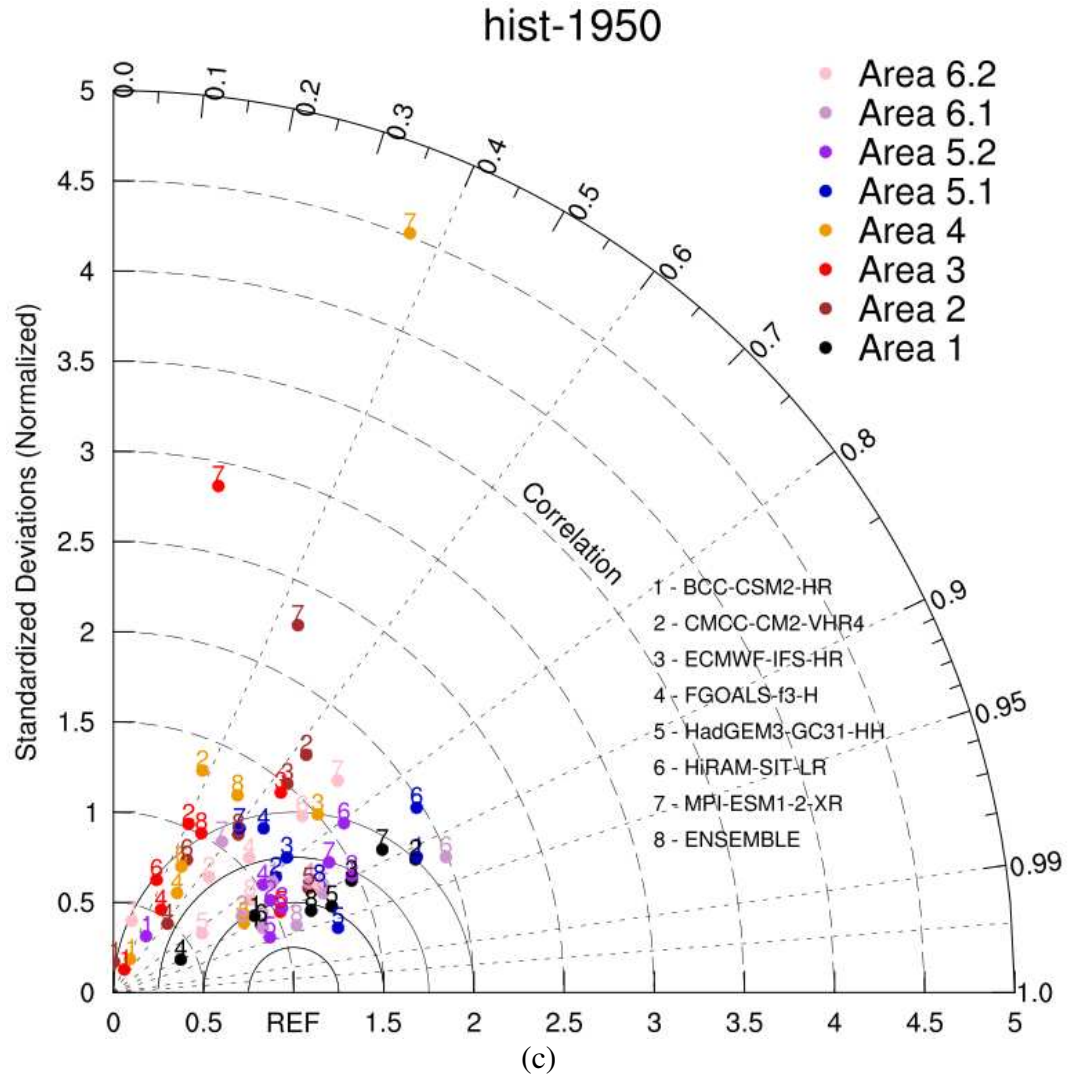
modelos nas regiões ao sul da ZCIT, semiárido e litoral do NEB do que ao norte da ZCIT e ATS adjacente. Quanto aos modelos hist-1950, as maiores correlações encontram-se na área 1, seguidas das áreas 6.1 e 5.2, com o menor valor na área 3. Neste caso, houve melhor desempenho no semiárido e ZCIT do que no ATS adjacente. Em relação ao desvio padrão normalizado, os modelos do highresSST-present apresentaram os valores mais próximos do valor de referência (1), e os modelos do CMIP os mais distantes. Nos modelos CMIP, AMIP e highresSST-present, os valores nas áreas 5.1 e 6.1 (norte da ZCIT) foram os mais próximos de 1, enquanto os mais distantes foram nas áreas 4 e 2 (litoral do NEB e ATS). Isso mostra que, apesar de em determinadas áreas os modelos apresentarem altos valores de correlação, nas mesmas eles apresentam maior dispersão das médias anuais em relação ao GPCP. Com exceção do MPI-ESM1-2-XR, os modelos do hist-1950 apresentaram valores de desvio padrão normalizado, próximos entre as subáreas de estudo, entre 0 e 2 (Fig. 11c). Os modelos do instituto MPI foram os que apresentaram a maior distância do valor de referência nos conjuntos de modelos CMIP, AMIP e hist-1950, e o segundo maior nos modelos highresSST-present.

Vale ressaltar que alguns modelos apresentaram ótimas performances em determinada região e ruins em outras, como no caso do CAMS.CAMS-CSM1-0 que apresentou o maior valor de correlação na área 1 (0,98), no entanto, apresentou o menor entre os modelos highresSST-present na área 5.1 (0,40). Dessa forma, levou-se em consideração uma performance consistente em todas as áreas avaliadas para a escolha dos melhores modelos. Além dos já mencionados ECMWF.ECMWF-IFS-HR e MRI.MRI-AGCM3-2-H no highresSST-present, destacaram-se os modelos: ECMWF.ECMWF-IFS-LR e o CMCC-CM2-VHR4. O ECMWF.ECMWF-IFS-HR apresentou valores de correlação superiores a 0,92 em todas as áreas exceto na área 3 (0,88), resultado superior à sua versão de menor resolução, ECMWF.ECMWF-IFS-LR, com valores superiores a 0,90 exceto nas áreas 3 (0,83) e 5.1 (0,86), onde ambos apresentaram desvio padrão médio próximos: 1,100 (ECMWF.ECMWF-IFS-HR) e 1,108 (ECMWF.ECMWF-IFS-LR). No caso do modelo CMCC-CM2-VHR4, os valores foram superiores a 0,90 e a exceção foi na área 5.1 (0,71). Em relação ao modelo MRI.MRI-AGCM3-2-H; com exceção das áreas 2 (0,80), 3 (0,71) e 4 (0,85); os valores de correlação foram superiores a 0,92, com desvios padrão entre 1,103 e 1,270. Dentre o conjunto de modelos AMIP, destacou-se o modelo CMCC.CMCC-CM2-SR5 com correlação superior a 0,92, exceto na área 5.1 (0,67) apresentou valores superiores a 0,92 com desvio padrão entre 0,76 e 1,62. Dentro deste conjunto, destacaram-se os modelos INM-INM-CMS-0 e CAS-FGOALS-I3-L com correlação superior a 0,90 nas áreas 5.2 e 6.2, respectivamente. O modelo BCC-BCC-CSM2 do CMIP destacou-se por apresentar correlação superior a 0,90 na área 6.2, desempenho superior ao observado na sua versão de maior resolução, onde apresentou os menores valores de correlação (Fig. 11c). Apesar dos resultados inferiores em comparação com o highresSST-present, os modelos ECMWF.ECMWF-IFS-HR e

CMCC-CM2-VHR4 também se destacaram dentre os modelos do hist-1950 (Tabela 4).







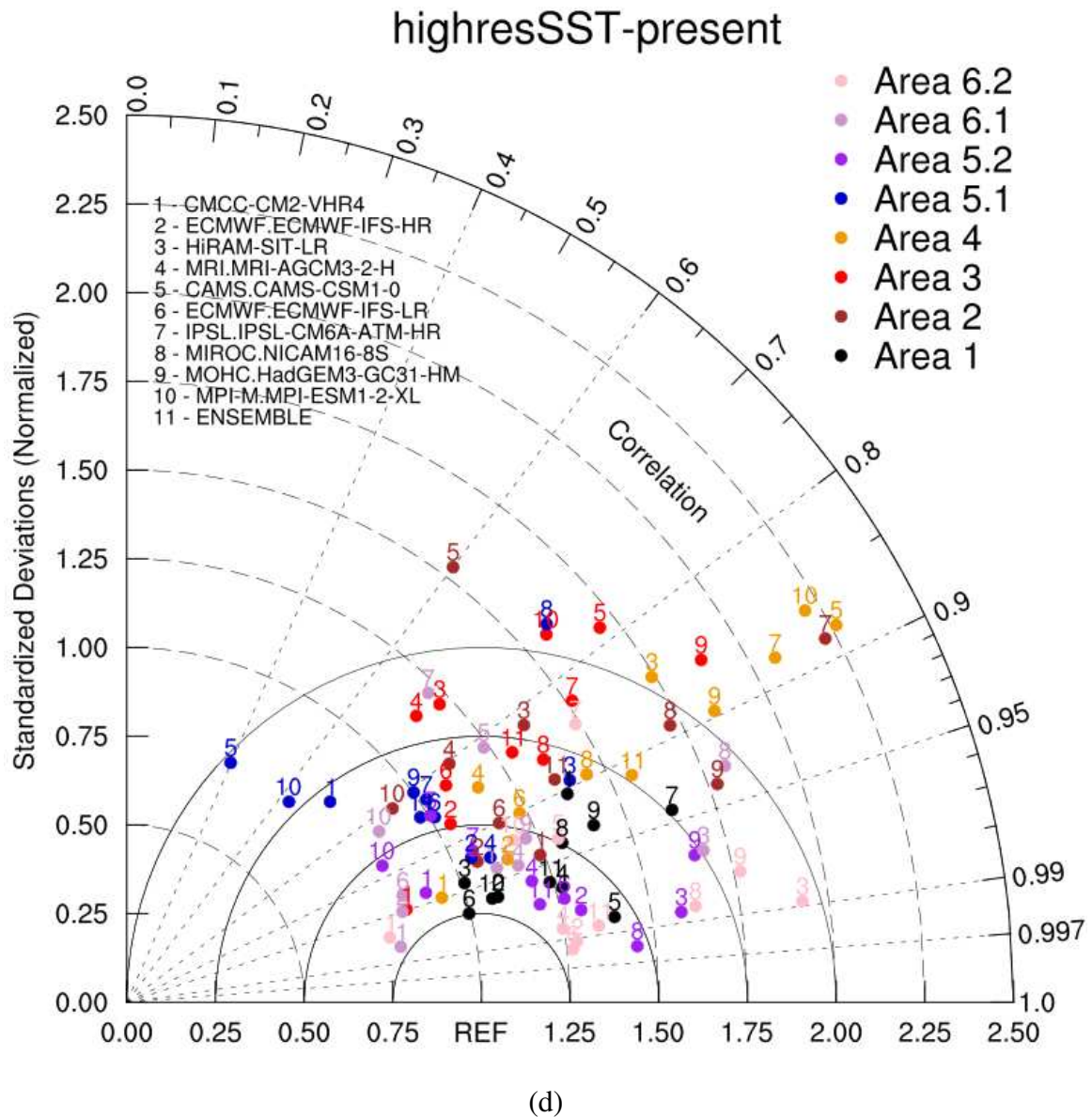
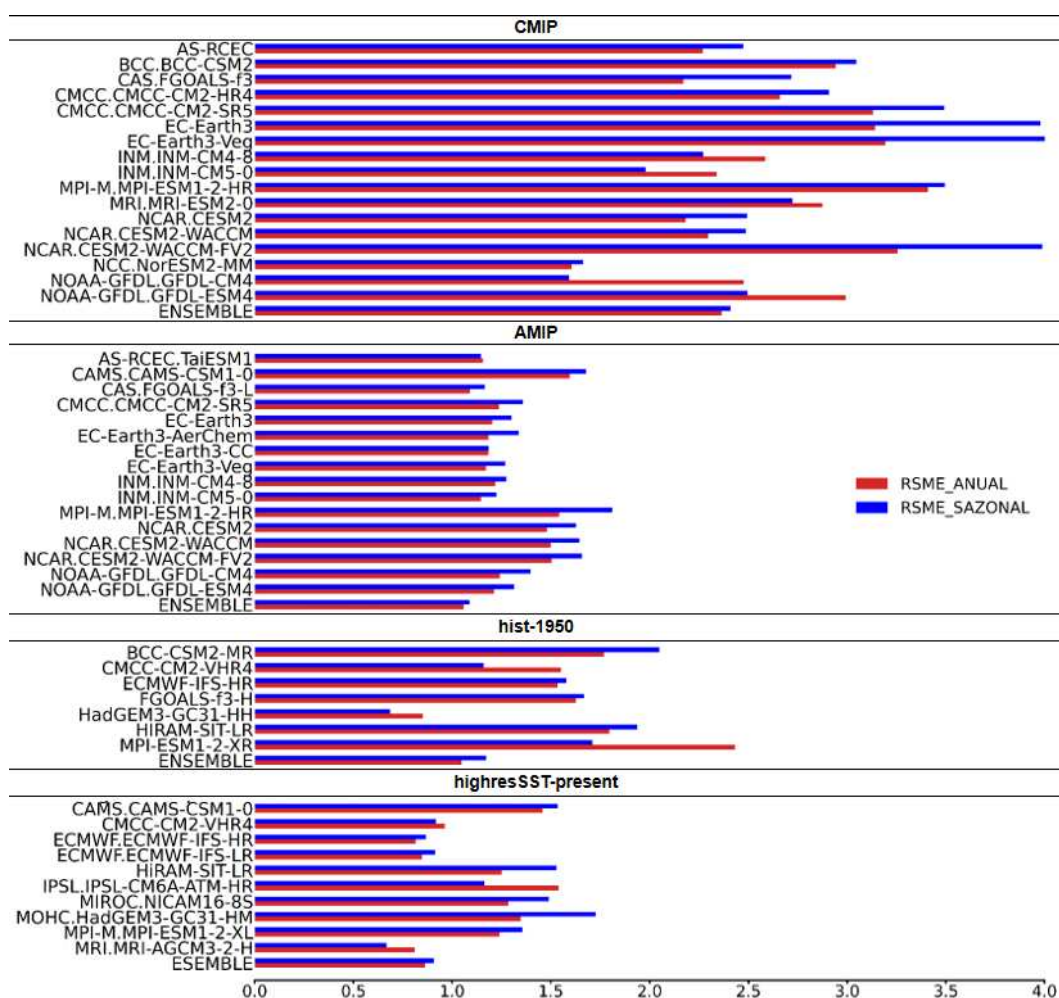


