

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS A. C. SIMÕES
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – ICAT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

MAYARA CHRISTINE CORREIA LINS

**AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO MODELO MPAS NA SIMULAÇÃO DE
EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO NORDESTE DO BRASIL**

Maceió
2025

MAYARA CHRISTINE CORREIA LINS

**AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO MODELO MPAS NA SIMULAÇÃO DE
EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO NORDESTE DO BRASIL**

Trabalho de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientadora: Prof.^a Dra. Maria Cristina Lemos da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Dirceu Luís Herdies.

Maceió

2025

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Girlaine da Silva Santos – CRB-4 – 1127

L759a Lins, Mayara Christine Correia.

Avaliação da sensibilidade do modelo mpas na simulação de eventos extremos de precipitação no nordeste do Brasil / Mayara Christine Correia Lins. – 2025.

55 f. : il.

Orientadora: Maria Cristina Lemos da Silva.

Coorientador: Dirceu Luís Herdies.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia.) – Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2025.

Bibliografia: f. 51 - 55.

1. Eventos climáticos extremos. 2. Distúrbios Ondulatórios de Leste. 3. Variáveis climáticas. 4. Precipitação (Meteorologia). I. Título.

CDU: 551.577.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-212.

***“AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO MODELO MPAS NA SIMULAÇÃO DE
EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO NORDESTE DO BRASIL.”***

MAYARA CHRISTINE CORREIA LINS

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

Documento assinado digitalmente
gov.br MARIA CRISTINA LEMOS DA SILVA
Data: 01/09/2025 20:11:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Maria Cristina Lemos da Silva
(Orientadora)

Documento assinado digitalmente
gov.br DIRCEU LUIS HERDIES
Data: 02/09/2025 08:40:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Dirceu Luís Herdies – INPE
(Coorientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br MATHEUS JOSE ARRUDA LYRA
Data: 02/09/2025 10:10:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Matheus José Arruda Lyra
Membro Externo ao Programa – Pós-doc PPGMET

Documento assinado digitalmente
gov.br HELBER BARROS GOMES
Data: 01/09/2025 14:29:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Helber Barros Gomes
Membro Interno ao Programa – PPGMET

Documento assinado digitalmente
gov.br MARIO FRANCISCO LEAL DE QUADRO
Data: 02/09/2025 15:55:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mário Francisco Leal de Quadro – IFSC
(Membro Externo)

AGOSTO/2025

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha caminhada e para este trabalho, meu mais sincero agradecimento.

A Deus, pela força nos momentos mais desafiadores desta caminhada acadêmica.

Aos meus pais, Martha Lucia e Carlos Lins, por serem meu alicerce.

À minha família, em especial ao meu irmão e à minha sobrinha, pelo carinho e apoio ao longo de todo o percurso.

À minha orientadora, Profa. Dra. Cristina Lemos, pela parceria desde a graduação.

Ao meu coorientador, Dr. Dirceu Herdies, pela ajuda e paciência.

Ao meu amigo Dr. Matheus Lyra, pela presença constante e colaboração ao longo de toda a pesquisa.

À banca examinadora, pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições e sugestões que enriqueceram este trabalho e aprimoraram a qualidade da pesquisa.

Aos amigos e colegas de curso e de laboratório, pelos momentos, aprendizado e convivência, que tornaram esta jornada mais leve e enriquecedora.

Aos meus amigos de longa data, que seguem ao meu lado e me conhecem tão bem.

Aos professores e servidores do ICAT, pelo conhecimento transmitido e pelo compromisso com a excelência acadêmica, que contribuíram de forma decisiva para minha formação.

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Dalva poderia tantas coisas se pudesse. Mas só pôde o que fez. Quem vê de fora faz arranjos melhores, mas é dentro, bem no lugar que a gente não vê, que o não dar conta ocupa tudo.”
— Carla Madeira, Tudo é Rio (2014).

RESUMO

Eventos extremos de precipitação representam um dos maiores desafios para a previsão meteorológica em regiões tropicais, como o Nordeste do Brasil (NEB), especialmente devido à complexidade dos processos convectivos e à influência de diversos sistemas sinóticos e de mesoescala. Neste contexto, o presente estudo avaliou a sensibilidade do modelo atmosférico *Model for Prediction Across Scales* (MPAS) na simulação de três eventos de precipitação extrema (EPE) associados aos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs), ocorridos nos dias 27/05/2017 (EPE1), 28/05/2022 (EPE2) e 07/05/2024 (EPE3), afetando os estados de Alagoas e Pernambuco. As simulações foram realizadas com duas versões do modelo (v7.3 e v8.2.2), utilizando grade de resolução variável (60–3 km), centrada nas regiões afetadas. Foram testadas duas parametrizações de microfísica de nuvens: WSM6 (single-moment) e Thompson (double-moment), ambas aplicadas com o conjunto de parametrizações convection-permitting. Os resultados das simulações foram comparados aos dados do produto MERGE/CPTEC, à reanálise ERA5 e às previsões do modelo operacional *Global Forecast System* (GFS). A avaliação quantitativa foi conduzida por meio de métricas estatísticas como viés (BIAS), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de correlação (CC), além da análise da distribuição espacial da precipitação e da estrutura dos sistemas convectivos com base em imagens do satélite GOES-16. Os resultados indicaram que o modelo MPAS, especialmente na versão 8.2.2 com o esquema Thompson, apresentou desempenho superior na simulação dos eventos, com melhor representação dos núcleos de precipitação intensa e menores valores de BIAS e RMSE. Em particular, o evento de 2024 apresentou os melhores resultados, com CC de 0,75 e BIAS negativo, indicando subestimação moderada. Já o GFS apresentou tendência de superestimar o EPE2 e EPE3 e subestimar o EPE1, com maiores erros sistemáticos. O ERA5, por sua vez, subestimou consistentemente os máximos de precipitação, o que pode afetar negativamente a qualidade das simulações iniciais do MPAS. O estudo demonstra o potencial do MPAS para aplicações em regiões tropicais, especialmente na simulação de eventos extremos relacionados aos DOLs, e ressalta a importância de uma escolha criteriosa das parametrizações físicas para representar adequadamente os processos microfísicos associados à convecção profunda.

Palavras-chave: Extremos de chuva. MPAS. Resolução variável. DOLs.

ABSTRACT

Extreme precipitation events represent one of the greatest challenges for weather forecasting in tropical regions, such as the Northeast of Brazil (NEB), especially due to the complexity of convective processes and the influence of various synoptic and mesoscale systems. In this context, the present study assessed the sensitivity of the Model for Prediction Across Scales (MPAS) atmospheric model in simulating three extreme precipitation events (EPEs) associated with Easterly Wave Disturbances (EWDs), which occurred on May 27, 2017, May 28, 2022, and May 7, 2024, affecting the states of Alagoas and Pernambuco. Simulations were performed with two versions of the model (v7.3 and v8.2.2), using a variable-resolution mesh (60–3 km) centered over the affected regions. Two cloud microphysics parameterizations were tested: WSM6 (single-moment) and Thompson (double-moment), both applied with the convection-permitting physics suite. The simulation results were compared against MERGE/CPTEC product data, ERA5 reanalysis, and forecasts from the operational Global Forecast System (GFS) model. Quantitative evaluation was carried out using statistical metrics such as bias (BIAS), root mean square error (RMSE), and correlation coefficient (CC), in addition to analyzing the spatial distribution of precipitation and the structure of convective systems based on GOES-16 satellite imagery. The results indicated that the MPAS model, particularly version 8.2.2 with the Thompson scheme, showed superior performance in simulating the events, with better representation of intense precipitation cores and lower BIAS and RMSE values. In particular, the 2024 event yielded the best results, with a CC of 0.75 and a negative BIAS, indicating moderate underestimation. Conversely, the GFS tended to overestimate EPE2 and EPE3 and underestimate EPE1, with larger systematic errors. ERA5, in turn, consistently underestimated the precipitation maxima, which may negatively impact the quality of MPAS initial simulations. This study demonstrates the potential of MPAS for applications in tropical regions, especially in simulating extreme events related to EWDs, and highlights the importance of carefully selecting physical parameterizations to adequately represent the microphysical processes associated with deep convection.

Keywords: Extreme rainfall. MPAS. Variable-resolution. EWD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da Região Nordeste do Brasil com destaque dos estados de Alagoas e Pernambuco (a) e América do Sul (b).	17
Figura 2 - Grade Variável do modelo (60-3km).....	21
Figura 3 - Imagens do satélite GOES-16 no canal do infravermelho (banda 13) do sistema de 27 de maio de 2017 sobre o Nordeste do Brasil nos horários sinóticos de 00, 06, 12 e 18 UTC.	27
Figura 4 – Precipitação acumulada das estações meteorológicas para o EPE do dia 27/05/2017 em Alagoas.	28
Figura 5 - Linha de corrente (m/s) e divergência (sombreada, $10^4/s$) em 850 hPa 26 de maio de 2017 às 18 (a) e 26 de maio de 2017 às 00 (b), 06 (c), 12 UTC (d) com os dados da reanálise ERA5.	29
Figura 6 - Diagrama de Hovmöller de ômega (Pa/s; 500 hPa) entre 25 e 27 de maio a 9°S de latitude.	29
Figura 7 – Precipitação acumulada (mm/dia) em 27 de maio de 2017. Comparação entre a precipitação observada pelo MERGE/CPTEC (a) e ERA5 (b), GFS_25km (c), MPASv7.3_WSM6 (d), MPASv7.3_THMP (e), MPASv8.2.2_WSM6 (f) e MPASv8.2.2_THMP (g).	31
Figura 8 – BIAS da precipitação do EPE1 entre o MERGE/CPTEC e as simulações do GFS_25km (a), MPASv7.3 WSM6 (b), MPASv7.3 THMP (c), MPASv8.2.2 WSM6 (d) e MPASv8.2.2 THMP(e).....	32
Figura 9 – Funções de densidade de probabilidade (PDFs) do acumulado de 3 h da precipitação para o EPE1.	33
Figura 10 - Imagens do satélite GOES-16 no canal do infravermelho (banda 13) do sistema de 28 de maio de 2022 sobre o Nordeste do Brasil nos horários sinóticos de 00, 06, 12 e 18 UTC.	34
Figura 11 – Precipitação acumulada das estações meteorológicas para o EPE do dia 28/05/2022 em Pernambuco.	35
Figura 12 - Linha de corrente (m/s) e divergência (sombreada, $10^4/s$) em 850 hPa 27 de maio de 2022 às 18 (a) e 28 de maio de 2022 às 00 (b), 06 (c), 12 UTC (d) com os dados da reanálise ERA5.	36
Figura 13 - Diagrama de Hovmöller de ômega (Pa/s; 500 hPa) entre 23 e 28 de maio a 8°S de latitude.	36
Figura 14 – Precipitação acumulada (mm/dia) em 28 de maio de 2022. Comparação entre a precipitação observada pelo MERGE/CPTEC (a) e ERA5 (b), GFS_25km (c), MPASv7.3_WSM6 (d), MPASv7.3_THMP (e), MPASv8.2.2_WSM6 (f) e MPASv8.2.2_THMP (g).	38
Figura 15 – Imagens do satélite GOES-16 no canal do infravermelho (banda 13) do sistema de 07 de maio de 2024 sobre o Nordeste do Brasil nos horários sinóticos de 00, 06, 12 e 18 UTC.	39
Figura 16 – Precipitação acumulada das estações meteorológicas para o EPE do dia 07/05/2024 em Alagoas.	40