Figura 11. Diagrama de Taylor para os modelos CMIP (a), AMIP (b), hist-1950 (c) e highresSST-present (d). O desvio padrão normalizado é mostrado nos eixos-x e eixo-y e o coeficiente de correlação é mostrado na linha curvada. Os valores são calculados usando a precipitação média anual nas 8 subáreas mostradas na Figura 2.

Para auxiliar na escolha dos modelos, também foram utilizados gráficos com os valores de RSME anual e sazonal (Fig. 12a), e os valores anuais de TSS e da correlação de Pearson (Fig. 12b) correspondentes à média das 8 subáreas para cada modelo. Tabelas com os valores médios de todos os modelos e índices avaliados estão disponíveis no Apêndice. Em relação ao RSME, a análise anual apresentou menores valores em relação à sazonal, sendo os modelos CMIP os que apresentaram os maiores valores: 1,6-3,4 (anual) e 1,6-4,0 (sazonal). Os modelos AMIP apresentaram valores próximos entre si, entre 1 e 1,8, destacando-se os modelos CAS.FGOALS-f3-L, AS-RCEC.TaiESM1 e o ensemble. Dentro dos HighResMIP, 4 modelos highresSST apresentaram RSME inferior a 1, são eles: ECMWF-ECMWF-IFS-HR, ECMWF-ECMWF-IFS-LR, CMCC-CM2-VHR4 e MRI.MRI-AGCM3-2-H, juntamente com o ensemble, e nos modelos

hist-1950 isso ocorreu apenas no modelo HadGEM3-GC31-HH. O índice TSS, assim como a correlação de Pearson, varia de 0 a 1, de modo que quanto mais próximo de 1, maior é a eficiência do modelo. Avaliando a correlação e o índice TSS, observa-se que nos modelos CMIP apenas o modelo NCC.NorESM2-MM (0,619) apresentou TSS superior a 0,6. Os 4 modelos do highresSST citados anteriormente apresentaram TSS superiores a 0,8 e correlação média superior a 0,9. O modelo HadGEM3-GC31-HH do hist-1950 apresentou ambos, correlação e TSS, superiores a 0,8. Os modelos AMIP que se destacaram foram: CMCC.CMCC-CM2-SR5 com TSS de 0,837 e correlação média de 0,910 e o AS-RCEC.TaiESM1 com 0,859 e 0,894, respectivamente. Na tabela 4, encontram-se os 3 modelos que melhor performaram dentre cada ensemble. Observa-se que os modelos CAS.FGOALS-f3-L e AS-RCEC.TaiESM1 destacaram-se em ambos os ensembles CMIP e AMIP, tendo o AMIP apresentado os melhores resultados. O modelo CMCC.CMCC-CM2-SR5 foi o que melhor performou dentre os modelos AMIP, no entanto, a sua versão no CMIP não apresentou resultados satisfatórios, tendo um dos menores TSS (0,401). O modelo ECMWF.ECMWF-IFS-LR do highresSST apresentou ótimos resultados, o segundo melhor dentre os modelos em geral, mas não entrou no conjunto pois apresentava valores levemente inferiores ao modelo ECMWF.ECMWF-IFS-HR, de maior resolução, acentuando assim o papel da resolução no desempenho dos modelos.



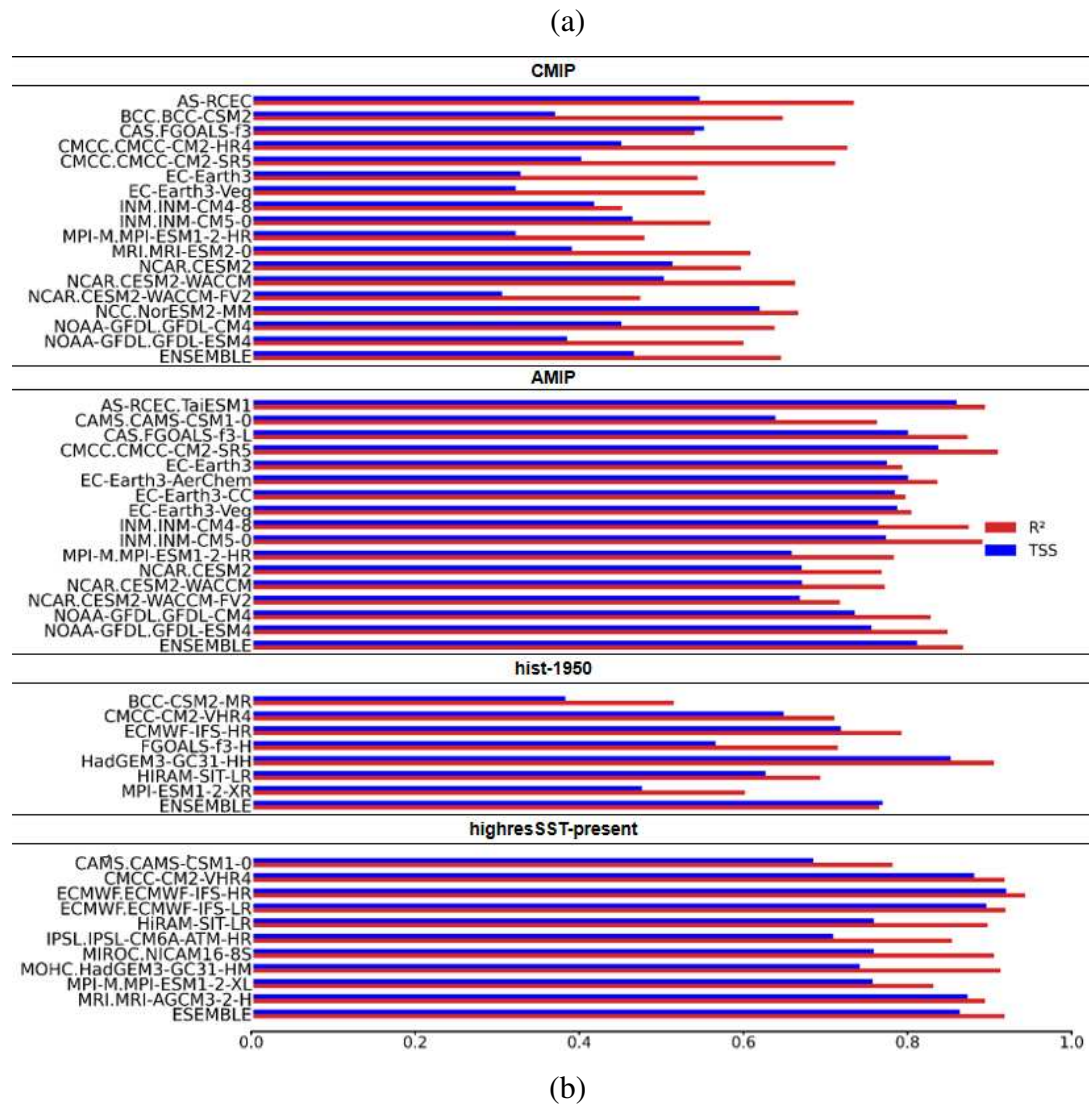


Figura 12. Gráficos com os valores anuais e sazonais de RSME (a), e anuais de R^2 e TSS (b), correspondentes a média das 8 subáreas para cada modelo.

Tabela 4. Valores anuais de TSS, RSME (RSME_A), BIAS (BIAS_A), RSME (RSME_S), Correlação de Person (R^2) e Desvio padrão normalizado (DP); e sazonais de BIAS (BIAS_S) e RSME (RSME_S) dos modelos com a melhor performance de cada conjunto. Todos correspondentes a média das 8 subáreas em cada modelo.

MODELO	TSS	RSME_A	RSME_S	BIAS_A	BIAS_S	R^2	DP
CMIP							
AS-RCEC.TaiESM1	0,545	2,269	2,474	1,323	2,019	0,734	1,790
CAS.FGOALS-f3-L	0,551	2,338	2,715	1,245	2,873	0,539	1,293
NCC.NorESM2-MM	0,619	1,606	1,664	0,719	3,563	0,666	1,263
AMIP							
CAS.FGOALS-f3-L	0,800	1,094	1,166	0,667	2,740	0,873	0,980
AS-RCEC.TaiESM1	0,859	1,158	1,147	0,761	2,929	0,894	1,134
CMCC-CM2-SR5	0,837	1,239	1,362	0,934	2,849	0,910	1,184
hist-1950							
CMCC-CM2-VHR4	0,648	1,552	1,160	0,095	-0,345	0,710	2,095
ECMWF-IFS-HR	0,718	1,535	1,578	0,748	0,776	0,792	2,182
HadGEM3-GC31-HH	0,852	0,852	0,687	-0,028	0,036	0,905	1,871
highresSST-present							
MRI-AGCM3-2-H	0,873	0,810	0,667	0,381	0,285	0,894	1,178
CMCC-CM2-VHR4	0,881	0,964	0,917	0,572	0,508	0,918	0,954

ECMWF-IFS-HR	0,920	0,815	0,866	0,490	0,563	0,943	1,100
--------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