Figura 17 - Linha de corrente (m/s) e divergência (sombreada, $10^4/s$) em 850 hPa 06 de maio de 2024 às 18 (a) e 07 de maio de 2024 às 00 (b), 06 (c), 12 UTC (d) com os dados da reanálise ERA5.	41
Figura 18 - Diagrama de Hovmöller de ω (Pa/s; 500 hPa) entre 05 e 08 de maio a $10^\circ S$ de latitude.	41
Figura 19 – Precipitação acumulada (mm/dia) em 07 de maio de 2024. Comparação entre a precipitação observada pelo MERGE/CPTEC (a) e ERA5 (b), GFS_25km (c), MPASv7.3_WSM6 (d), MPASv7.3_THMP (e), MPASv8.2.2_WSM6 (f) e MPASv8.2.2_THMP (g).	43
Figura 20 – BIAS da precipitação do EPE3 entre o MERGE/CPTEC e as simulações do GFS_25km (a), MPASv7.3 WSM6 (b), MPASv7.3_THMP (c), MPASv8.2.2 WSM6 (d) e MPASv8.2.2_THMP (e).....	45
Figura 21 – Funções de densidade de probabilidade (PDFs) do acumulado de 3 h da precipitação para o EPE3.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Localização dos casos de eventos extremos de precipitação.....	20
Tabela 2 – Parametrizações físicas do convection-permitting usadas no MPAS.....	22
Tabela 3 – Métricas estatísticas de precipitação acumulada (mm/dia) para cada evento.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIAS	Erro Médio
CC	Coefficiente de Correlação
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DOLs	Distúrbios Ondulatórios de Leste
DSA	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
ECMWF	<i>European Center for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EPE	Evento de Precipitação Extrema
ERA5	<i>European ReAnalysis v5</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GPM	<i>Global Precipitation Measurement</i>
IMERG	<i>Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MCGA	Modelos de Circulação Geral da Atmosfera
MPAS	<i>Model for Prediction Across Scales</i>
NEB	Nordeste do Brasil
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
SEMARH-AL	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>
WSMMPs	<i>WRF-Single-Moment Microphysics Schemes</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	12
Objetivo Geral	12
Objetivos Específicos	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Distúrbios Ondulatórios de Leste	12
2.2 Model for Prediction Across Scales-Atmosphere (MPAS-A)	15
3 DADOS E METODOLOGIA	16
3.1 Área de estudo	16
3.2 Dados	17
3.2.1 Imagens de satélite	17
3.2.2 Estações Meteorológicas	18
3.2.3 Produto <i>MERGE</i>	18
3.2.4 Produto <i>ERA5</i>	19
3.2.5 Modelo GFS	19
3.3 Metodologia	20
3.3.1 Casos de EPE	20
3.3.2 Simulações numéricas	20
3.3.2.1 Parametrização de microfísica das nuvens	22
3.3.3 Validação estatística	24
4 RESULTADOS	26
4.1 EPE1	26
4.2 EPE2	33
4.3 EPE3	38
4.4 Validação dos EPE	47
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Eventos extremos estão se tornando mais intensos, duradouros e frequentes. A variabilidade e a mudança climática, em escalas globais e regionais, impactam profundamente atividades humanas e sistemas socioeconômicos. Compreender essas variações é essencial para a tomada de decisões em setores como agricultura, recursos hídricos, energia, saúde e planejamento urbano. Alterações no sistema climático, como: temperatura do mar, cobertura de nuvens, composição atmosférica e uso da terra, podem desencadear processos de feedbacks que amplificam (positivos) ou moderam (negativos) eventos extremos (Raymond et al., 2020).

Os eventos extremos de precipitação são regidos por processos físicos diferentes daqueles que influenciam as médias de longo prazo. Enquanto as mudanças na precipitação média estão mais relacionadas à circulação atmosférica, os extremos dependem das condições termodinâmicas e específicas de determinados dias (O'gorman; Schneider, 2009). Segundo o relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2021), esses eventos resultam da combinação de vários fatores, como transporte intenso de umidade, temperaturas elevadas e instabilidade atmosférica, que raramente ocorrem simultaneamente. No contexto das mudanças climáticas, o IPCC destaca que a relação de *Clausius-Clapeyron* explica que, para cada aumento de 1°C na temperatura do ar, a capacidade da atmosfera de reter umidade pode crescer cerca de 7%, o que potencializa a ocorrência de chuvas mais intensas.

De acordo com as diretrizes da *World Meteorological Organization* (WMO, 2023), um evento extremo de precipitação é definido como uma chuva intensa e fora do comum, que ocorre em algumas horas ou dias consecutivos e ultrapassa as médias esperadas para a região e o período considerado. A WMO não estabelece um valor específico universal para caracterizar esse tipo de evento, pois ele depende das características climatológicas locais. No entanto, no contexto do litoral do Nordeste do Brasil (NEB), valores de precipitação diária iguais ou superiores a 50 mm já podem ser considerados extremos, a depender da localidade. Em áreas como Recife, por exemplo, chuvas acima de 55,3 mm/dia são classificadas como "Muito Fortes" e estão associadas a impactos significativos, enquanto em outras regiões do litoral nordestino, eventos com precipitação diária superior a 100 mm também são reconhecidos como extremos (Souza; De Azevedo; De Araújo, 2012). Esses eventos são objeto de atenção em pesquisas científicas devido ao seu potencial de causar danos severos à infraestrutura e à população.

Estudos ao redor do mundo têm se dedicado à análise desses fenômenos, destacando seus impactos e tendências em diferentes regiões (Kunkel et al., 2013; Fischer; Knutti, 2016; Zhao et al., 2019; Olmo et al., 2020). No contexto brasileiro, pesquisas realizadas por De Sousa et al., (2016), Marengo et al., (2023) e Lyra et al., (2024) exploram a dinâmica e variabilidade desses eventos, reforçando a importância de compreendê-los para aprimorar a previsão e mitigação de seus impactos.

A ocorrência de precipitações intensas no NEB está relacionada diretamente à atuação de diversos sistemas meteorológicos, os quais influenciam significativamente a distribuição espacial e temporal das chuvas, impactando os padrões climáticos regionais, na escala sinótica, destacam-se a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT; Schneider et al, 2014; Utida et al., 2019), faixa de instabilidade atmosférica próxima ao Equador que, entre fevereiro e maio, desloca-se em direção ao sul provocando chuvas abundantes na região. O Sistema de Monção da América do Sul (SMAS; Gan et al., 2004; Grimm et al., 2009; Reboita et al., 2022), por sua vez, atua modulando a posição da ZCIT e influenciando diretamente a circulação dos ventos alísios, fatores que regulam o início e a intensidade da estação chuvosa no NEB.

Ainda na escala sinótica, destacam-se sistemas originados em latitudes médias, como as Frentes Frias (Kousky, 1979; Fedorova et al., 2016; Lyra et al., 2019), que atingem principalmente o estado da Bahia, desencadeando eventos expressivos de precipitação. Outro sistema relevante são os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN; Kousky; Gan, 1981; Dos Reis et al., 2021; Lyra; Arraut, 2025), consistem em sistemas sinóticos de circulação ciclônica que se desenvolvem na alta troposfera que, especialmente no verão, geram chuvas intensas no interior e nas áreas costeiras do Nordeste.

Entre esses sistemas de escala sinótica, destacam-se especialmente os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs), devido ao seu papel crucial na ocorrência de chuvas intensas e persistentes na faixa litorânea do Nordeste brasileiro. Esses distúrbios formam-se sobre o Oceano Atlântico tropical e deslocam-se de leste para oeste, ocorrendo principalmente entre maio e agosto. Sua atuação frequente e intensa constitui um fator determinante nos eventos extremos de precipitação na região, impactando diretamente a população e atividades econômicas locais (Gomes et al., 2019).

Além disso, na mesoescala, são importantes as Linhas de Instabilidade (Oliveira; Oyama, 2020), formações lineares de nuvens convectivas que ocorrem predominantemente durante o verão austral, resultando em precipitações rápidas e intensas, particularmente no semiárido nordestino. Além disso, os Complexos Convectivos de Mesoescala (Lyra et al., 2022; Fedorova e Levit, 2023), caracterizados por grandes aglomerados convectivos com

significativo desenvolvimento vertical e horizontal, provocam chuvas intensas acompanhadas de trovoadas e rajadas de vento, com precipitações concentradas em períodos curtos. Outro sistema de destaque é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS; Herdies et al., 2002; Quadro et al., 2012; Pezzi et al., 2022), caracterizada por uma faixa quase estacionária de nebulosidade profunda orientada no sentido noroeste-sudeste, que se estende da Amazônia até o Atlântico Sul. A ZCAS está associada à persistência de precipitação contínua por vários dias, desempenhando papel fundamental no regime pluviométrico do Brasil Central e Sudeste, mas podendo também influenciar o Nordeste em determinados eventos de grande escala.

Uma ferramenta fundamental para a pesquisa de precipitações intensas são os Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA). Eles são capazes de representar as características observadas da circulação atmosférica e seus principais processos físicos e dinâmicos. Os MCGAs têm evoluído continuamente para melhorar a representação da atmosfera. Diversos centros de pesquisa dedicam-se ao desenvolvimento e aperfeiçoamento desses modelos. O Model for Prediction Across Scales (MPAS) apresenta grande inovação que este modelo oferece é a utilização da malha Tessellation Spherical Centroidal Voronoi, que permite diferentes resoluções espaciais em uma mesma grade (Skamarock et al., 2012).