5.4 Análise do TRACK

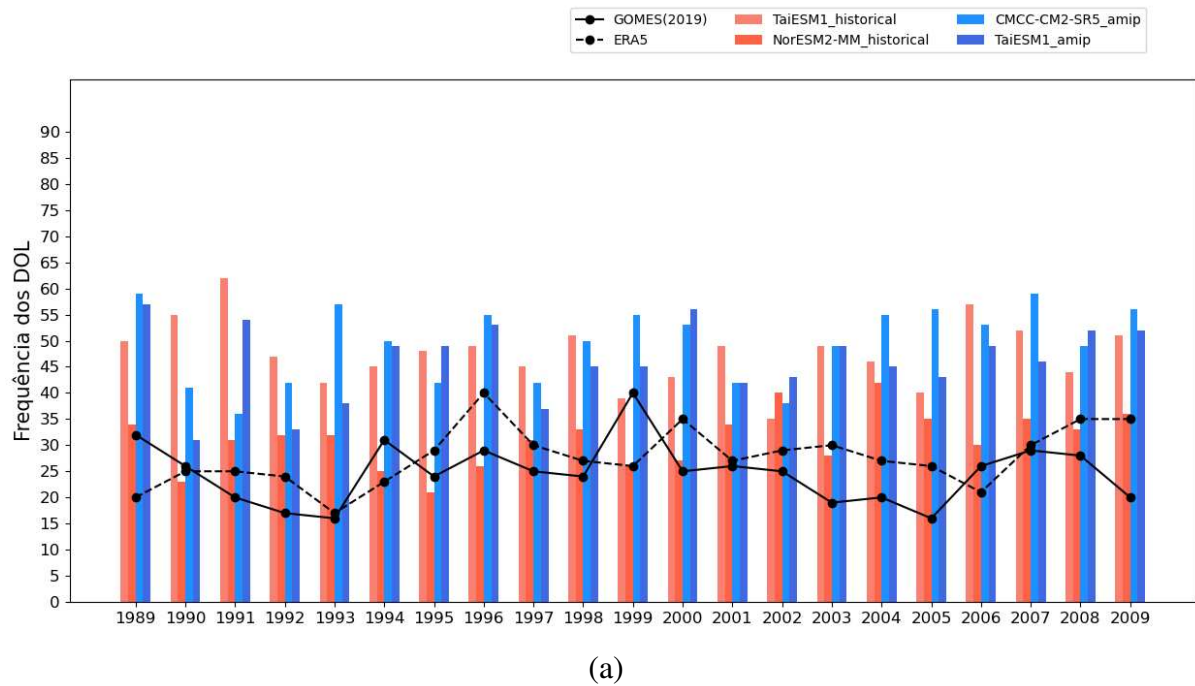
A análise dos modelos pelo TRACK foi realizada em 9 modelos, dois de cada conjunto; os demais não foram incluídos por indisponibilidade. Além disso, diferentemente dos trabalhos de Gomes et al. (2015 e 2019) e Hollis et al. (2023), foi avaliado apenas o nível de 850 hPa pelo mesmo motivo.

Nesta etapa da análise, utilizou-se como referência o estudo climatológico dos DOL de Gomes et al. (2019), que se baseou em uma análise de imagens de satélite juntamente com a utilização do TRACK, alimentado com a reanálise do European Centers for Medium-Range Weather Forecasting Interim (ERA-Interim). Com base nas informações obtidas pelo algoritmo, os DOL identificados nos modelos apresentaram características próximas entre si, com valores médios de tempo de vida entre 5,84 e 6,51 dias, e velocidade de fase entre 6,37 e 7,07 m s⁻¹, e próximos aos da reanálise do ERA5 (5,78 dias e 7,29 m s⁻¹). Em ambos os casos, o tempo de vida dos DOL aproximou-se do valor climatológico (4 a 6 dias), apesar de mais lentos (9,5 m s⁻¹). A frequência dos DOL durante os anos de 1989 a 2019 apresentou semelhanças entre o ERA5 (27 DOL ano⁻¹) e a climatologia (25 DOL ano⁻¹). No entanto, de forma geral, os modelos superestimaram a quantidade de DOL por ano, entre 41,1 e 49,5 DOL ano⁻¹ nos modelos CMIP e AMIP, sendo o modelo NCC.NorESM2-MM do CMIP o mais próximo da climatologia (31,1 DOL ano⁻¹). Tal diferença é acentuada nos modelos HighResMIP acoplado e atmosférico, que apresentaram 3 vezes mais DOL (74,7 e 78,6 DOL ano⁻¹) em comparação à média climatológica e ao ERA5 (Tabela 5). Como constatado por Hollis et al. (2023), o nível de maior destaque dos DOL no ATS é em 700 hPa, dessa forma o fato de apenas 850 hPa ser avaliado pode ter acarretado em uma maior quantidade de ruído (centros de vorticidade ciclônica não caracterizados como DOL) capturado pelo algoritmo, principalmente nos modelos de resolução aumentada.

Apesar de a frequência dos DOL do ERA5 e a climatológica (ERA-Interim) apresentarem fases opostas entre 1989 e 1993, ainda é possível observar o mesmo padrão de variabilidade ao longo dos anos (Fig. 13). A figura 13 apresenta a frequência dos DOL nos anos de 1989 a 2009 para cada modelo, logo, é possível observar que o modelo atmosférico CMCC-CM2-SR5 foi capaz de reproduzir a variabilidade interanual dos DOL observada na climatologia de Gomes et al. (2019). Os modelos acoplados NCC.NorESM2-MM (CMIP) e CMCC-CM2-VHR4 (hist-1950) foram os que mais se aproximaram da variabilidade observada dos ERA5. No entanto, a maioria dos modelos não foi capaz de reproduzir a variação interanual dos DOL tanto da climatologia quanto do ERA5, de modo a não ser possível observar variações nos anos de El Niño e La Niña.

Tabela 5. Características dos DOL dos melhores modelos CMIP6 seleccionados e da reanalise do ERA5 identificados por meio do método TRACK.

MODELOS	Velocidade de fase média (m s^{-1})	Tempo de vida médio (dias)	Frequência média (DOL ano ⁻¹)
CMIP			
NCC.NorESM2-MM	6,65	6,51	31,1
AS-RCEC.TaiESM1	6,37	6,31	47,6
AMIP			
CMCC-CM2-SR5	6,62	6,42	49,5
CAS.FGOALS-f3-L	7,07	5,83	46,1
hist-1950			
CMCC-CM2-VHR4	6,90	6,12	64,5
ECMWF-IFS-HR	6,94	6,68	75,0
highresSST-present			
CMCC-CM2-VHR4	6,70	5,84	74,7
ECMWF-IFS-HR	7,07	5,99	78,6
ERA5			
	7,29	5,78	27,7



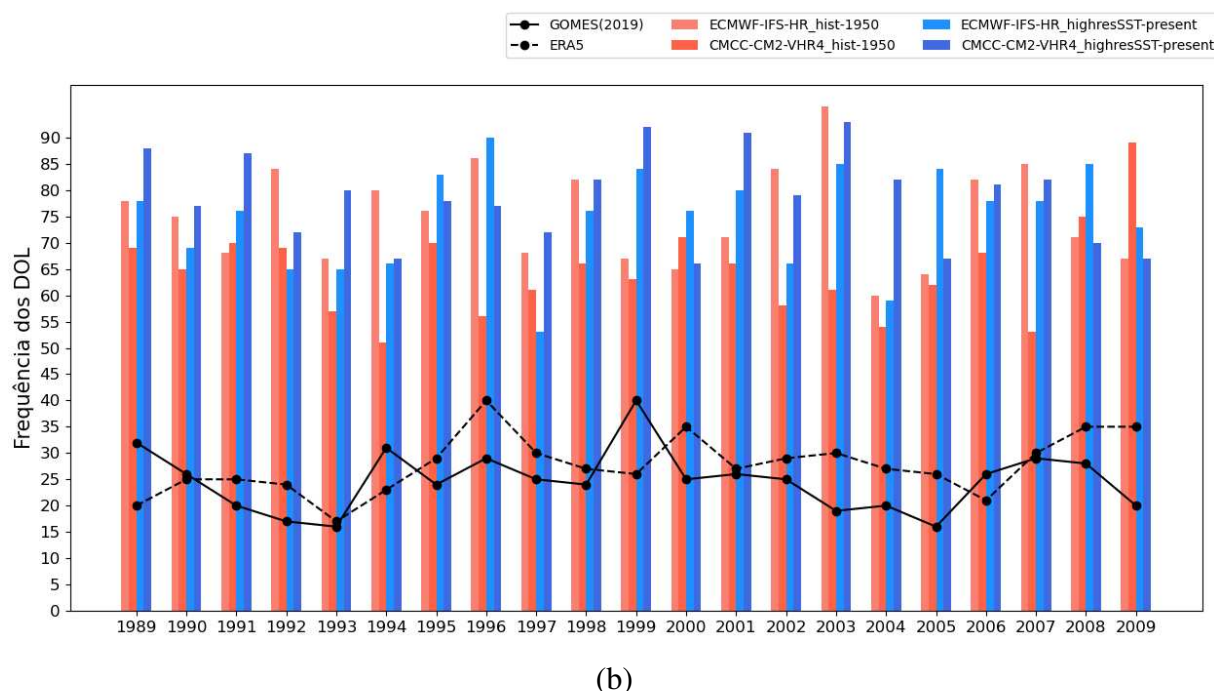
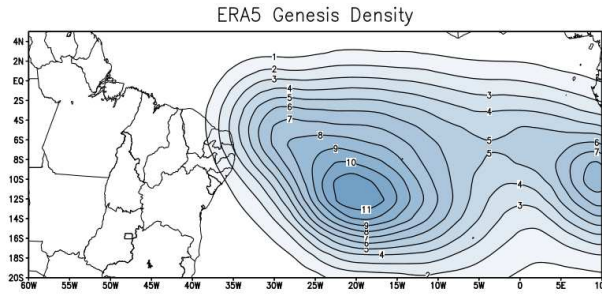
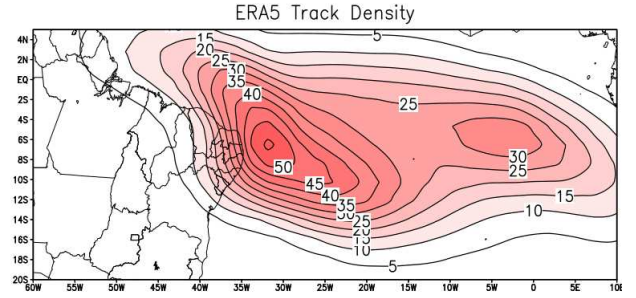


Figura 13. Frequência dos DOL de 1989 a 2019 identificados nos modelos CMIP e AMIP (a); e hist-1950 e highresSST-present (b). Os modelos acoplados correspondem às barras avermelhadas e os atmosféricos às barras azuladas. A linha preta contínua pontilhada representa a frequência dos DOL identificados no ERA5, e a linha contínua representa a frequência climatológica dos DOL de Gomes *et al.* (2019).

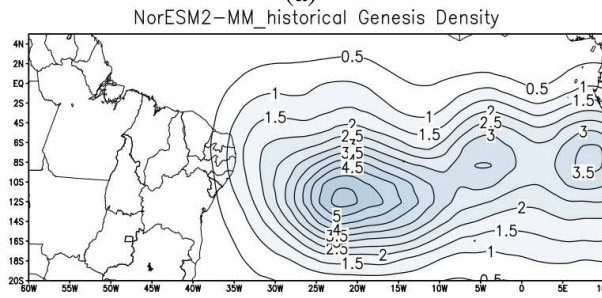
Avaliando o mapa de gênese dos DOL do ERA5 (Fig. 14a) observou-se um núcleo de formação entre 25-15° W, com inclinação noroeste-sudeste, e outro próximo à costa africana entre 5-10° E. A posição desses núcleos corroboram com os dois principais sistemas associados à formação dos DOL segundo Gomes *et al.* (2019), os remanescentes frontais que se propagam em baixas latitudes e os aglomerados convectivos da costa oeste da África. Esses núcleos foram observados em todos os modelos, porém, com exceção dos modelos HighResMIP, os demais apresentaram um núcleo mais ao norte entre os já citados e outro próximo ao litoral do NEB (Fig. 14b-e). No mapa de densidade dos DOL do ERA5, foram identificados dois centros de maior frequência de DOL, um próximo ao litoral do NEB e o outro próximo à costa oeste africana, coincidindo com as regiões de gênese destes sistemas. Os modelos CMCC-CM2-VHR4 do hist-1950 e highresSST-present (Fig. 14m) foram os únicos que não captar esses dois núcleos, apesar de sua magnitude ser mais próximo em relação aos modelos CMIP e AMIP. De forma geral, os modelos HighResMIP foram os que melhor representaram a magnitude de ambos os mapas, destacando os modelos do ECMWF (Fig. 14g, i, p, r).



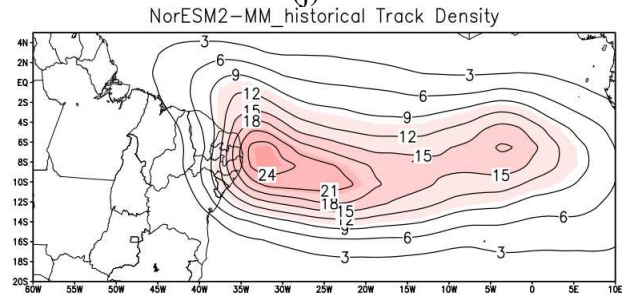
(a)



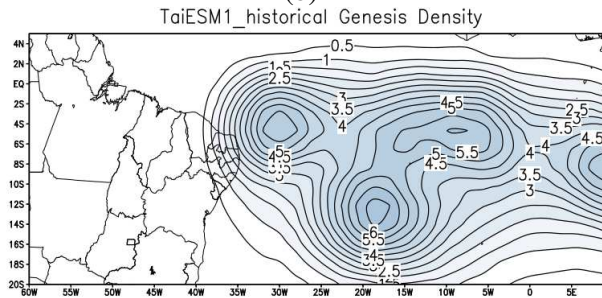
(j)



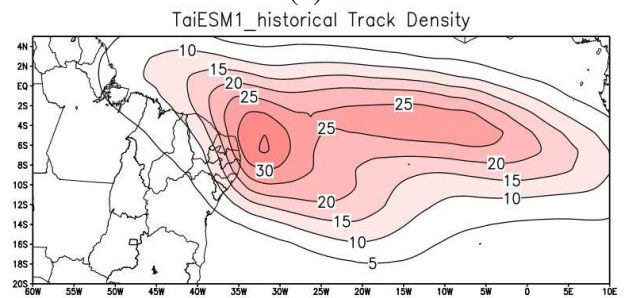
(b)



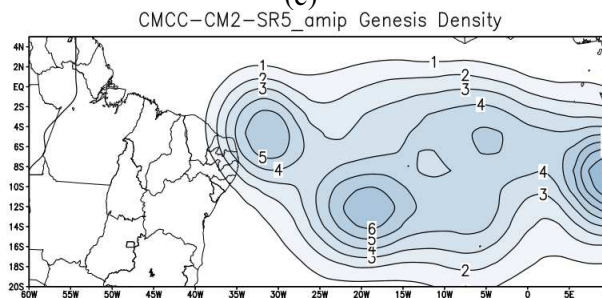
(k)



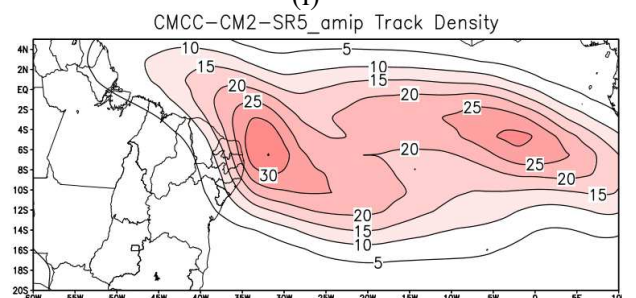
(c)



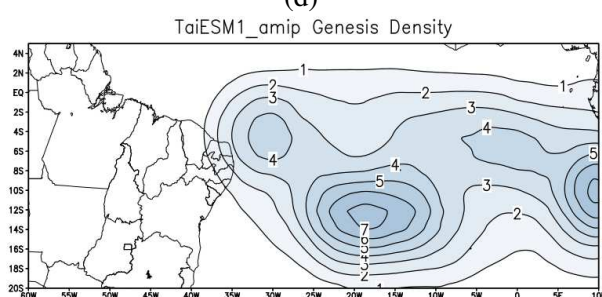
(l)



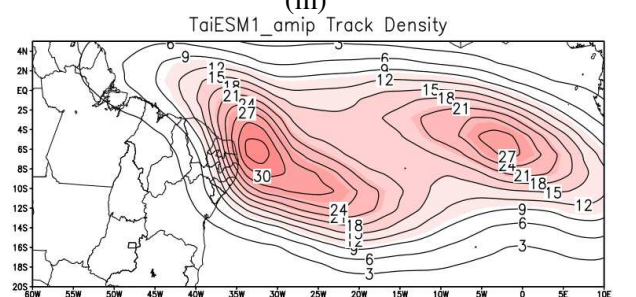
(d)



(m)



(e)



(n)

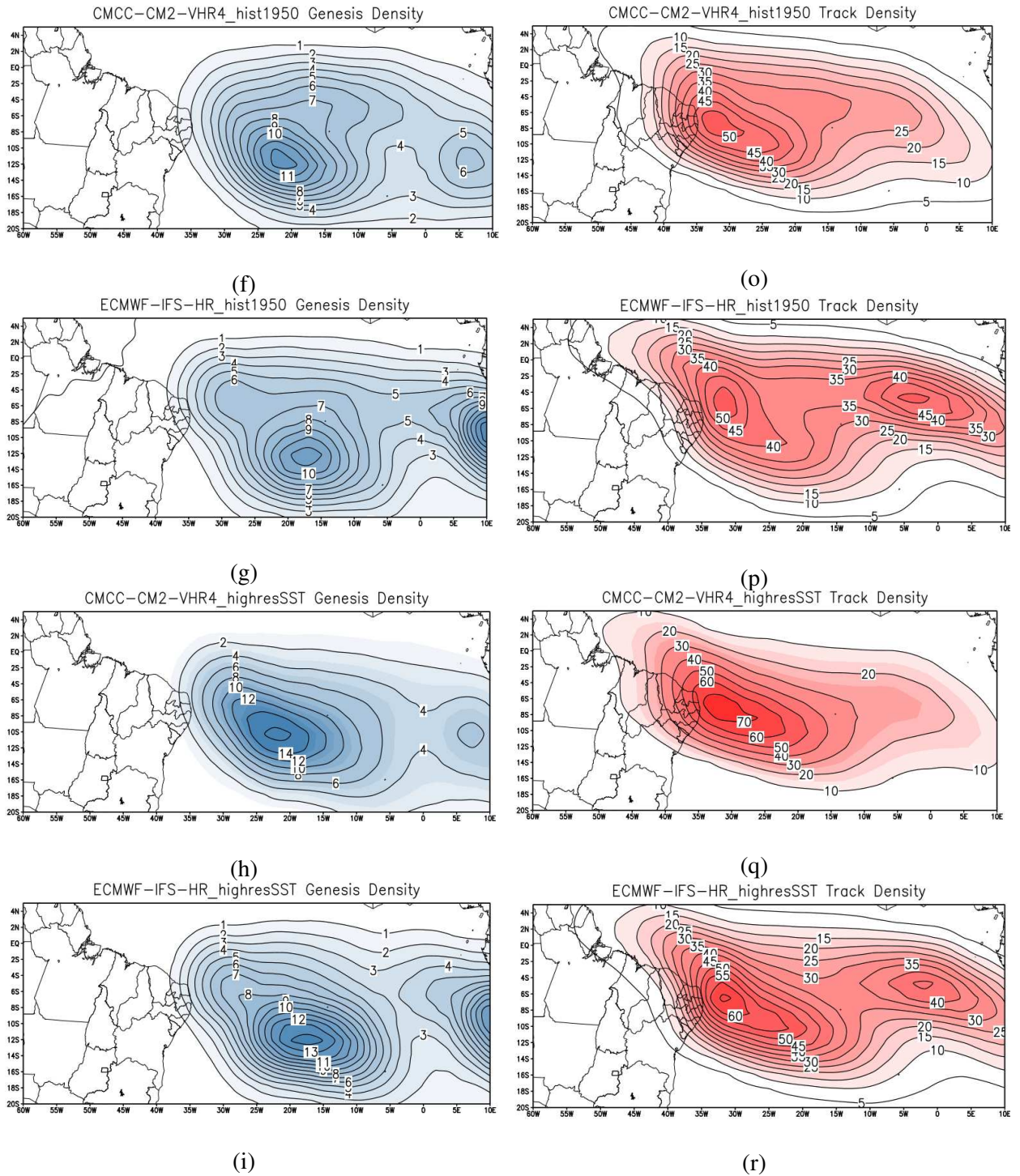


Figura 14. Mapas de gênese (coluna esquerda) e densidade dos DOL (coluna direita) para a reanalise do ERA5 (a, j) e para os modelos CMIP: NorESM2 (b, k) e TaiESM1(c, l); AMIP: CMCC-CM2 (d, m) e TaiESM1 (e, n); hist-1950: CMCC-CM2-VHR4 (f, o), ECMWF-IFS-HR (g, p); e highresSST: CMCC-CM2-VHR4 (h, q), ECMWF-IFS-HR (i, r).

6. CONCLUSÃO

Foram avaliados 17 modelos do CMIP (histórico), 16 do AMIP, 7 do hist-1950 e 10 do highresSST-present. A análise dos ensembles mostrou uma representação coerente dos padrões espaciais de precipitação anual e sazonal, em relação aos dados do GPCP. No entanto, nenhum dos ensembles foi capaz de representar a intensidade de precipitação sobre o litoral do NEB, subestimando os valores nesta mesma região, bem como superestimaram no norte do NEB e ATS. Observou-se que os quatro conjuntos de modelos capturaram o ciclo anual de precipitação nas áreas analisadas. No primeiro semestre do ano (janeiro a junho) houve maior discrepância em relação aos GPCP de modo que os ensembles superestimaram os valores de precipitação em todas as subáreas exceto nas 5.1 e 6.1 onde os mesmos superestimaram a precipitação. Observou-se as maiores (menores) incerteza entre os modelos nas latitudes mais ao norte (sul), com maior incerteza nos meses de janeiro a junho. Tanto a incerteza quanto a discrepância com os dados do GPCP foram mais acentuados na ZCIT, em especial a parte norte, e no ensemble do CMIP. Nas demais áreas os ensembles apresentaram maior proximidade com os dados do GPCP ao menos entre os meses julho a outubro.

Na análise individual dos modelos CMIP, AMIP, hist-1950 e highresSST-present observou-se valores de desvio padrão normalizado (correlação) entre 0,57 e 6,99 (0,001–0,987), 0,37 e 3,35 (0,28–0,990) e 0,73 e 2,26 (0,398–0,993), respectivamente. Avaliando apenas a correlação, observou-se um melhor desempenho dos modelos nas regiões sul da ZCIT, semiárido e litoral do NEB do que ao norte da ZCIT e no ATS adjacente. Enquanto que os desvios mais próximos do referencial ocorreram nas áreas correspondentes ao norte da ZCIT, e os mais distantes no ATS e no litoral do NEB. Isso mostra que, apesar de em determinadas áreas os modelos apresentarem altos valores de correlação, as mesmas áreas apresentam maior dispersão das médias anuais em relação ao GPCP. Os piores valores de correlação e desvio padrão foram observados nos modelos CMIP, enquanto os do highresSST-present apresentaram os melhores; isso também se refletiu nos índices RSME e TSS. Os modelos CAS.FGOALS-f3-L e AS-RCEC.TaiESM1 destacaram-se nos conjuntos, CMIP e AMIP, com o AMIP apresentando melhor desempenhos em todos os parâmetros estatísticos avaliados. O CMCC.CMCC-CM2-SR5 foi o que melhor performou dentre os modelos AMIP, no entanto a sua versão no CMIP apresentou um dos menores TSS. Os modelos CMCC-CM2-VHR4 e ECMWF.ECMWF-IFS-HR destacaram nos conjuntos hist-1950 e highresSST, com sua versão atmosférica apresentando os melhores resultados. Dessa forma, nesta primeira etapa da análise, observou-se um desempenho consideravelmente superior dos modelos atmosféricos, em especial o de maior resolução (highresSST-present), em comparação com os modelos acoplados.