Embora tenha progressos significativos na modelagem numérica da atmosfera, ainda existem desafios para medir a quantidade de chuva e identificar com exatidão as áreas onde as nuvens de chuva se formam. A literatura sobre eventos extremos de precipitação simulados pelo MPAS enfatiza a abordagem inovadora do modelo e suas consequências para o entendimento de dinâmicas atmosféricas complexas, Heinzeller, Duda e Kunstmann (2016) destacaram que o MPAS é uma inovação significativa na simulação de sistemas terrestres. Os autores evidenciam que o MPAS consegue replicar de forma precisa o comportamento da Monção da África Ocidental e suas chuvas associadas.

Lyra et al. (2024) analisaram dois eventos extremos de precipitação no Leste do NEB associados aos DOLs por meio de simulações com o modelo MPAS utilizando configurações do conjunto de parametrizações de mesoescala. Os resultados indicaram que o MPAS foi capaz de representar de forma satisfatória a precipitação observada em ambos os eventos. A partir dessa pesquisa, destaca-se a necessidade de aprofundar os estudos sobre a sensibilidade do modelo MPAS, especialmente quanto à simulação de precipitações extremas com diferentes resoluções espaciais e parametrizações. Esse tipo de investigação é essencial para identificar a configuração mais adequada ao NEB para diversos casos.

De forma geral, a compreensão destes eventos não só é importante para o entendimento do fenômeno como corroboram com futuras análises sobre frequência e intensidade de futuros

eventos. Desta forma, a investigação proposta neste estudo proverá informações de como o modelo MPAS simula eventos extremos de precipitação para a região do leste NEB em três eventos distintos, que por sua vez trará subsídios para projetos de mitigação de possíveis eventos de chuvas, trazendo assim benefícios para a população.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a capacidade do modelo MPAS, utilizando os esquemas de microfísica de nuvens WSM6 e Thompson, para simular três eventos extremos de precipitação associados a Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) no setor leste da região NEB, buscando identificar avanços e limitações no desempenho do modelo frente a esse tipo de fenômeno extremo.

Objetivos Específicos

- Analisar como a configuração do modelo com grade variável, operando com o conjunto de parametrizações físicas *convection-permitting*, influencia a simulação dos processos atmosféricos relacionados aos DOLs, verificando se a alta resolução contribui para uma melhor representação das estruturas convectivas e da distribuição das precipitações intensas;
- Investigar os impactos da utilização dos diferentes esquemas de microfísica de nuvens, WSM e Thompson, nas simulações realizadas, identificando como cada parametrização afeta a intensidade, a localização e os padrões espaciais das chuvas simuladas;
- Validar as simulações do modelo MPAS por meio da aplicação de índices estatísticos, como viés, erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de correlação, comparando as variáveis meteorológicas simuladas com dados observacionais a fim de avaliar a precisão espacial e temporal na representação das chuvas extremas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Distúrbios Ondulatórios de Leste

Diversos sistemas atmosféricos atuam na caracterização do clima do NEB, resultando em características climáticas distintas entre suas sub-regiões, como a área costeira e as regiões

semiáridas. De acordo com Oliveira et al. (2017), na costa leste do NEB a influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) são particularmente importantes, contribuindo para a maior umidade e pluviosidade dessa região. Além desses sistemas, os autores citam a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) que embora a seja mais frequente no Sudeste, ela também pode afetar o litoral do Nordeste, contribuindo para a ocorrência de chuvas intensas. A precipitação anual varia significativamente entre as sub-regiões, sendo inferior a 500 mm nas áreas semiáridas e superior a 1500 mm no litoral e no noroeste do NEB.

Em particular, a região tropical é caracterizada por intensas e constantes correntes de ar conhecidas como ventos alísios, que sopram predominantemente no sentido nordeste-sudoeste no Hemisfério Norte e sudeste-noroeste no Hemisfério Sul. A camada inferior desses ventos contém ar úmido, com temperatura regulada pelas trocas de calor entre o oceano e a atmosfera. Essa camada é rasa e apresenta principalmente Cumulus rasos, que raramente geram precipitação. Acima dela, encontra-se a camada de inversão dos alísios, onde a temperatura aumenta com a altitude, atuando como barreira para o movimento ascendente do ar e dificultando a formação de chuvas. Assim, a precipitação nas regiões sob influência dos alísios é rara, exceto quando essa camada de inversão é deslocada ou rompida (Gomes et al., 2015).

No entanto, o surgimento de distúrbios atmosféricos pode alterar o padrão típico dos ventos alísios, desencadeando condições opostas às descritas anteriormente. Como já destacado na literatura, os DOLs são um dos sistemas meteorológicos que atuam na costa leste do NEB. Os DOLs transportam umidade e promovem precipitação em áreas que, sob a influência normal dos alísios, permaneceriam secas. Segundo Berry et al. (1945), os DOLs se propagam por toda a baixa troposfera tropical, com variações de tamanho e intensidade que dependem tanto da época do ano quanto da localização geográfica, Riehl (1954) foi o primeiro a descrever e desenvolver um modelo detalhado das Ondas de Leste de forma tridimensional. De acordo com o autor, estas ondas são oscilações nos campos de pressão e vento, que se encontram em fase na superfície e ocorrem em toda a região tropical e varia de região para região. Na maioria dos casos, o DOL é encontrado em baixos e médios níveis da troposfera (aproximadamente entre 850 e 700 hPa), associado à nebulosidade convectiva e move de leste a oeste sobre os oceanos tropicais, atingindo a costa leste NEB.

No estudo de Coutinho e Fisch (2007), os autores identificam quatro regiões distintas associadas aos DOLs. A região de crista é marcada por tempo estável, alta visibilidade e escoamento divergente na superfície, com subsidência predominante. A nebulosidade é baixa e é composta por nuvens Cumulus rasos, típicas de tempo sem precipitação. Próxima ao eixo do

cavado, há uma área de transição, onde se observam nuvens Cumulus em desenvolvimento, além de Cirrus e Altocumulus. Nessa região, a visibilidade permanece constante, mas já há formação de precipitação esparsa. Uma região no eixo do cavado que apresenta maior instabilidade, com chuvas frequentes e a presença de nuvens Cumulus congestus, Cirrus e Altocumulus. Por fim, uma região a leste do cavado com escoamento convergente e fortes movimentos ascendente do ar com a ocorrência de precipitação de morada a forte em decorrência de nuvens Cumulonimbus.

Gomes et al. (2015) realizaram um estudo observacional dos padrões de circulação gerados a partir do deslocamento dos DOLs na costa leste do NEB e seu impacto para os totais de precipitação sobre a região durante as estações chuvosas de 2006 e 2007. Os resultados mostraram que os DOLs apresentam um sinal forte em baixos níveis, o deslocamento esteve associado com anomalias positivas (negativas) de umidade relativa e precipitação (radiação de onda longa). O método automático de rastreamento capturou 71% dos DOLs em todo o período, indicando ser um método promissor para detecção dos DOLs. Em um estudo posterior, Gomes et al. (2019) geraram uma climatologia para os DOLs, a partir de uma análise observacional de 21 anos. Os autores mostraram que 97% dos DOLs que atingem a região do NEB, 64% são convectivos enquanto os outros 36% não são convectivos. Além disso, 14% dessas ondas atingem a região da Amazônia. Os autores ainda comprovaram a predominância de ocorrência de DOL's para a estação de abril, maio, junho, julho e agosto.

Lyra et al. (2025) apresentaram uma análise aprofundada dos padrões atmosféricos de escala sinótica associados a eventos de precipitação extrema (EPEs) no Nordeste do Brasil (NEB), investigando quatro eventos significativos que ocorreram entre 2017 e 2023. Em particular, o Evento de Precipitação Extrema 1 (EPE1) ocorreu no estado de Alagoas entre 27 e 28 de maio de 2017, impactando severamente áreas metropolitanas, como Maceió, onde foram registrados 173 mm/dia de chuva, o que correspondeu a aproximadamente 25% da média anual da cidade. Os autores mostraram que os padrões sinóticos primários responsáveis pelo EPE1 foram uma perturbação de escala sinótica associada a uma frente fria sobre o sul do Brasil e a propagação de DOLs. Marengo et al. (2023) apresentaram uma análise detalhada das inundações e deslizamentos que atingiram Recife após chuvas extremas. Os autores demonstraram que as precipitações intensas coincidiram com a atuação simultânea de DOLs e de uma frente fria. O pico pluviométrico ocorreu em 28 de maio com acumulados ultrapassando os 200 mm/dia.

2.2 Model for Prediction Across Scales-Atmosphere (MPAS-A)

O Model for Prediction Across Scales-Atmosphere (MPAS-A) tem se destacado como uma alternativa promissora para investigar precipitações extremas no NEB. O MPAS-A trata-se de um modelo atmosférico global, não hidrostático e de malha não estruturada com resolução variável, o que permite aplicar refinamentos de quilômetros sobre a região de interesse sem a necessidade de condições de contorno laterais, preservando a coerência entre a circulação de grande escala e a convecção organizada em escala local. Essa arquitetura possibilita configurações que combinam as vantagens de modelos globais e regionais (Gürer et al., 2024). Em decorrência dessa flexibilidade, o MPAS tem sido aplicado a uma gama de problemas atmosféricos, incluindo monções africanas (Heinzeller; Duda; Kunstmann, 2016), qualidade do ar (Gilliam et al., 2021), assimilação de dados (Liu et al., 2022) e ondas de leste africanas (Núñez Ocasio; Rios-Berrios, 2023), entre outros, reforçando seu potencial para estudos de eventos extremos no leste do NEB.

Para avaliar as capacidades do MPAS em representar casos de convecção na Europa, Kramer et al. (2020) conduziram simulações utilizando configurações de resolução variável, comparando-o ao modelo WRF e a dados observacionais. Os resultados indicaram que ambos os modelos reproduziram adequadamente os padrões observados. No entanto, o MPAS, mesmo em configurações de malha de resolução variável, alcançou uma precisão comparável à do WRF. Além disso, as configurações de grades variáveis do MPAS demonstraram eficácia semelhante à de grades globais de alta resolução, posicionando-se como uma alternativa promissora para previsões de curto prazo.