Com base nos resultados foram selecionados os 3 modelos que melhor performaram dentre

cada conjunto: CMIP (AS-RCEC.TaiESM1, CAS.FGOALS-f3-L e NCC.NorESM2-MM), AMIP (CAS.FGOALS-f3-L, AS-RCEC.TaiESM1 e CMCC.CMCC-CM2-SR5), hist-1950 (HadGEM3-GC31-HH, CMCC-CM2-VHR4 e ECMWF.ECMWF-IFS-HR) e highresSST (MRI.MRI-AGCM3-2-H, CMCC-CM2-VHR4 e ECMWF.ECMWF-IFS-HR).

Por motivo de indisponibilidade de dados, a análise dos DOL pelo TRACK foi realizada em 9 dos 12 modelos escolhidos. Nestes, observou-se valores médios de tempo de vida (~ 6 dias) e velocidade de fase ($\sim 7 \text{ m s}^{-1}$) dos DOL próximos aos valores do ERA5 (5,78 dias e $7,29 \text{ m s}^{-1}$), e à climatologia quanto ao tempo de vida (4 a 6 dias) porém mais lentos ($9,5 \text{ m s}^{-1}$). Apesar da frequência dos DOL do ERA5 e a climatológica (ERA1) apresentarem fases opostas entre 1989 e 1993, ainda é possível observar o mesmo padrão de variabilidade ao longo dos anos. O mesmo não ocorre nos modelos, de modo que superestimaram a quantidade de DOL por ano ($\sim 45 \text{ DOL ano}^{-1}$) em relação ao ERA5 e à climatologia ($\sim 26 \text{ DOL ano}^{-1}$), sendo o modelo NorESM2-MM o que mais se aproximou dos valores climatológicos ($31,1 \text{ DOL ano}^{-1}$). Já os modelos HighResMIP apresentaram frequência três vezes maior. No mapa de gênese dos DOL do ERA5, observaram-se dois núcleos de formação: um sobre o ATS e outro próximo à costa africana, coincidindo com os dois principais sistemas associados à formação dos DOL, os remanescentes frontais e os aglomerados convectivos da costa oeste da África. Ambos os núcleos foram representados em todos os modelos avaliados. Em relação à densidade dos DOL, no geral os modelos capturaram dois centros de maior frequência de DOL, um próximo ao litoral do NEB e o outro próximo à costa oeste africana, coincidindo com as regiões de gênese destes sistemas, sendo o CMCC-CM2-VHR4 o único que não capturou esse padrão.

Com este estudo conclui-se que apesar de melhorias ainda serem necessárias nos modelos CMIP6, estes conseguiram simular os padrões climatológicos espaciais e temporais de precipitação, assim como as características dos DOL sobre o NEB e ATS adjacente. De modo que, com exceção da variabilidade interanual dos DOL capturadas pelos modelos, os modelos atmosféricos apresentaram melhor despenho em capturar estes padrões, em destaque os modelos HighResMIP. De modo que, o aumento da resolução espacial apresentou papel significativo nos resultados dos modelos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. M. B. Um vórtice ciclônico de altos níveis sobre o NEB e Atlântico adjacente no verão de 1999-2000. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 1, p. 115-122, 2001.
- ASNANI, G. C. **Tropical meteorology**. Asnani, Indian Institute of Tropical Meteorology, 1993.
- BABAOUSMAIL, H.; HOU, R.; AYUGI, B.; OJARA, M.; NGOMA, H.; KARIM, R.; RAJASEKAR, A.; ONGOMA, V. et al. Evaluation of the performance of CMIP6 models in reproducing rainfall patterns over North Africa. **Atmosphere**, v. 12, n. 4, p. 475, 2021.
- BARBOSA, R. L.; OYAMA, M. D.; MACHADO, L. A. T. Climatologia das perturbações convectivas iniciadas na costa Norte do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 1, p. 107-117, 2006.
- BAZZANELA, A. C.; DEREZYNSKI, C.; LUIZ-SILVA, W.; REGOTO, P. Performance of CMIP6 models over South America. **Climate Dynamics**, p. 1-16, 2023.
- BECK, H.E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E. F. - Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-Km resolution. **Nature Scientific Data**, 5, 180214, 2018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>.
- CHANG, C. P. Westward propagating cloud patterns in the tropical Pacific as seen from time-composite satellite photographs. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 27, n. 1, p. 133-138, 1970.
- CHOU, Sin Chan et al. Análise de distúrbios ondulatórios de leste sobre o oceano Atlântico Equatorial Sul. 1990.
- COOK, K. Generation of the African Easterly Jet and Its Role in Determining West African Precipitation. **Journal of Climate**, v. 12, p. 1165-1184, 1999.
- COUTINHO, E.C.; FISCH, G. Distúrbios ondulatórios de leste (DOLs) na região do Centro de Lançamento de Alcântara-MA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, p. 193-203, 2007.

DIAS, C. G.; REBOITA, M.S. Assessment of CMIP6 Simulations over Tropical South America. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, p. 1282-1295, 2021.

DIEDHIOU, A.; JANICOT, S.; VILTARD, A.; FELICE, P. Evidence of two regimes of easterly waves over West Africa and the tropical Atlantic. **Geophysical Research Letters**, v. 25, n. 15, p. 2805-2808, 1998.

DOS REIS, Jean Souza; GONÇALVES, Weber Andrade; MENDES, David. Climatology of the dynamic and thermodynamic features of upper tropospheric cyclonic vortices in Northeast Brazil. **Climate Dynamics**, v. 57, n. 11, p. 3413-3431, 2021.

DONG, T.; DONG, W. Evaluation of extreme precipitation over Asia in CMIP6 models. **Climate Dynamics**, p. 1-19, 2021.

ESPINOZA, E. S. **Distúrbios nos Ventos de Leste no Atlântico Tropical**. 149 p. 1996. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996.

EYRING, V., BONY, S., MEEHL, G. A., SENIOR, C., STEVENS, B., STOUFFER, R. J., TAYLOR, K. E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organisation. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 8, n. 12, 2015.

FAN, X., DUAN, Q., SHEN, C., WU, Y., XING, C. Global surface air temperatures in CMIP6: historical performance and future changes. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, p. 104056, 2020

FEDOROVA, N; DOS SANTOS, D. M. B.; SEGUNDO, M. M. L.; LEVIT, V. Middle Tropospheric Cyclonic Vortex in Northeastern Brazil and the Tropical Atlantic. **Pure and Applied Geophysics**, v. 173. p. 1-15, 2016.

FERREIRA, N. J.; CHAN, C. S.; SATYAMURTI, P. Análise dos distúrbios ondulatórios de leste sobre o Oceano Atlântico Equatorial Sul. In: **ANAIS do VI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Salvador**. p. 462-468, 1990.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 15-28, 2005.

FIRPO, M. A. F.; GUIMARÃES, B. D. S., DANTAS, L. G., SILVA, M. G. B. D., ALVES, L. M.; CHADWICK, R.; LLOPART, M. A.; OLIVEIRA; G. S. D. Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present day climate in Brazil. **Frontiers in Climate**, p. 170, 2022.

FREITAS, H. Chuvas causam pelo menos 35 mortes e destruição no Recife e região. Metrôpoles. Brasília, 27 maio de 2022. Disponível em: <<https://www.metropoles.com/brasil/chuvas-causam-pelo-menos-33-mortes-e-destruicao-no-recife-e-regiao>>. Acesso em: 21 fev. 2024.

GOMES, H. B., AMBRIZZI, T., HERDIES, D. L., HODGES, K.; PONTES da SILVA, B. F. Easterly wave disturbances over Northeast Brazil: an observational analysis. **Advances in Meteorology**, v. 2015, 2015.

GOMES, H. B., AMBRIZZI, T., PONTES da SILVA, B F., HODGES, K., SILVA DIAS, P L., HERDIES, D L., SILVA, M C L., GOMES, H B. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 3, p. 1393-1411, 2019.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 1, n. 1, p. 19-28, 1986.

GATES, W. L.; BOYLE, J. S.; COVEY, C.; DEASE, C. G.; DOUTRIAUX, C. M.; DRACH, R. S.; WILLIAMS, D. N. An overview of the results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 80, n. 1, p. 29-56, 1999.

GRAY, W. M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. **Monthly Weather Review**, v. 96, p. 669-700, 1968.

HAARSMA, R. J. *et al.* High resolution model intercomparison project (HighResMIP v1. 0) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 11, p. 4185-4208, 2016.

HALL, B. A. Westward-moving disturbances in the South Atlantic coinciding with heavy rainfall events at Ascension Island. **Meteorological Magazine**, v. 118, n. 1405, p. 175-181, 1989.

HASTENRATH, S., HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.103, p.77-92, 1977.

HOLLIS, M. A.; MCCRARY, R. R.; STACHNIK, J. P.; LEWIS-MERRITT, C.; MARTIN, E. R. A global climatology of tropical easterly waves. **Climate Dynamics**, p. 1-16, 20023.

HODGES, K. I. Feature Tracking on the Unit Sphere. *Monthly Weather Review*, v.123, p. 3458-3465, 1995.

HODGES, K. I. Adaptive constraints for feature tracking. *Monthly Weather Review*, v. 127, n. 6, p. 1362-1373, 1999.

HOPSCH, S. B.; THORNCROFT, C. D.; HODGES, K. I; AIYYER, A. West African storm tracks and their relationship to Atlantic tropical cyclones. *Journal of Climate*, v. 20, n. 11, p. 2468-2483, 2007.

HOUGHTON, J.; CALLANDER, B.; VARNEY, S. Climate change 1992: The supplementary report to the IPCC scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press. 1992.

HUFFMAN, G. J.; BEHRANGI, A.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. GPCP Version 3.1 Satellite-Gauge (SG) Combined Precipitation Data Set. **NASA GES DISC: Greenbelt, MD, USA**, 2020.

KAYANO, M. T. **Um estudo climatológico e sinótico utilizando dados de radiossondagem (1968-1976) de Manaus e Belém**. 1979. 111p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1979.

KOUSKY, V. E. Frontal Influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, p. 1140-1153, 1979.

KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation in northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 4, p. 488-498, 1980.

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, v. 33, n. 6, p. 538-551, 1981.

MANABE, S.; BRYAN, K. Climate calculations with a combined ocean-atmosphere model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 26, n. 4, p. 786-789, 1969.

MARENGO, J. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. **Parcerias Estratégicas**, v. 27, p.149-75, 2008.

MEEHL, G. A.; BOER, G. J.; COVEY, C.; LATIF, M.; STOUFFER, R. J. Intercomparison makes for a better climate model. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 78, n. 41, p. 445-451, 1997.

MEEHL, G.; COVEY, C.; MCAVANEY, B.; LATIF, M.; RONALD, S. Overview of the coupled model intercomparison project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 86, n. 1, p. 89-93, 2005.

MEDEIROS, F. J.; DE OLIVEIRA, C. P.; AVILA-DIAZ, A. Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6. **Weather and Climate Extremes**, v. 38, p. 100511, 2022.

MELO, A. B. C.; CAVALCANTI, I.F.A.; SOUZA, P. P. Zona de convergência intertropical do atlântico. In: Cavalcanti, I.F.A.; Ferreira, N.J.; Silva, M.G.A.J.; Dias, M.A.F.S. *Tempo e clima no Brasil. Oficina de textos*. São Paulo, 2009.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, pp. 1-10, 2002.

MUNDAY, C.; WASHINGTON, R. Systematic climate model rainfall biases over southern Africa: Links to moisture circulation and topography. **Journal of Climate**, v. 31, n. 18, p. 7533-7548, 2018.

MOTA, G. V. **Estudo Observacional de Distúrbios Ondulatórios de Leste no Nordeste Brasileiro**. 92 p. 1997. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

NEIVA, E. J. F. **An investigation of wave-type disturbances over the tropical South-Atlantic**. 1975. Tese de Doutorado. Monterey, California. Naval Postgraduate School.

NGOMA, H.; WEN, W.; AYUGI, B.; BABAOUSMAIL, H.; KARIM, R.; ONGOMA, V. Evaluation of precipitation simulations in CMIP6 models over Uganda. **International Journal of Climatology**, 2021.

NOBRE, P. On the genesis of anomalous SST and rainfall patterns over the tropical Atlantic Basin. Ph.D. Thesis, University of Maryland at College Park, 1993.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of climate**, v. 9, p. 2464-2479, 1996.