Heinzeller, Duda e Kunstmann (2016) realizaram uma avaliação aprofundada das capacidades técnicas do modelo MPAS em sua versão v3.1, onde incluiu a utilização de malhas Voronoi não estruturadas e a discretização em grade C, que visam superar as limitações dos modelos globais convencionais que operam em grades regulares. Foi realizada uma comparação entre simulações do MPAS e observações, assim como uma simulação de referência do modelo Weather Research and Forecasting (WRF). Os testes de escalabilidade extrema realizados com uma malha global de 3 km, que contém mais de 65 milhões de células de grade horizontal, revelam uma eficiência paralela superior a 70%. Isso evidencia não apenas o potencial do MPAS para modelagem climática em alta resolução, mas também sua capacidade de se adaptar a desafios computacionais significativos.

Estudos como de Zhao et al. (2019), Xu et al. (2021) e Liu et al. (2024) avaliaram casos extremos de precipitação na China. No estudo de Liu et al. (2024), o modelo MPAS foi

simulado com grades uniformes e variáveis, além de resoluções diferentes para o evento de precipitação extrema que ocorreu no dia 20 de julho de 2021 que teve total pluviométricos de 201,9mm. Os autores constataram que a simulação global MPAS com resolução variável de 60–3 km, acoplada ao conjunto de *convection-permitting*, apresentou um desempenho superior em comparação com as demais simulações.

Outros estudos, como o de Xu et al. (2021), avaliam as diferenças entre grades uniformes e variáveis no modelo MPAS. Nesse trabalho, os autores utilizaram o MPAS-A para simular a variabilidade diurna da precipitação de 15 de junho a 15 de julho em 2015 no leste da China, comparando uma resolução uniforme de 60 km (U6km) com uma variável de 60-4 km (V4km), os dois experimentos foram validados e comparados com os dados de reanálise (ERA5) e observados. Os resultados mostraram que ambas as simulações captaram a distribuição geral da precipitação, mas o V4km apresentou um desempenho superior na reprodução da intensidade e frequência das chuvas. Em contraste, o U60km subestimou a intensidade e superestimou a frequência. O estudo reforça que a grade variável (V4km) é mais eficaz para representar processos de convecção, evidenciando a relevância de resoluções mais altas para melhorar a previsão de eventos extremos na China, apesar dos desafios em modelar fenômenos como tufões e as dinâmicas da camada limite.

Apesar do avanço no uso do modelo MPAS em pesquisas, ainda são escassos os estudos realizados no Brasil, especialmente aqueles focados em eventos extremos de precipitação. Um dos trabalhos mais recentes e relevantes sobre essa temática é o de Lyra et al. (2024). Nesse estudo, os autores investigaram as condições sinóticas de dois eventos extremos de chuva em Alagoas, ocorridos em 01/07/2022 e 07/07/2023. Através das análises sinóticas, identificaram que ambos os eventos estavam associados os DOLs. Além disso, os eventos foram simulados no modelo MPAS (v7.3), O modelo que teve como condição inicial e de contorno a reanálise ERA5 do ECMWF conseguiu simular a precipitação espacial e a intensidade dos dois eventos. Os resultados das simulações mostraram que foi capaz de reproduzir de forma satisfatória tanto a distribuição espacial quanto a intensidade da precipitação.

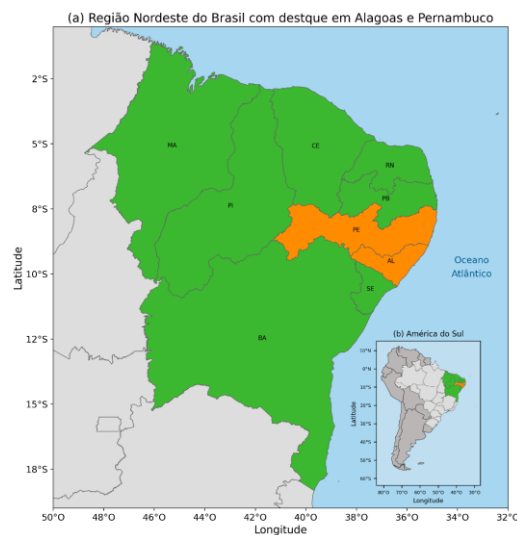
3 DADOS E METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

A área de estudo está situada no Nordeste do Brasil (NEB), a segunda maior região do país, com foco nos estados de Alagoas e Pernambuco (Figura 2), ambos localizados costa leste do NEB. Em Pernambuco, a capital Recife (8,05°S; 34,88°W) concentra cerca de 9,7 milhões

de habitantes. O litoral do estado está inserido na Zona da Mata Pernambucana, com clima tropical úmido, temperaturas elevadas ao longo do ano e maior volume de chuvas entre o outono e o inverno. No interior, o Agreste funciona como zona de transição para o Sertão, que apresenta clima semiárido, alta variabilidade de chuvas e longos períodos de seca. Em Alagoas, a capital Maceió ($9,66^{\circ}\text{S}$; $35,74^{\circ}\text{W}$) tem cerca de 3,4 milhões de habitantes. Possui um padrão climático semelhante com litoral quente e úmido, seguido pelo Agreste e depois o Sertão semiárido (IBGE, 2022; Alvares et al., 2013).

Figura 1 – Localização da Região Nordeste do Brasil com destaque dos estados de Alagoas e Pernambuco (a) e América do Sul (b).



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3.2 Dados

3.2.1 Imagens de satélite

Para investigar os padrões de nebulosidade associados a eventos extremos de precipitação, foram utilizadas imagens do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES-16), especificamente no canal 13 de infravermelho ($10,3\ \mu\text{m}$), em intervalos horários de 1 em 1 hora. Essas imagens estão disponíveis no banco de dados da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE). Os dados estão disponíveis em: <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes16.formulario.logic>.

O GOES-16 é um satélite geoestacionário, ou seja, sua órbita permite que ele permaneça sobre o mesmo ponto do Equador, na longitude de $75,2^{\circ}\text{W}$. Em condições normais, ele transmite imagens do continente sul-americano a cada 10 minutos. O satélite conta com 16

bandas radiométricas, incluindo duas no espectro visível, quatro no infravermelho próximo e dez no infravermelho (Schmit et al., 2017).

Os dados do canal 13 são capturados por sensores que medem a radiação de ondas longas emitidas por nuvens, superfícies continentais e oceânicas. A temperatura de brilho do canal é calculada com base na Lei de Planck, que converte a emissividade das nuvens em temperatura. Quanto menor a temperatura de brilho, mais profundas são as nuvens, o que indica potencial para tempestades severas (NOAA, 2018).

3.2.2 Estações Meteorológicas

Foram utilizados dados de precipitação observacional provenientes de diferentes instituições, de acordo com a localização dos eventos extremos de precipitação (EPE) analisados. Para os EPE ocorridos no estado de Alagoas, usaram-se dados de estações pluviométricas disponibilizados pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH-AL). Para o evento registrado no estado de Pernambuco, utilizaram-se dados de estações fornecidos pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). O primeiro evento contou com um total de 86 estações pluviométricas, o segundo com 188 estações e o terceiro com 172 estações. Esses pontos de observação foram utilizados para representar a distribuição espacial da precipitação e servir como referência visual da precipitação.

3.2.3 Produto *MERGE*

Para as validações subsequentes do modelo, foram utilizados dados diários de precipitação do produto *MERGE*, desenvolvido pelo CPTEC/INPE (disponíveis em: <ftp.cptec.inpe.br>). O *MERGE* integra as observações de precipitação obtidas em estações pluviométricas terrestres com estimativas por satélite (Rozante et al., 2010). Os dados possuem uma resolução espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ em latitude e longitude. Desde a conclusão do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) em 2015, o *MERGE* passou a ser gerado com base nos dados do *Global Precipitation Measurement* (GPM), utilizando o produto *Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM* (IMERG) (Huffman, 2015).

Devido à escassez de estações meteorológicas em diversas regiões do Brasil, especialmente NEB, os produtos que fazem a integração de dados de estações pluviométricas com estimativas por satélite apresentam-se como uma alternativa para a análise de eventos

extremos de precipitação. Os satélites garantem uma série temporal contínua e consistente, além de cobrir todo o território nacional. A técnica utilizada no MERGE tem como principal objetivo reduzir incertezas e vieses nas estimativas de precipitação, sobretudo em áreas com baixa densidade de estações observacionais. Assim, o MERGE serve como uma das ferramentas para avaliar a precipitação na região do NEB (Rozante et al., 2020).

As análises dos modelos foram conduzidas com o produto MERGE/CPTEC. Essa escolha se justifica pela maior densidade de pontos de dados do MERGE/CPTEC, o que é crucial, uma vez que as estações pluviométricas são muito espaçadas, especialmente no EPE de 2017. Além disso, o MERGE/CPTEC, por integrar dados de estações e satélites, é uma opção mais robusta para o evento de 2022. Embora a maior parte das estações do CEMADEN esteja concentrada no litoral de Pernambuco, a utilização do MERGE/CPTEC permitirá uma avaliação mais completa do campo espacial de precipitação, sendo fundamental para analisar a destreza do modelo.

3.2.4 Produto *ERA5*

Foram utilizados dados da 5ª geração da *European ReAnalysis* (ERA5) (HERSBACH et al., 2020) fornecidos pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). O ERA5 é a última geração de reanálise atmosférica do ECMWF e conta com resolução horizontal de 31km (0.25° de latitude e longitude), além de uma resolução vertical de 137 níveis de pressão e a frequência temporária de 1h (disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/>). Foram obtidos dados das variáveis de precipitação, ômega, vento zonal e vento meridional para identificar o padrão de deslocamento associado aos DOLs.

3.2.5 Modelo GFS

As simulações do modelo *Global Forecast System* (GFS) do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) foram utilizadas como referência operacional para fins

comparativos. O GFS é amplamente utilizado em centros de previsão do tempo ao redor do mundo, devido à sua capacidade de fornecer previsões globais com boa cobertura temporal e espacial. Para garantir consistência nas comparações, as rodadas do GFS utilizadas corresponderam à mesma data e horário de inicialização das simulações com o MPAS. Assim, foi possível comparar diretamente os campos de precipitação simulados pelos dois modelos, sob condições iniciais equivalentes, reduzindo o impacto de fatores externos à física e dinâmica dos modelos sobre os resultados.

3.3 Metodologia

3.3.1 Casos de EPE

A Tabela 2 exemplifica a localização e a data dos eventos que serão avaliados neste estudo. O Evento de Precipitação Extrema (EPE1) ocorreu nos dias 27 e 28 de maio de 2017 (Figura 2a), que causou fortes chuvas no estado de Alagoas, onde foram registrados 173 mm/dia (de acordo com estações pluviométricas) na cidade de Maceió, o que correspondeu a aproximadamente 25% da média anual. Os impactos causados pelos eventos foram diversos, como enchentes, desabrigados e até mortes. Em uma reportagem do G1 ALAGOAS (2017), foi mostrado que as chuvas causaram quatro mortes e foi decretado estado de calamidade na cidade de Maceió. O G1 PERNAMBUCO (2024) destacou como os impactos das chuvas em Recife ainda deixam sinais, Mesmo após dois anos da tragédia das chuvas em Pernambuco, que deixou 133 mortos e mais de 120 mil pessoas afetadas pelo desastre, mais de duas mil pessoas ainda não voltaram para suas casas. No caso mais recente, de 2024, o G1 ALAGOAS (2024) informou que as chuvas do dia 7 de maio provocaram alagamentos e queda de árvores em Maceió, além de destacar que choveu 45% do esperado para todo o mês de maio.

Tabela 1 – Localização dos casos de eventos extremos de precipitação.

Eventos Extremos de Precipitação	Localização	Data do evento
EPE1	Alagoas	27/05/2017
EPE2	Pernambuco	28/05/2022
EPE3	Alagoas	07/05/2024

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

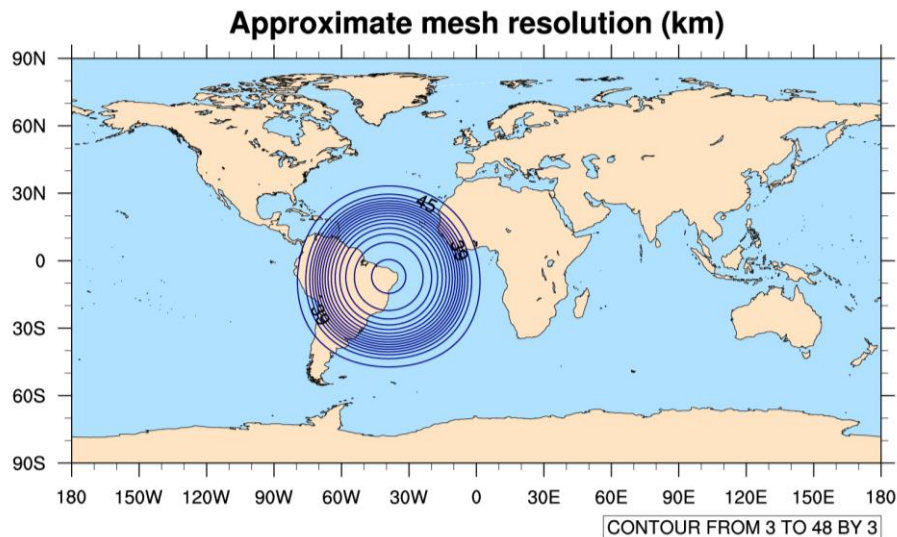
3.3.2 Simulações numéricas

O modelo MPAS-A foi utilizado para simular três eventos extremos de precipitação. O MPAS é um modelo numérico não hidrostático, baseado nas equações primitivas, que se

destaca por empregar uma grade esférica com resolução variável, composta por malhas hexagonais (Skamarock et al., 2012). Diferentemente dos modelos regionais tradicionais, o MPAS é um modelo global, o que permite evitar os efeitos de descontinuidade gerados por condições de contorno laterais impostas, uma das principais fontes de erro em simulações de mesoescala. Além disso, sua estrutura permite o acoplamento direto entre processos de escala sinótica e de mesoescala, promovendo um feedback mais realista entre os sistemas locais e a circulação de grande escala.

As simulações foram conduzidas para duas versões do modelo: a versão 7.3 e a versão 8.2.2, ambas com uma grade de resolução variável, permitindo uma alta resolução e uma simulação dos eventos sobre os estados em que ocorreram. Uma grade variável de 60-3 km (Figura 2) foi configurada com refinamento centrado nas cidades de Maceió (9,50°S; 35,80°W) e Recife (8,05°S; 34,88°W). Para as simulações dos eventos, todos os experimentos do MPAS foram inicializados às 12:00 UTC do dia anterior ao dia que antecedeu o evento para permitir um tempo de spin-up adequado (Skamarock et al., 2014). As simulações foram inicializadas usando os dados de reanálise ERA5 com resolução horizontal de 0.25° às 12:00 UTC. Além disso, foi utilizado o conjunto de parametrizações de *convection-permitting* (CP) modificando o esquema de parametrização de microfísica de nuvem.

Figura 2 - Grade Variável do modelo (60-3km).



O conjunto de parametrizações CP permite resolver tanto os movimentos hidrostáticos quanto os não hidrostáticos. No modelo MPAS foi testado grades que variam desde algumas centenas de quilômetros até 3 km. É a configuração recomendada para qualquer aplicação do MPAS que utilize grades capazes de resolver processos convectivos explicitamente com espaçamento de grade menores que 10 km. Assim, permitindo ser utilizado de forma eficiente

tanto em alta resolução uniforme quanto em simulação com resolução variável, abrangendo escalas onde os efeitos hidrostáticos e não hidrostáticos coexistem (NCAR, 2023).

No MPAS, o conjunto CP (Tabela 1) reúne os principais esquemas necessários para simular convecção em malhas de alta resolução. Nesse conjunto, o esquema de microfísica de nuvens padrão é o Thompson (Thompson et al., 2008; Thompson; Eidhammer, 2014), mas o esquema WSM6 (Hong; Lim, 2006) também foi testado com as demais parametrizações do conjunto de CP. Para a convecção de cúmulos é usado o esquema de Grell-Freitas (Grell & Freitas, 2014), superfície terrestre com Noah na v7.3 (Chen; Dudhia, 2001) e Noah-MP na v8.2.2 (Niu et al., 2011), camada limite planetária e camada superficial com MYNN (Nakanishi; Niino, 2006), radiação de onda longa/curta com o esquema RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Models; Iacono et al., 2008; Price et al., 2014) e arrasto de ondas gravitacionais por orografia com YSU (Hong et al., 2006).

Entre as versões v7.3 e v8.2.2 do MPAS, a mudança mais relevante para as simulações foi a inclusão do esquema de superfície terrestre Noah-MP. Essa atualização amplia a representação dos processos de superfície ao acoplar múltiplas opções de vegetação, neve e hidrologia, impactando diretamente o balanço de energia e água e, por consequência, fluxos turbulentos, temperatura e umidade a 2 m, evolução da umidade do solo e o acoplamento terra-atmosfera que influencia precipitação e convecção (Li et al., 2022).

Tabela 2 – Parametrizações físicas do *convection-permitting* usadas no MPAS.

Parametrizações	Esquemas	
	MPASv7.3	MPASv8.2.2
Microfísica de nuvens	Thompson / WSM6	Thompson / WSM6
Convecção de cumulus	Grell-Freitas	Grell-Freitas
Superfície terrestre	Noah	Noah-MP
Camada Limite Planetária / Camada superficial	MYNN	MYNN
Radiação de OL / OC	RRTMG	RRTMG
Fração de nuvem para radiação	Xu-Randall	Xu-Randall
Arrasto de ondas gravitacionais por orografia	YSU	YSU

Fonte: Adaptado de UCAR (2024).

3.3.2.1 Parametrização de microfísica das nuvens

Atualmente, o MPAS oferece 3 opções de parametrização da microfísica de nuvens, abrangendo diferentes níveis de complexidade. Essas opções incluem: esquemas de nuvens quentes (Kessler), *single-moment* (WSM6) e de *double-moment*, como o Thompson, que podem

ser utilizados com ou sem a inclusão de aerossóis. Dentre as parametrizações de microfísica disponibilizadas pelo modelo MPAS, neste estudo serão usadas WSM6 e a Thompson:

Esquema WSM6

Hong, Dudhia e Chen (2004) destacaram a importância de uma nova abordagem para a aplicação da microfísica de nuvens em modelos numéricos. Essa abordagem visava incorporar uma representação mais realista dos processos de concentração, acreção e nucleação de gelo, além de incluir a sedimentação de partículas de gelo e novas parametrizações que considerassem diferentes fases do gelo. Essas melhorias foram implementadas no modelo WRF por meio dos esquemas de momento simples (*single-moment*), que utilizam o método bulk. Esses esquemas ficaram conhecidos como *WRF-Single-Moment Microphysics Schemes* (WSMMPs).

O esquema *WRF Single-Moment 6-Class* (WSM6) é uma versão aprimorada das parametrizações anteriores, introduzindo a inclusão do graupel e seus processos associados (Hong e Lim, 2006). Uma das inovações do WSM6 é o método atualizado para representar a velocidade de queda das partículas de gelo na fase mista, incluindo o graupel e seus processos de agregação. Como um esquema de momento único (*single-moment*), ele incorpora equações prognósticas para a razão de mistura de massa dos hidrometeoros.

O WSM6 resulta da combinação dos esquemas WSM3 e WSM5, adicionando a sedimentação do gelo da nuvem. A inclusão desses processos promoveu melhorias significativas, especialmente em três aspectos: (1) o aumento na quantidade de nuvens altas; (2) uma representação mais precisa da precipitação na superfície; e (3) uma simulação mais fiel da temperatura em larga escala, por meio de uma descrição aprimorada do gelo nas nuvens e do albedo da superfície (Hong e Lim, 2006). Devido à sua complexidade e à inclusão de processos relacionados a gelo, neve e graupel, o WSM6 é considerado adequado para simulações em alta resolução, sendo amplamente utilizado em estudos meteorológicos e climáticos.

Uma das principais vantagens dos esquemas *single-moment* é que a distribuição do tamanho dos hidrometeoros é proporcional à sua massa, simplificando a modelagem dos processos microfísicos. Esses esquemas representam com precisão os processos envolvendo o gelo como uma função da temperatura, bem como a concentração de núcleos de gelo e cristais de gelo, em função da quantidade de gelo presente. Em relação à concentração numérica de gotas de chuva, o WSM6 apresenta uma distribuição relativamente uniforme ao longo da

direção vertical. As variações na concentração de gotas são pouco expressivas, mantendo um parâmetro de interceptação constante para a chuva, o que contribui para a coerência dos resultados nas simulações atmosféricas.