OLIVEIRA, P. D.; SANTOS E SILVA, C. M.; LIMA, K. C. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, p. 77-90, 2017.

ORTEGA, G.; ARIAS, P. A.; VILLEGAS, J. C.; MARQUET, P. A.; NOBRE, P. Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 15, p. 6713-6735, 2021.

PALMER, C.P. Tropical meteorology. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 78, p. 126-63, 1952.

PONTES DA SILVA, B. F. Contribuição dos Distúrbios Ondulatórios de Leste para a chuva no Leste do Nordeste do Brasil: evolução sinótica média e simulações numéricas. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 2011.

PORTELA, J. Tragédia em Pernambuco: governador pede apoio das Forças Armadas. Brasília, 28 maio de 2022. Disponível em: < <https://www.metropoles.com/brasil/tragedia-em-pernambuco-governador-pede-apoio-das-forcas-armadas>>. Acesso em: 21 fev. 2024.

REBOITA, Michelle Simões; GAN, Manoel Alonso; ROCHA, Rosmeri Porfírio da and AMBRIZZI, Tércio. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia [online]**, v.25, n.2, pp.185-204, 2010. ISSN 0102-7786.

RENNICK, Mary Alice. The generation of African waves. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 33, n. 10, p. 1955-1969, 1976.

REED, R. J.; NORQUIST, D. C.; RECKER, E. E. The structure and properties of African wave disturbances as observed during phase III of GATE. **Monthly Weather Review**, v. 105, n. 3, p. 317-333, 1977.

REED, R. J.; RECKER, E. E. Structure and properties of synoptic-scale wave disturbances in the equatorial western Pacific. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 28, n. 7, p. 1117-1133, 1971.

REYNOLDS, R. Tropical meteorology. **Progress in Physical Geography**, v. 9, n. 2, p. 157-186, 1985.

RIEHL, H. On the formation of West Atlantic hurricanes. **Department of Meteorology, University of Chicago, Misc. Report**, v. 24, 1948.

RIEHL, H. **Tropical meteorology**. McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y., v. 392, pp, 1954.

RIVERA, J. A.; ARNOULD, G. Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). **Atmospheric Research**, v. 241, p. 104953, 2020.

RODRIGUES, D. T.; GONÇALVES, W. A.; SPYRIDES, M. H. C.; SANTOS E SILVA, C. M. Spatial and temporal assessment of the extreme and daily precipitation of the Tropical Rainfall Measuring Mission satellite in Northeast Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 549-572, 2020.

SERRA, Y. L.; KILADIS, G. N.; HODGES, K. I. Tracking and mean structure of easterly waves over the intra-Americas sea. **Journal of Climate**, v. 23, p. 4823–4840, 2010.

SHIRU, M. S.; CHUNG, E. S. Performance evaluation of CMIP6 global climate models for selecting models for climate projection over Nigeria. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 1-17, 2021.

TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 106, p. 7183-7192, 2001.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American meteorological Society**, v. 93, n. 4, p. 485-498, 2012.

THORNCROFT, C. D.; HODGES, K. I. African Easterly Wave Variability and its Relationship to Atlantic Tropical Cyclone Activity. **Journal of Climate**, v. 14, p. 1166- 1179, 2001.

TORRES, R. R.; FERREIRA, N. J. Case studies of easterly wave disturbances over Northeast Brazil using the Eta Model. **Weather and Forecasting**, v. 26, n. 2, p. 225-235, 2011.

TOUZÉ-PEIFFER, L.; BARBEROUSSE, A.; LE TREUT, H. The Coupled Model Intercomparison Project: History, uses, and structural effects on climate research. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 11, n. 4, p. e648, 2020.

TUKEY, J. W. Exploratory data analysis. v. 2, p. 131-160, 1977.

WALLACE, J. M.; CHANG, L. A. On the application of satellite data on cloud brightness to the study of tropical wave disturbances. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 29, n. 7, p. 1400-1403, 1972.

XIE, P.; ARKIN, P. A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. **Bulletin of the american meteorological society**, v. 78, n. 11, p. 2539-2558, 1997.

YAMAZAKI, Y. **Estudos teóricos e sinóticos dos distúrbios tropicais**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos. 56 pp, 1975.

YAMAZAKI, Y.; RAO, V. B. Tropical cloudiness over the south Atlantic Ocean. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 55, n. 2, p. 205-207, 1977.

ZEHR, R. M. Tropical cyclogenesis in the western North Pacific. NOAA Technical Report NESDIS 61, U.S. **Department of Commerce**, Washington, DC, 181 f, 1992

APÊNDICE

Tabelas com os valores, correspondente a média das 8 subáreas, de TSS (anual), RSME (anual e sazonal), BIAS (anual e sazonal), R^2 (anual) e Desvio padrão normalizado (anual) de todos os modelos CMIP, AMIP e HighResMIP avaliados no estudo.

CMIP																		
ENSEMBLE	NOAA-GFDL.GFDL-ESM4	NOAA-GFDL.GFDL-CM4	NCC.NoESM2-MM	NCAR.CESM2-WACCM-FV2	NCAR.CESM2-WACCM	NCAR.CESM2	MRI.MRI-ESM2-0	MPI.M.MPI-ESM1-2-HR	INM.INM-CM5-0	INM.INM-CM4-8	EC-Earth3-Veg	EC-Earth3	CMCC.CMCC-CM2-SR5	CMCC.CMCC-CM2-HR4	CAS.FGOALS-f3	BCC.BCC-CSM2	AS-RCEC	
AREA 1																		
BIAS_A	1.185	1.949	-0.755	2.167	2.577	1.357	1.302	2.040	2.094	1.052	0.688	1.128	1.122	1.827	1.397	1.486	2.386	1.471
BIAS_S	-4.311	-4.293	-5.119	-3.463	-3.320	-3.195	-3.282	-3.457	-3.407	-4.854	-5.420	-5.196	-4.923	-4.082	-4.715	-4.884	-4.226	-4.244
RMSE_A	2.030	3.204	1.070	3.698	4.084	2.723	2.769	2.792	2.737	2.138	2.179	2.771	2.493	3.745	2.726	3.072	4.191	2.619
RMSE_S	1.117	1.462	0.533	2.571	2.882	2.993	2.904	2.114	2.084	0.329	0.568	0.325	0.661	1.777	0.912	0.416	1.556	1.305
R²	0.943	0.937	0.934	0.882	0.910	0.805	0.796	0.943	0.939	0.931	0.888	0.892	0.922	0.852	0.935	0.897	0.913	0.919
TSS	0.674	0.492	0.822	0.418	0.397	0.520	0.504	0.615	0.648	0.626	0.583	0.492	0.549	0.379	0.528	0.466	0.363	0.561
AREA 2																		
BIAS_A	0.979	1.742	0.357	1.425	2.117	1.287	1.319	2.103	2.166	1.055	-0.007	-0.169	0.034	1.131	-0.231	0.817	1.449	1.034
BIAS_S	-2.923	-2.693	-3.235	-2.327	-1.990	-1.869	-1.789	-1.646	-1.699	-3.992	-4.774	-4.476	-4.250	-2.848	-4.551	-4.187	-3.387	-3.096
RMSE_A	1.674	3.188	0.776	2.680	3.331	2.499	2.657	2.736	2.742	2.845	2.077	1.487	1.613	2.537	1.376	2.741	3.293	2.153
RMSE_S	0.847	2.193	0.470	2.176	2.300	2.794	2.993	2.079	1.810	1.373	1.725	1.453	1.251	1.626	1.503	1.356	1.684	1.195
R²	0.785	0.754	0.889	0.843	0.791	0.908	0.906	0.842	0.803	0.584	0.514	0.583	0.645	0.798	0.614	0.552	0.671	0.765
TSS	0.526	0.242	0.807	0.309	0.259	0.338	0.310	0.415	0.429	0.224	0.300	0.462	0.430	0.304	0.507	0.223	0.201	0.375
AREA 3																		
BIAS_A	0.522	0.483	0.544	0.581	0.535	0.695	0.687	0.530	0.482	0.275	0.237	0.340	0.406	0.631	0.382	0.178	0.268	0.474
BIAS_S	0.576	0.626	0.663	0.597	0.609	0.636	0.613	0.656	0.627	0.516	0.508	0.550	0.543	0.600	0.639	0.444	0.473	0.594
RMSE_A	1.932	2.952	1.399	2.600	3.217	3.339	3.509	2.822	2.761	4.959	2.824	1.409	1.695	2.408	1.202	2.924	3.541	2.521
RMSE_S	1.472	2.358	0.955	2.593	2.757	3.979	4.221	2.075	1.886	3.684	1.495	0.998	1.076	2.445	1.077	1.735	2.341	1.887
R²	0.522	0.483	0.544	0.581	0.535	0.695	0.687	0.530	0.482	0.275	0.237	0.340	0.406	0.631	0.382	0.178	0.268	0.474
TSS	0.446	0.236	0.549	0.297	0.265	0.243	0.220	0.413	0.389	0.084	0.170	0.421	0.393	0.352	0.472	0.150	0.132	0.300
AREA 4																		
BIAS_A	1.359	1.361	1.043	1.837	2.434	2.543	2.533	2.530	2.405	3.221	1.116	0.450	0.746	1.723	0.282	1.343	1.985	1.701
BIAS_S	-3.629	-3.937	-4.043	-2.980	-2.408	-1.554	-1.540	-2.345	-2.536	-2.217	-4.447	-4.755	-4.327	-2.594	-4.873	-4.433	-3.699	-3.313
RMSE_A	1.754	2.216	1.317	2.725	3.213	3.651	3.683	2.805	2.666	4.975	2.121	0.833	1.147	2.369	0.658	2.427	3.229	2.336
RMSE_S	1.496	1.587	0.885	2.751	3.062	4.468	4.502	2.560	2.292	4.664	0.974	0.343	0.751	2.878	0.364	1.213	2.308	2.031
R²	0.627	0.524	0.636	0.660	0.658	0.768	0.761	0.688	0.628	0.504	0.388	0.490	0.611	0.800	0.544	0.311	0.425	0.621
TSS	0.339	0.169	0.485	0.149	0.140	0.106	0.102	0.311	0.324	0.044	0.144	0.513	0.443	0.222	0.587	0.111	0.083	0.206
AREA 5.1																		
BIAS_A	-0.375	-2.417	1.195	-3.065	-2.192	-2.225	-1.999	-0.894	-1.101	-2.411	-0.409	0.846	-1.129	-0.429	0.720	-1.968	-1.745	-1.153
BIAS_S	-0.031	-1.477	3.128	-2.110	-1.791	-0.240	0.064	0.752	0.126	0.439	2.788	4.241	0.662	1.384	3.470	-0.645	-0.308	0.615
RMSE_A	2.997	3.882	4.464	3.884	3.883	4.528	4.515	4.116	3.182	4.799	4.304	4.285	3.432	4.419	3.217	2.969	3.220	3.105
RMSE_S	3.268	3.596	6.040	3.097	4.068	3.992	3.962	3.618	2.239	4.095	4.812	6.080	3.113	5.442	4.620	1.396	2.721	2.797

R ²	0.477	0.085	-0.259	0.511	0.320	-0.060	-0.009	-0.540	-0.049	-0.012	0.475	0.247	0.758	-0.375	0.383	0.705	0.476	0.305
TSS	0.519	0.270	0.135	0.563	0.427	0.218	0.235	0.050	0.167	0.230	0.367	0.317	0.540	0.097	0.463	0.699	0.541	0.423

AREA 5.2

BIAS_A	2.578	3.119	1.780	1.031	2.762	0.965	1.122	0.179	0.275	0.737	2.647	2.062	2.335	2.788	1.030	1.141	1.252	1.635
BIAS_S	0.994	1.850	-0.349	-0.327	1.741	0.875	1.187	-1.839	-2.217	-0.473	0.703	0.662	1.117	1.735	-0.858	-1.791	-1.666	0.079
RMSE_A	3.472	4.597	2.380	2.442	3.869	2.987	3.088	1.585	1.259	2.117	3.717	3.118	3.473	3.802	1.649	2.383	2.252	2.351
RMSE_S	4.401	5.989	2.518	3.659	5.272	4.322	4.481	0.711	1.130	3.193	4.169	4.308	4.802	5.011	2.119	2.384	1.906	3.163
R ²	0.913	0.948	0.854	0.843	0.894	0.714	0.731	0.824	0.920	0.859	0.929	0.937	0.904	0.846	0.923	0.929	0.908	0.923
TSS	1.622	1.459	1.711	1.591	1.537	1.368	1.375	1.596	1.738	1.648	1.579	1.634	1.569	1.524	1.822	1.676	1.704	1.749