Esquema Thompson

A parametrização de Thompson (Thompson et al., 2008) é um esquema de *double-moment* que calcula tanto a razão de mistura (concentração de massa) quanto a concentração numérica de hidrometeoros em nuvens e precipitação, como gotículas de nuvens, cristais de gelo, gotas de chuva e neve. Este esquema incorpora diversas melhorias nos processos físicos e na sua codificação, resultando em maior precisão na representação dos fenômenos atmosféricos.

Uma das principais distinções da parametrização de Thompson em relação a outros esquemas é a maneira como a distribuição do tamanho da neve é tratada. Essa distribuição depende tanto da quantidade de água gelada quanto da temperatura, sendo representada por uma soma de distribuições exponencial e gama.

Além disso, a neve é modelada como não esférica, com densidade variável inversamente proporcional ao diâmetro das partículas, ao contrário de outras parametrizações que assumem neve esférica com densidade constante. Além disso, são utilizadas tabelas de consulta para processos como fusão de gotas de água e conversão de gelo em neve torna a parametrização de Thompson mais eficiente computacionalmente e permite uma maior precisão na modelagem desses fenômenos.

3.3.3 Validação estatística

A avaliação dos resultados das simulações do modelo MPAS e reanálise foi conduzida por meio de índices de destreza determinísticos, com o objetivo de verificar o grau de correspondência entre os valores simulados pelo modelo e os dados observacionais, além de compará-los com reanálises. A utilização desses índices possibilita uma análise objetiva do desempenho do modelo, identificando potenciais erros sistemáticos e ajustando os parâmetros, se necessário, para melhorar as previsões. Serão usados: Viés, raiz do erro quadrático médio (RMSE) e do coeficiente de correlação (CC) entre as variáveis (Wilks, 2011).

1) Erro Médio (BIAS)

O Erro Médio é o erro sistemático ou tendencioso entre o modelo e o observado, O cálculo espacial do BIAS forneceu mapas com as diferenças entre os valores de precipitação média das simulações do modelo MPAS (X_s) e o observado MERGE/CPTEC (X_o), onde i representa o índice do ponto de grade e n o número total de pontos avaliados (Eq. 1). Valores de BIAS positivos indicam que a previsão do modelo foi maior que do observado e o oposto acontece com resultados negativos (Wilks, 2011).

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{si} - x_{oi})}{n} \quad (1)$$

2) Coeficiente de Correlação (CC)

O coeficiente de correlação espacial mede o grau de relação entre as variáveis do modelo e observada, seu cálculo é feito a parte correlação em cada ponto de grade para todos os tempos das duas variáveis (Eq. 2), O CC varia entre -1 e 1, sendo uma correlação direta quando positivo e inversa quando negativo (Wilks, 2011).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{si} - \bar{x}_s)(x_{oi} - \bar{x}_o)}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (x_{si} - \bar{x}_s)^2) \sum_{i=1}^n (x_{oi} - \bar{x}_o)^2}} \quad (2)$$

Onde $\bar{x}$ é a média na área, calculado como:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3)$$

3) Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)

O RMSE é usado para a verificação da acurácia de um determinado parâmetro, ou seja, neste trabalho verificou o grau de exatidão dos modelos. Onde que zero é a indicação de uma “simulação perfeita”, sendo assim, valores próximos ao zero é uma indicação de menor erro. Para o cálculo do RMSE, primeiro calculou-se o RMSE para cada tempo de análise e, em seguida, realizou-se uma média em todo o período de análise (Wilks, 2011).

O RMSE foi calculado através da equação 4:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_s - x_o)^2}{n}} \quad (4)$$

Para complementar os índices determinísticos, utilizou-se funções de densidade de probabilidade (PDFs) para caracterizar a distribuição dos acumulados de precipitação no período analisado e o comportamento da cauda direita associado aos eventos EPE. As PDFs foram estimadas a partir dos acumulados a cada 3 h das simulações do MPAS, do GFS e do produto MERGE/CPTEC, por meio de histogramas normalizados (frequência dividida pelo total de amostras e pela largura de classe em classes mais finas em baixos acumulados e classes em escala logarítmica para valores elevados, de modo a capturar adequadamente os extremos (Martinez-Villalobos; Neelin, 2021). Foi usado o limiar de 0,5 mm na contagem para diminuir a representação de chuva com valor zero. A comparação das PDFs permite identificar deslocamentos de massa (viés), diferenças de dispersão e tendências de super/subestimação de eventos raros.

4 RESULTADOS

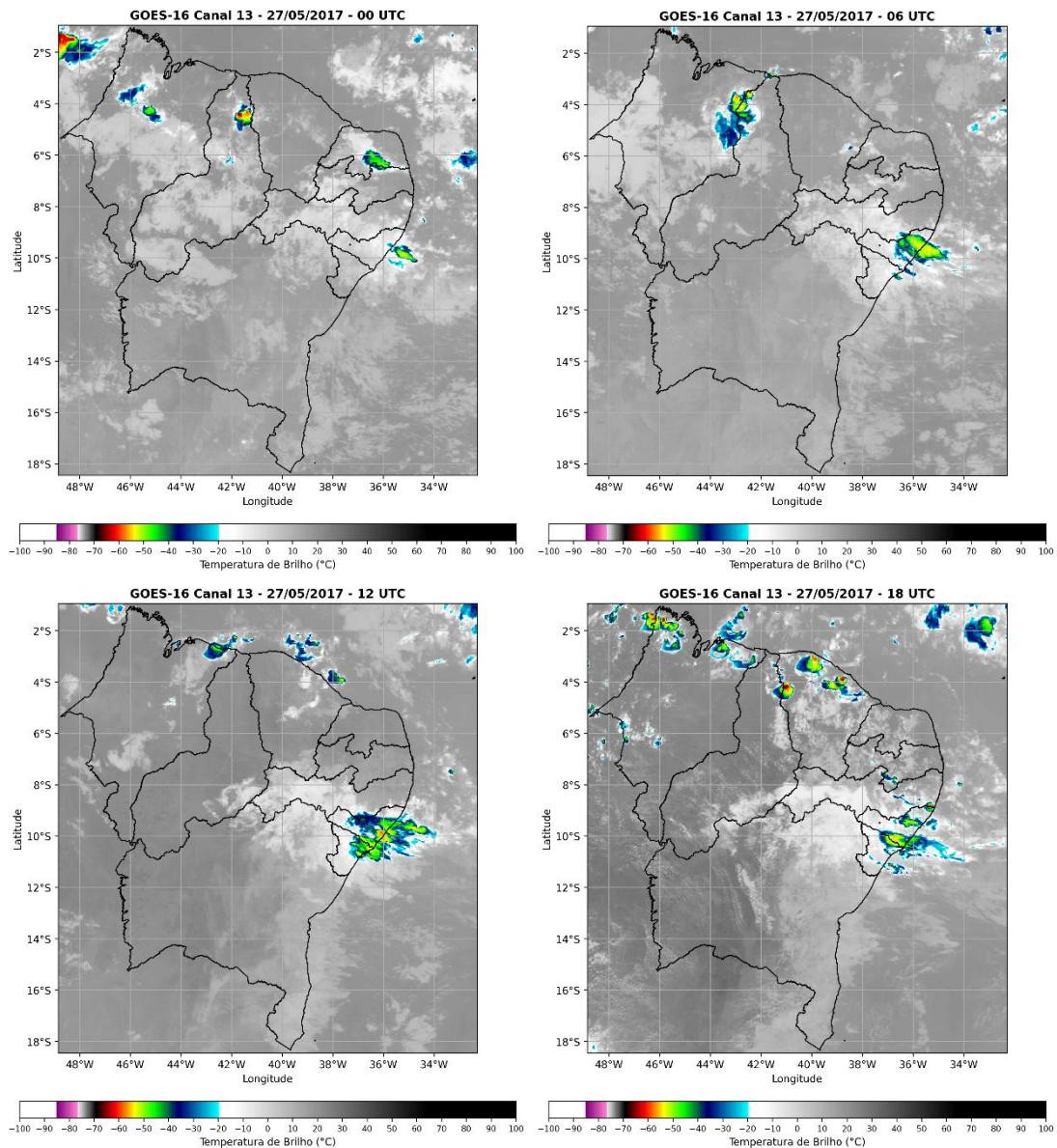
Os casos a seguir já foram caracterizados em detalhe na literatura. Para o episódio de 27 a 28 de maio de 2017 em Alagoas, Lyra et al. (2025) descreveram os padrões sinóticos dominantes, com a presença de uma perturbação de escala sinótica associada a uma frente fria sobre o Sul do Brasil e a DOLs. Para o evento de 28 de maio de 2022 em Recife, Marengo et al. (2023) mostraram que as precipitações intensas coincidiram com a atuação simultânea de DOLs e de uma frente fria. Para evitar redundâncias, este trabalho se concentra na sensibilidade do MPAS e na comparação entre os esquemas microfísicos. No entanto, imagens de satélite, precipitação das estações meteorológicas e campos de linhas de corrente, divergência e ômega foram usadas para mostrar os sistemas.

4.1 EPE1

As figuras 3 apresentam a evolução sinótica dos três eventos meteorológicos sobre a Região Nordeste do Brasil (NEB), a partir de imagens do satélite GOES-16 no canal infravermelho 13 (10,3 μm). Na figura 3, é possível observar o desenvolvimento de um sistema sobre a porção leste do NEB. Às 00 UTC, observam-se núcleos convectivos isolados e de pequena escala. Ao longo da madrugada, o sistema aumenta, atingindo sua máxima intensidade

às 12 UTC, evidenciando um aglomerado convectivo bem formado sobre os estados de Sergipe e Alagoas, com temperaturas de topo de nuvem atingindo aproximadamente -70°C . Às 18 UTC, o sistema inicia seu ciclo de dissipação, deslocando-se para o Oceano Atlântico.

Figura 3 - Imagens do satélite GOES-16 no canal do infravermelho (banda 13) do sistema de 27 de maio de 2017 sobre o Nordeste do Brasil nos horários sinóticos de 00, 06, 12 e 18 UTC.

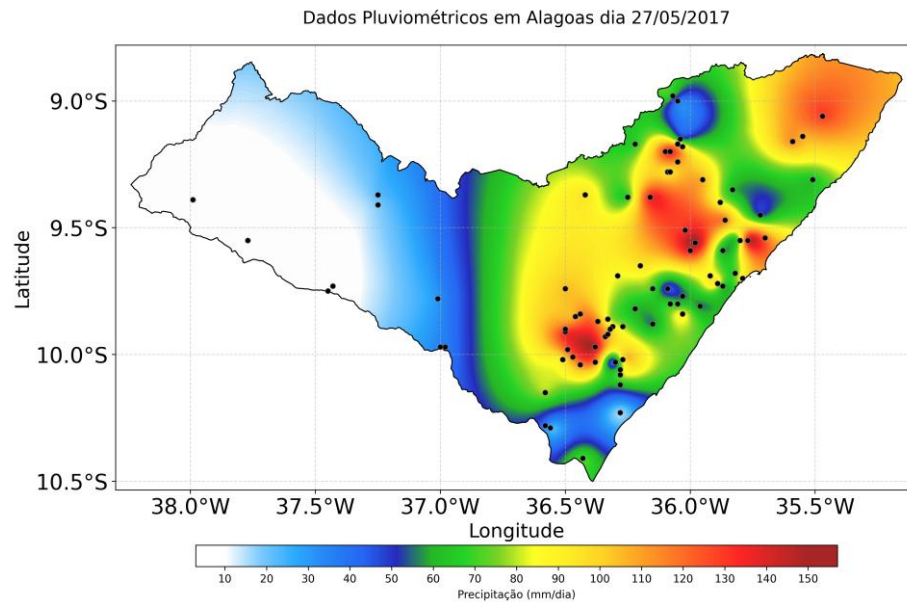


Fonte: CPTEC/INPE, adaptado pela autora (2025).

A Figura 4 apresenta a interpolação da precipitação acumulada do dia 27/05/2017 em Alagoas, utilizando 86 estações meteorológicas da SEMARH-AL. A partir da análise da figura, observa-se que as chuvas mais intensas, com acumulados superiores a 120 mm/dia, ocorreram nas regiões litorâneas e em partes do Agreste do estado. A capital, Maceió, registrou

acumulados acima de 130 mm/dia, enquanto a região do Sertão alagoano apresentou os menores volumes, com a maioria dos pontos abaixo de 50 mm/dia. Esses dados indicam que o evento extremo ocorreu predominantemente na porção litorânea do estado.

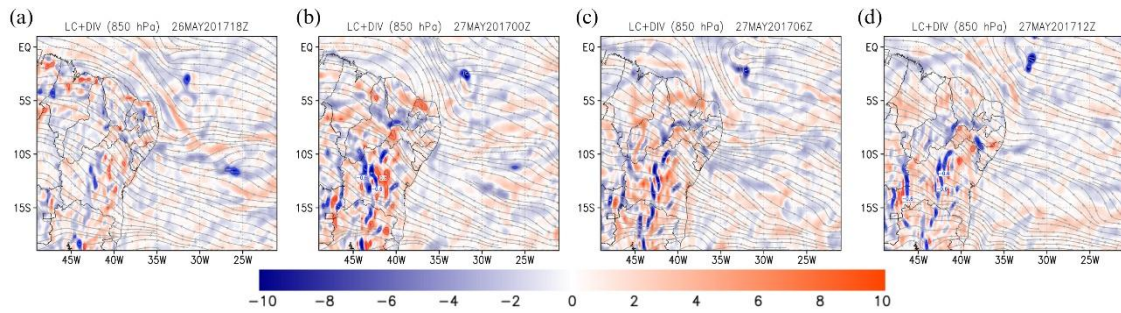
Figura 4 – Precipitação acumulada das estações meteorológicas para o EPE do dia 27/05/2017 em Alagoas.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Figura 5, mostra os campos de linha de corrente e divergência em 850 hPa para o EPE1. O cavado aparece a leste do NEB com eixo orientado de nordeste para sudoeste, inicialmente entre 7 e 10°S e de 36 a 39°W, com confluência dos alísios de nordeste para a faixa costeira de Alagoas e Pernambuco (Figura 5a). Nas horas seguintes o eixo mantém-se entre 8 e 11°S e de 36 a 38°W (Figura 5b), aproximando-se da costa e reforçando uma banda de convergência paralela ao litoral próximo de 9,5°S e 35,5°W. As 6 UTC, observa-se uma movimentação para oeste com eixo entre 8 e 10°S e de 35 a 37°W e máximos de convergência sobre Maceió, em torno de 9 a 9,8°S e 34,8 a 35,8°W (Figura 5c). As 12 UTC, o eixo muda de 35 para 36°W entre 8 e 10°S, com o núcleo convergente ancorado na costa leste de Alagoas, próximo de 9,5°S e 35,6°W, formando um ambiente favorável a ascensão e organização convectiva (Figura 5d). O conjunto do eixo, curvatura ciclônica dos alísios, avanço do cavado para entre 35 e 36°W e banda de convergência costeira persistente nas figuras, constitui evidência da atuação de um DOL em baixos níveis.

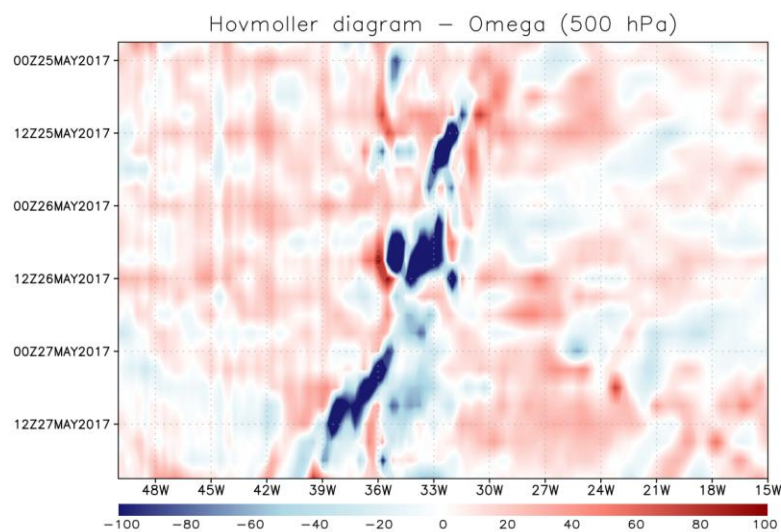
Figura 5 - Linha de corrente (m/s) e divergência (sombreada, $10^4/s$) em 850 hPa 26 de maio de 2017 às 18 (a) e 27 de maio de 2017 às 00 (b), 06 (c), 12 UTC (d) com os dados da reanálise ERA5.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na figura 6 mostra o Hovmöller da ω em 500 hPa ao longo de 9°S , evidenciando a propagação de leste para oeste desde o Atlântico (entre 40 e 38°W) até a costa de Alagoas (entre 36 e $35,5^\circ\text{W}$). Os núcleos de ascensão apresentam valores negativos de ω entre -80 a -100 Pa/s no pico junto à costa (27/05), com valores oceânicos anteriores ao evento na faixa -50 a -70 Pa/s. Esses valores de ω negativos indicam convecção mais profunda, e a inclinação tempo–longitude confirma a passagem de um DOL em coerência com o período de chuva mais intensa observado no EPE1.

Figura 6 - Diagrama de Hovmöller de ω (Pa/s; 500 hPa) entre 25 e 27 de maio a 9°S de latitude.



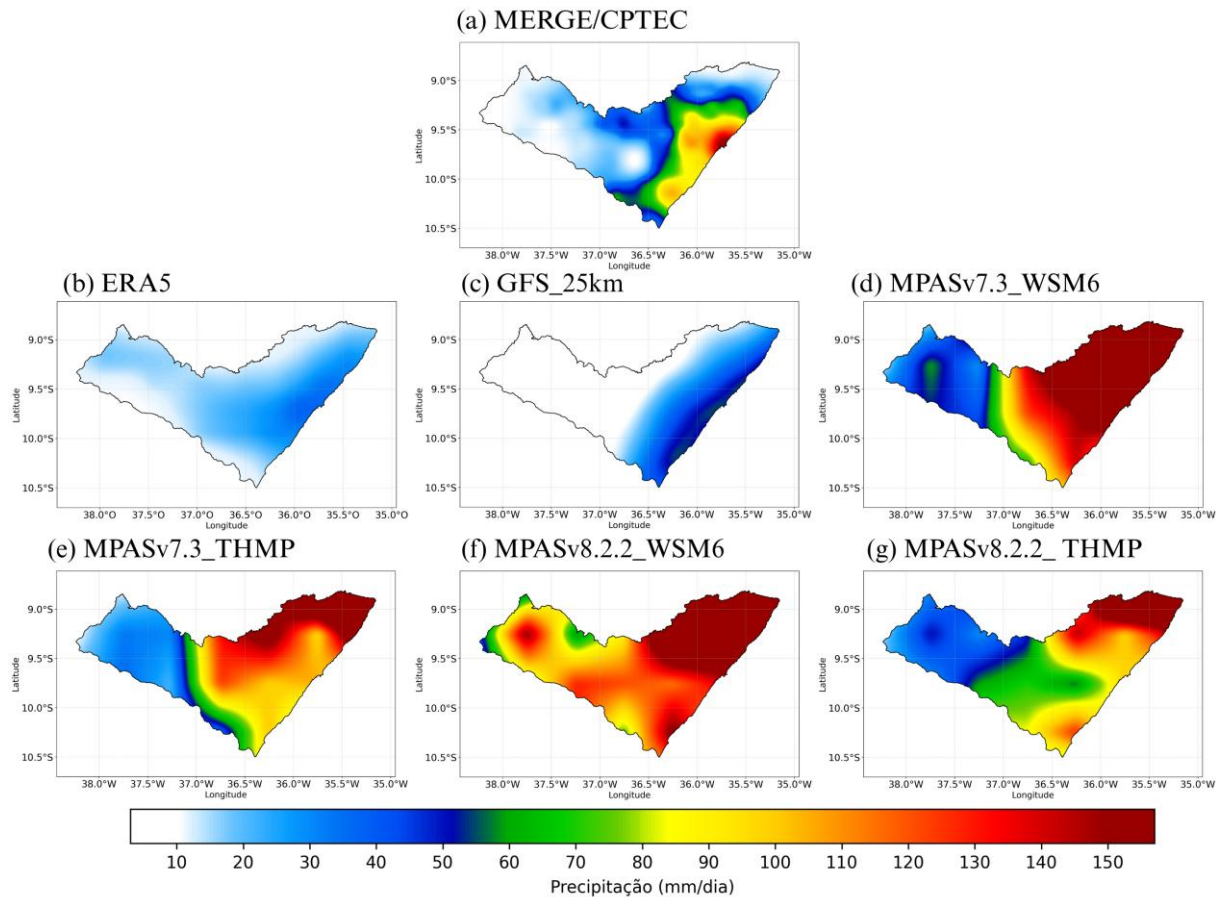
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Figura 7 apresenta os campos de precipitação acumulada diária no dia 27 de maio de 2017. O dado observado pelo MERGE/CPTEC (Figura 7a) mostra um núcleo bem definido de chuva intensa sobre a costa leste de Alagoas, especialmente na região de Maceió, com acumulados variando entre 90 e 150 mm/dia. A reanálise ERA5 (Figura 7b), utilizada como base para as condições iniciais e de contorno do MPAS, não representa adequadamente a intensidade do evento, com valores máximos inferiores a 60 mm/dia e ausência de um núcleo bem definido sobre Alagoas. A distribuição espacial da chuva também aparece dispersa, com pouca correspondência com o MERGE/CPTEC.