AREA 6.1

BIAS_A	0.172	-0.078	1.563	-1.208	-0.706	-0.903	-0.845	-0.823	-0.789	-0.507	-0.865	-0.427	-0.192	0.096	-1.541	-0.688	-0.251	-0.470
BIAS_S	0.193	0.601	2.898	-0.803	-1.054	0.887	0.873	-0.299	-0.477	1.950	0.450	1.164	1.660	2.148	-1.369	-0.017	0.999	0.577
RMSE_A	2.305	2.574	4.141	2.518	2.159	4.237	4.156	3.816	3.105	4.753	3.315	3.557	4.130	4.908	2.565	2.624	3.738	3.154
RMSE_S	2.713	3.059	5.923	2.202	2.754	4.405	4.273	3.935	3.053	5.589	2.978	4.254	5.359	6.509	2.110	1.797	4.501	3.542
R ²	0.664	0.457	-0.039	0.627	0.654	-0.051	0.001	-0.345	0.050	-0.024	0.539	0.354	0.153	-0.320	0.628	0.638	0.219	0.271
TSS	1.375	1.053	0.461	1.322	1.347	0.444	0.493	0.204	0.493	0.442	1.114	0.881	0.632	0.223	1.257	1.315	0.724	0.807

AREA 6.2

BIAS_A	2.662	2.526	2.490	1.754	2.528	1.626	1.638	1.152	1.269	2.030	3.466	1.232	1.617	2.729	0.385	1.702	1.959	1.927
BIAS_S	-1.139	-1.459	-0.701	-1.663	-0.881	-0.617	-0.561	-3.574	-3.575	-0.748	-0.703	-2.898	-2.149	0.480	-4.308	-3.119	-2.142	-1.750
RMSE_A	3.544	3.429	3.160	2.885	3.668	3.233	3.291	1.623	1.676	3.374	4.540	1.667	2.120	4.168	0.709	2.521	2.564	2.489
RMSE_S	4.479	4.127	4.399	4.208	4.834	4.872	4.943	1.087	1.340	5.037	5.053	2.169	2.876	6.223	0.610	2.438	2.953	3.357
R ²	0.939	0.987	0.756	0.859	0.925	0.569	0.547	0.663	0.700	0.708	0.893	0.921	0.899	0.554	0.918	0.889	0.911	0.881
TSS	1.306	1.346	1.275	1.259	1.216	0.911	0.882	1.360	1.433	1.043	1.131	1.673	1.571	0.832	1.820	1.405	1.486	1.489

AMIP

ENSEMBLE	NOAA-GFDL.GFDL-ESM4	NOAA-GFDL.GFDL-CM4	NCAR.CESM2-WACCM-FV2	NCAR.CESM2-WACCM	NCAR.CESM2	MPI-M.MPI-ESM1-2-HR	INM.INM-CM5-0	INM.INM-CM4-8	EC-Earth3-Veg	EC-Earth3-CC	EC-Earth3-AerChem	EC-Earth3	CMCC.CMCC-CM2-SR5	CAS.FGOALS-f3-L	CAMS.CAMS-CSM1-0	AS-RCEC.TaiESM1	
AREA 1																	
BIAS_A	0.541	0.257	-0.919	1.144	0.022	0.001	-0.127	-0.082	0.699	0.472	0.027	0.814	0.927	0.392	0.536	0.732	0.340
BIAS_S	1.037	0.148	0.582	1.420	0.664	0.676	0.585	0.525	1.710	1.633	0.574	1.417	1.482	1.390	0.938	1.193	0.998
RMSE_A	1.007	0.802	1.443	1.742	0.707	0.749	0.784	0.545	1.277	1.083	0.764	1.854	1.897	1.528	0.957	1.259	0.899
RMSE_S	0.642	0.443	0.539	1.282	0.538	0.499	0.306	0.235	1.344	1.229	0.184	1.558	1.712	1.189	0.742	1.130	0.708
R ²	0.945	0.964	0.895	0.946	0.942	0.933	0.923	0.965	0.866	0.862	0.940	0.874	0.886	0.807	0.965	0.953	0.935
TSS	0.884	0.900	0.502	0.758	0.922	0.914	0.910	0.953	0.840	0.862	0.909	0.677	0.679	0.731	0.891	0.834	0.892
AREA 2																	
BIAS_A	0.751	-0.024	0.376	0.958	-0.204	-0.135	-0.287	-0.264	0.725	0.699	-0.334	0.121	0.105	0.309	0.053	0.211	0.191
BIAS_S	2.870	0.959	3.002	3.047	1.591	1.699	1.473	1.455	3.384	3.369	1.297	2.301	2.262	2.573	1.980	2.123	2.212
RMSE_A	0.855	1.233	0.591	1.129	0.577	0.581	0.601	0.624	0.954	0.946	0.754	0.535	0.459	0.705	0.671	0.805	0.445
RMSE_S	0.670	1.324	0.866	0.892	0.795	0.723	0.815	0.875	1.264	1.247	1.005	0.354	0.372	0.590	0.861	0.870	0.344
R ²	0.946	0.588	0.926	0.940	0.893	0.896	0.891	0.872	0.875	0.848	0.851	0.934	0.951	0.912	0.914	0.914	0.950
TSS	0.923	0.546	0.908	0.839	0.876	0.865	0.881	0.865	0.842	0.834	0.817	0.876	0.904	0.829	0.812	0.761	0.924
AREA 3																	
BIAS_A	0.934	0.821	0.557	1.021	0.335	0.372	0.285	0.334	0.671	0.681	1.312	0.628	0.544	0.714	0.599	0.584	0.650
BIAS_S	2.471	2.437	2.270	2.750	1.674	1.785	1.532	1.631	2.172	2.168	3.068	2.146	2.062	2.338	2.068	1.997	2.161
RMSE_A	1.055	1.529	0.721	1.115	0.902	0.844	0.803	0.892	0.826	0.849	2.182	0.805	0.708	0.939	1.250	1.162	0.932
RMSE_S	0.876	1.847	0.842	1.133	1.071	0.973	0.830	0.995	0.776	0.791	2.525	0.692	0.595	0.988	1.472	1.243	0.932

R ²	0.884	0.753	0.914	0.921	0.714	0.774	0.736	0.718	0.884	0.875	0.721	0.875	0.896	0.830	0.714	0.727	0.825
TSS	0.887	0.537	0.905	0.908	0.718	0.766	0.752	0.723	0.838	0.803	0.395	0.878	0.897	0.834	0.610	0.652	0.812
AREA 4																	
BIAS_A	0.881	0.696	0.592	0.963	0.431	0.442	0.413	0.443	1.059	1.096	1.128	0.611	0.560	0.685	0.663	0.607	0.704
BIAS_S	1.310	1.483	0.941	1.594	0.692	0.729	0.605	0.674	1.524	1.543	1.943	1.006	0.937	1.158	1.072	0.934	1.134
RMSE_A	0.939	1.390	0.655	1.032	0.641	0.613	0.585	0.640	1.105	1.143	1.878	0.669	0.612	0.776	1.012	0.838	0.822
RMSE_S	0.982	1.938	0.683	1.264	0.737	0.670	0.563	0.682	1.220	1.248	2.493	0.688	0.617	0.906	1.263	0.917	0.934
R ²	0.918	0.850	0.911	0.962	0.791	0.849	0.808	0.806	0.854	0.841	0.821	0.931	0.933	0.875	0.807	0.830	0.896
TSS	0.854	0.333	0.894	0.802	0.738	0.780	0.787	0.749	0.859	0.846	0.249	0.894	0.914	0.828	0.527	0.656	0.775
AREA 5.1																	
BIAS_A	-0.101	-2.290	-0.849	-0.486	0.063	0.248	-0.067	0.013	-1.076	-1.026	-0.750	-2.112	-2.403	-2.020	-1.677	-1.744	-1.017
BIAS_S	5.682	4.652	5.004	4.964	6.610	6.530	6.519	6.489	5.192	4.986	4.763	3.677	3.433	4.087	3.428	3.641	4.979
RMSE_A	2.086	3.330	2.461	1.960	2.216	1.927	2.217	2.145	1.949	1.719	2.734	3.665	3.816	3.822	2.399	2.449	2.268
RMSE_S	1.906	2.434	2.587	1.912	2.055	2.012	2.007	2.121	1.102	1.113	3.608	4.159	4.217	4.202	2.669	2.598	2.163
R ²	0.604	0.453	0.430	0.670	0.559	0.685	0.546	0.600	0.781	0.874	0.350	-0.191	-0.195	-0.280	0.748	0.762	0.604
TSS	0.611	0.498	0.352	0.646	0.586	0.696	0.566	0.627	0.656	0.717	0.431	0.095	0.087	0.094	0.619	0.572	0.474
AREA 5.2																	
BIAS_A	1.465	0.041	1.007	1.285	0.922	1.342	0.968	0.938	-0.589	-0.694	1.008	0.025	-0.164	0.198	0.118	0.211	0.505
BIAS_S	3.891	3.015	3.628	3.761	3.403	3.913	3.503	3.500	0.907	0.940	3.239	2.166	1.977	2.294	2.700	2.892	2.858
RMSE_A	1.673	1.484	1.305	1.609	1.523	1.934	1.482	1.549	1.429	1.498	1.739	1.503	1.481	1.565	1.280	1.181	1.027
RMSE_S	1.921	1.976	1.753	1.938	2.044	2.609	2.019	2.088	1.849	1.841	1.916	1.695	1.612	1.667	1.424	1.430	1.213
R ²	0.966	0.873	0.964	0.939	0.938	0.950	0.956	0.935	0.970	0.989	0.872	0.876	0.889	0.830	0.891	0.910	0.946
TSS	0.957	0.869	0.955	0.940	0.906	0.871	0.914	0.903	0.711	0.678	0.875	0.707	0.709	0.770	0.893	0.912	0.943
AREA 6.1																	
BIAS_A	-0.453	-1.373	0.245	-0.892	-2.015	-1.916	-2.082	-2.019	-1.544	-1.297	-1.998	-2.669	-2.766	-2.511	-1.551	-1.571	-1.651
BIAS_S	4.621	5.112	5.293	3.995	3.841	3.806	3.863	3.840	4.160	4.317	3.849	2.424	2.359	2.718	3.811	4.083	3.881
RMSE_A	1.198	2.453	0.874	1.403	2.886	2.729	2.949	2.866	2.245	1.920	2.572	3.244	3.333	3.090	2.412	2.322	2.242
RMSE_S	0.545	1.173	0.925	1.299	1.757	1.849	1.675	1.845	1.691	1.422	1.324	3.326	3.375	3.056	1.564	1.409	1.563
R ²	0.906	0.725	0.952	0.922	0.623	0.670	0.614	0.635	0.812	0.862	0.785	0.869	0.848	0.845	0.709	0.758	0.830
TSS	0.901	0.739	0.950	0.867	0.597	0.619	0.592	0.601	0.633	0.744	0.743	0.366	0.369	0.421	0.666	0.730	0.718
AREA 6.2																	
BIAS_A	0.961	0.572	0.792	0.726	0.548	0.628	0.514	0.555	-0.007	-0.059	0.490	-0.072	-0.169	-0.049	0.469	0.404	0.394
BIAS_S	1.553	1.704	1.201	1.264	1.386	1.339	1.296	1.297	-0.061	-0.023	1.247	0.191	0.082	0.233	1.101	0.946	0.922
RMSE_A	1.220	1.497	0.924	0.871	1.035	0.957	0.947	0.958	0.706	0.708	0.984	0.523	0.631	0.655	0.957	0.720	0.626
RMSE_S	1.633	2.312	1.131	1.172	1.418	1.386	1.278	1.326	0.964	0.929	1.446	0.556	0.672	0.680	1.206	0.940	0.844
R ²	0.982	0.890	0.990	0.975	0.882	0.929	0.903	0.904	0.950	0.977	0.923	0.973	0.964	0.917	0.880	0.931	0.952
TSS	0.858	0.682	0.933	0.940	0.847	0.887	0.870	0.875	0.732	0.702	0.847	0.869	0.808	0.836	0.860	0.924	0.949
HighResMIP_AMIP																	
ENSEMBLE																	
MPI-M.MPI-ESM1-2-XL																	
MOHC.HadGEM3-GC31-HM																	
MIROC.NICAM16-8S																	
IPSL.IPSL-CM6A-ATM-HR																	
ECMWF.ECMWF-IFS-LR																	
CAMS.CAMS-CSM1-0																	
MRI.MRI-AGCM3-2-H																	
HIRAM-SIT-LR																	
ECMWF.ECMWF-IFS-HR																	
CMCC-CM2-VHR4																	
AREA 1																	
BIAS_A	0.722	-0.137	-0.447	0.173	0.404	-0.320	1.319	0.129	0.635	-0.120	0.236						
BIAS_S	0.836	-0.142	-0.321	-0.217	-0.294	-0.166	1.011	0.018	0.515	-0.018	0.122						

RMSE_A	1.333	0.548	0.747	0.718	0.885	0.549	1.887	0.901	1.222	0.531	0.728
RMSE_S	0.931	0.195	0.386	0.257	0.341	0.201	1.547	0.275	0.892	0.082	0.265
R ²	0.904	0.962	0.943	0.967	0.985	0.968	0.943	0.939	0.935	0.962	0.962
TSS	0.821	0.956	0.944	0.914	0.883	0.968	0.750	0.875	0.834	0.958	0.919
AREA 2											
BIAS_A	0.294	-0.077	-0.691	-0.381	-0.071	-0.107	0.839	-0.412	0.592	-0.718	-0.073
BIAS_S	0.328	-0.402	-1.309	-1.087	-1.348	-0.503	0.409	-0.780	0.609	-1.345	-0.543
RMSE_A	0.546	0.417	1.069	0.797	1.269	0.535	1.679	1.058	1.107	0.949	0.685
RMSE_S	0.412	0.497	1.428	1.121	1.419	0.708	1.333	1.187	1.281	1.400	0.740
R ²	0.942	0.928	0.820	0.804	0.600	0.901	0.887	0.891	0.938	0.808	0.887
TSS	0.902	0.925	0.752	0.801	0.536	0.883	0.499	0.675	0.687	0.812	0.811
AREA 3											
BIAS_A	0.015	0.472	-0.076	0.154	0.575	0.343	0.988	-0.233	0.904	0.730	0.387
BIAS_S	-0.146	0.289	-0.456	-0.349	0.448	0.101	0.940	-0.266	1.311	0.536	0.241
RMSE_A	0.340	0.698	0.857	0.848	1.255	0.713	1.333	0.749	1.468	1.288	0.813
RMSE_S	0.407	0.707	1.089	0.738	1.417	0.802	1.232	1.013	1.930	1.293	0.855
R ²	0.949	0.876	0.724	0.711	0.784	0.827	0.828	0.864	0.859	0.752	0.839
TSS	0.917	0.878	0.715	0.718	0.608	0.828	0.706	0.791	0.592	0.629	0.792
AREA 4											
BIAS_A	0.193	0.508	0.135	0.067	0.368	0.420	0.909	-0.071	0.461	0.703	0.369
BIAS_S	0.168	0.502	0.208	-0.108	0.693	0.387	1.087	-0.121	0.649	0.908	0.437
RMSE_A	0.266	0.561	0.615	0.357	0.922	0.525	1.172	0.416	0.764	1.088	0.578
RMSE_S	0.280	0.600	0.875	0.327	1.338	0.583	1.302	0.521	1.007	1.352	0.703
R ²	0.949	0.936	0.850	0.853	0.883	0.901	0.883	0.896	0.896	0.866	0.912
TSS	0.945	0.919	0.639	0.840	0.484	0.866	0.544	0.786	0.629	0.492	0.754
AREA 5.1											
BIAS_A	-1.807	0.073	-0.393	-0.773	-2.762	0.045	-0.080	-0.624	-0.056	-1.725	-0.810
BIAS_S	-1.365	0.798	-0.516	-0.134	-1.486	0.854	0.589	-0.087	0.658	-1.826	-0.251
RMSE_A	2.550	1.042	1.759	1.295	3.715	1.369	1.509	2.821	1.582	2.635	1.616
RMSE_S	2.490	1.102	1.295	0.971	3.481	1.787	0.970	2.122	1.780	3.286	1.587
R ²	0.712	0.922	0.894	0.929	0.398	0.857	0.828	0.743	0.807	0.629	0.846
TSS	0.700	0.921	0.803	0.921	0.445	0.862	0.835	0.616	0.816	0.600	0.851
AREA 5.2											
BIAS_A	-0.121	1.350	1.300	0.644	-0.138	1.251	1.080	0.906	1.818	0.243	0.833
BIAS_S	0.311	1.413	1.432	0.153	0.443	1.080	0.801	1.171	2.493	-0.051	0.925
RMSE_A	0.962	1.713	2.142	1.208	1.511	1.620	1.599	1.576	2.710	1.334	1.214
RMSE_S	0.963	1.938	2.437	0.814	2.021	1.541	1.040	1.853	3.644	1.519	1.441
R ²	0.939	0.980	0.987	0.958	0.852	0.973	0.916	0.994	0.968	0.882	0.973
TSS	0.929	0.913	0.805	0.929	0.857	0.921	0.914	0.869	0.760	0.850	0.943
AREA 6.1											
BIAS_A	-1.621	-0.871	0.631	-0.764	-1.115	-0.890	0.344	0.344	-0.442	-1.788	-0.617
BIAS_S	-1.315	-0.348	1.131	0.156	0.699	-0.215	0.505	1.474	0.678	-0.647	0.212
RMSE_A	1.774	1.245	2.080	1.295	2.186	1.320	2.340	2.527	1.329	2.315	1.173
RMSE_S	1.559	0.798	2.531	0.667	1.117	0.726	0.892	3.421	1.154	0.828	0.577
R ²	0.980	0.950	0.967	0.944	0.814	0.933	0.698	0.930	0.925	0.828	0.940
TSS	0.927	0.913	0.747	0.922	0.786	0.904	0.694	0.666	0.892	0.816	0.931
AREA 6.2											
BIAS_A	-0.121	0.677	0.838	0.361	0.207	0.682	1.151	0.473	0.818	0.388	0.548

BIAS_S	-0.015	0.874	1.162	0.171	0.732	0.779	0.707	0.668	1.350	0.747	0.718
RMSE_A	0.486	0.826	1.641	0.586	0.784	0.813	1.686	1.091	1.465	0.794	0.804
RMSE_S	0.292	1.093	2.197	0.444	1.153	0.969	1.003	1.538	2.130	1.093	1.084
R ²	0.971	0.991	0.989	0.986	0.935	0.993	0.850	0.986	0.978	0.922	0.987
TSS	0.904	0.933	0.662	0.939	0.875	0.940	0.733	0.786	0.718	0.898	0.904

HighResMIP_CMIP								
	BCC-CSM2-HR	CMCC-CM2-VHR4	ECMWF-IFS-HR	FGOALS-G3-H	HadGEM3-GC31-HH	HiRAM-SIT-LR	MPI-ESM1-2-XR	ENSEMBLE
AREA 1								
BIAS_A	-0,834	1,153	0,265	-1,611	0,193	-0,750	0,510	-0,154
BIAS_S	-0,915	-0,038	-0,615	-0,912	-0,073	-0,835	-0,587	-0,568
RMSE_A	1,187	2,110	1,260	1,980	0,942	1,052	1,723	0,834
RMSE_S	1,416	0,794	1,082	1,413	0,110	1,331	1,031	0,989
R ²	0,878	0,915	0,905	0,898	0,930	0,909	0,883	0,924
TSS	0,870	0,649	0,790	0,453	0,869	0,901	0,682	0,899
AREA 2								
BIAS_A	-1,672	0,375	0,074	-1,317	0,004	-1,267	0,017	-0,541
BIAS_S	-0,356	1,134	0,868	-0,159	1,411	-0,343	0,048	0,372
RMSE_A	1,970	1,412	1,197	1,552	0,601	1,598	2,100	1,099
RMSE_S	2,447	0,842	1,084	2,154	0,498	2,342	1,880	1,568
R ²	0,018	0,630	0,640	0,618	0,882	0,484	0,449	0,620
TSS	0,028	0,508	0,571	0,403	0,850	0,535	0,284	0,648
AREA 3								
BIAS_A	-0,913	0,084	0,660	-0,277	0,239	-0,652	1,299	0,063
BIAS_S	-1,752	-0,873	0,234	-1,142	0,051	-1,583	-0,436	-0,786
RMSE_A	1,322	1,114	1,299	0,917	0,517	1,187	3,141	1,031
RMSE_S	1,964	1,065	1,245	1,316	0,236	1,747	1,585	1,009
R ²	0,426	0,407	0,642	0,498	0,900	0,357	0,203	0,483
TSS	0,039	0,494	0,590	0,385	0,902	0,393	0,140	0,550
AREA 4								
BIAS_A	-0,277	0,349	0,628	0,172	0,026	-0,279	1,685	0,329
BIAS_S	-0,667	-0,294	0,485	-0,302	-0,147	-0,748	0,612	-0,151
RMSE_A	0,604	0,846	0,853	0,522	0,277	0,610	2,988	0,736
RMSE_S	0,868	0,430	0,830	0,453	0,283	0,859	1,691	0,391
R ²	0,444	0,372	0,754	0,539	0,882	0,475	0,364	0,533
TSS	0,082	0,435	0,654	0,497	0,851	0,516	0,083	0,550
AREA 5.1								
BIAS_A	1,775	-1,900	1,851	0,042	-0,058	0,891	-2,289	0,045
BIAS_S	0,954	-1,753	2,840	1,776	0,137	0,538	0,091	0,655
RMSE_A	3,133	2,515	2,656	2,355	1,104	3,252	3,345	1,558
RMSE_S	2,681	2,396	3,253	2,598	1,082	3,028	1,192	1,877
R ²	0,913	0,815	0,789	0,675	0,961	0,854	0,609	0,887
TSS	0,643	0,815	0,770	0,671	0,900	0,560	0,635	0,835
AREA 5.2								
BIAS_A	-1,720	0,106	1,676	0,490	-0,481	0,771	0,389	0,176
BIAS_S	-3,168	-1,058	1,265	-0,997	-1,238	-1,062	0,610	-0,807
RMSE_A	2,966	1,455	2,603	1,782	1,035	2,806	2,100	1,315
RMSE_S	4,017	1,671	2,887	1,606	1,414	1,674	3,054	1,448
R ²	0,500	0,862	0,898	0,811	0,943	0,806	0,856	0,894
TSS	0,230	0,867	0,778	0,820	0,938	0,664	0,771	0,895
AREA 6.1								
BIAS_A	0,831	-0,870	0,983	1,522	0,051	1,518	-1,327	0,387
BIAS_S	-0,407	-0,871	1,616	2,060	-0,188	1,203	0,782	0,599

RMSE_A	1,834	1,353	1,658	2,214	1,500	3,324	2,764	1,046
RMSE_S	1,302	1,352	1,873	2,679	1,231	3,636	1,323	1,168
R ²	0,821	0,918	0,860	0,872	0,904	0,926	0,584	0,939
TSS	0,825	0,910	0,835	0,836	0,851	0,597	0,626	0,934
AREA 6.2								
BIAS_A	-0,425	0,126	1,011	0,819	-0,446	0,274	1,527	0,412
BIAS_S	-1,150	-0,796	0,809	-0,135	-0,936	-0,629	1,386	-0,207
RMSE_A	1,521	1,189	1,363	1,429	1,003	1,482	2,348	0,940
RMSE_S	1,954	1,414	1,360	0,893	1,413	1,090	2,441	0,718
R ²	0,248	0,637	0,884	0,710	0,832	0,731	0,727	0,828
TSS	0,192	0,647	0,834	0,728	0,644	0,660	0,566	0,828