O modelo GFS_25km (Figura 7c) apresenta valores abaixo de 60 mm/dia em todo o domínio, apesar de mostrar chuvas na região que ocorreu o evento os valores são bem inferiores ao do MERGE/CPTEC. A simulação com MPASv7.3 com o WSM6 (Figura 7d) apresenta uma superestimação da extensão do sistema, com valores acima de 150 mm/dia. Já a simulação com Thompson (Figura 7e) mostra acumulados entre 100 e 130 mm/dia, com melhor coerência em relação à faixa litorânea, embora a simulação com WSM capture o núcleo mais intensidade observada sobre Maceió.

Com o MPASv8.2.2, observa-se melhora na distribuição da chuva. O WSM6 (Figura 7f) ainda apresenta altos valores de precipitação, no entanto menos no sul de Alagoas comparado a versão anterior. Por outro lado, a simulação com Thompson (Figura 7g) demonstra padrão espacial mais próximo do observado, com acumulados entre 90 e 120 mm/dia sobre a área de interesse, embora ainda subestime o núcleo mais intenso da capital alagoana.

Figura 7 – Precipitação acumulada (mm/dia) em 27 de maio de 2017. Comparação entre a precipitação observada pelo MERGE/CPTEC (a) e ERA5 (b), GFS_25km (c), MPASv7.3_WSM6 (d), MPASv7.3_THMP (e), MPASv8.2.2_WSM6 (f) e MPASv8.2.2_THMP (g).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

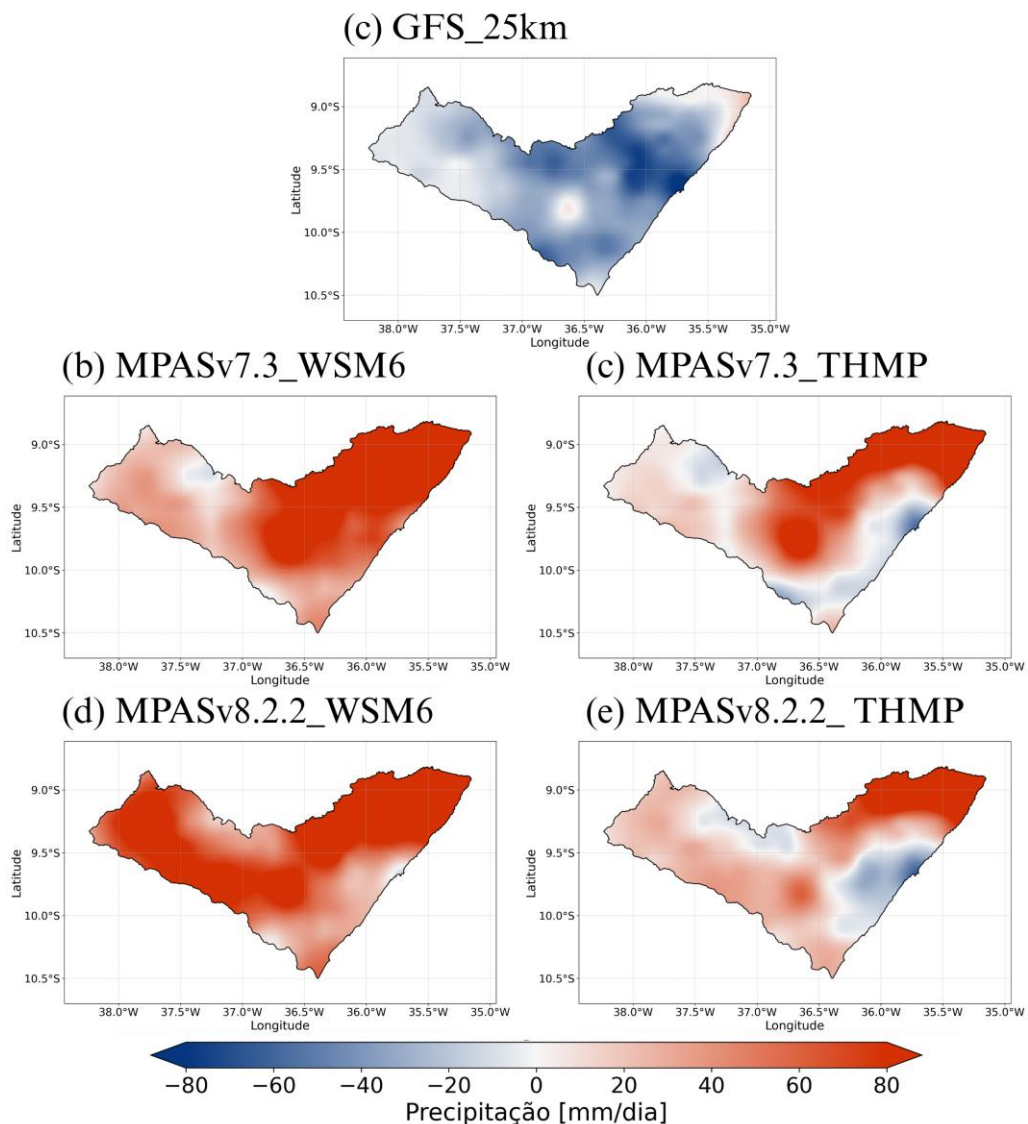
Na Figura 8a, o modelo GFS_25km apresenta predominantemente valores negativos de BIAS, evidenciando uma subestimação da precipitação em relação ao MERGE/CPTEC. As subestimações mais intensas ocorrem no interior de Alagoas e na Zona da Mata, com valores abaixo de -30 mm/dia, o que aponta uma limitação relevante na representação da intensidade do evento. Pequenas regiões próximas ao litoral norte exibem BIAS positivo, indicando superestimações pontuais. Além disso, na região de Maceió, onde se concentrou o evento extremo, ocorrem as maiores subestimações, com valores inferiores a -80 mm/dia.

A simulação com o MPASv7.3 utilizando o esquema WSM6 (Figura 8b) apresenta uma leve redução da subestimação, especialmente em áreas do litoral centro-norte, embora o sertão alagoano ainda apresente viés negativo relevante. O esquema Thompson (Figura 8c) melhora consideravelmente o desempenho, com ampla área de BIAS próximo de zero, sobretudo no

leste do domínio. No entanto, a simulação ainda subestima significativamente a precipitação em Maceió, justamente na região mais afetada pelo evento.

Nas simulações com o MPASv8.2.2, os resultados são ainda mais promissores. A simulação com WSM6 (Figura 8d) apresenta viés mais suave no litoral e subestimações reduzidas na capital, com valores próximos de zero. A configuração com Thompson (Figura 8e) exibe o menor BIAS entre todas as simulações, com padrão espacial mais homogêneo e ausência de valores extremos em grande parte do estado. Ainda assim, na área mais próxima do núcleo do evento (região metropolitana de Maceió), ocorre uma subestimação entre -20 e -60 mm/dia.

Figura 8 – BIAS da precipitação do EPE1 entre o MERGE/CPTEC e as simulações do GFS_25km (a), MPASv7.3 WSM6 (b), MPASv7.3 THMP (c), MPASv8.2.2 WSM6 (d) e MPASv8.2.2 THMP(e).

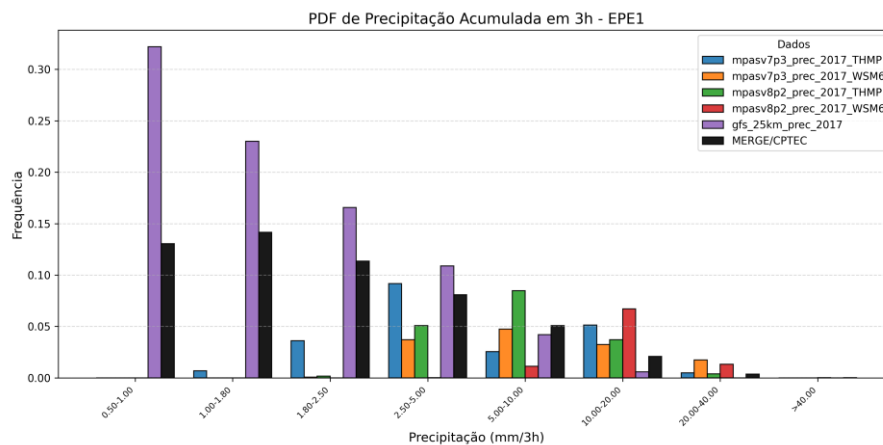


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O EPE1 (Figura 9) é caracterizado por um predomínio de eventos de baixa intensidade. A curva observacional (MERGE) apresenta distribuição com pico bem definido nas faixas de 1 a 6 mm, e rápida queda da frequência para acumulados superiores. A simulação MPASv8.2.2_THMP apresentou subestimação da frequência de chuvas fracas (1 a 2.5 mm), mas superestimou eventos com acumulados de 5-10 mm. A simulação MPASv8.2.2_WSM6, por outro lado, apresentou uma concentração maior na faixa de 10–20 mm e maior total de eventos intensos.

A versão anterior, MPASv7.3_THMP, também apresentou comportamento semelhante, com leve deslocamento da distribuição para intensidades mais baixas. Já o modelo GFS, utilizado como referência operacional, apresentou desempenho intermediário, pois reproduziu adequadamente a frequência dos eventos leves e moderados, mas falhou na simulação de acumulados acima de 15 mm. No geral, no EPE1, todos os modelos subestimaram os acumulados mais elevados, embora o MPASv8.2.2_THMP tenha sido o mais próximo da distribuição observada.

Figura 9 – Funções de densidade de probabilidade (PDFs) do acumulado de 3 h da precipitação para o EPE1.



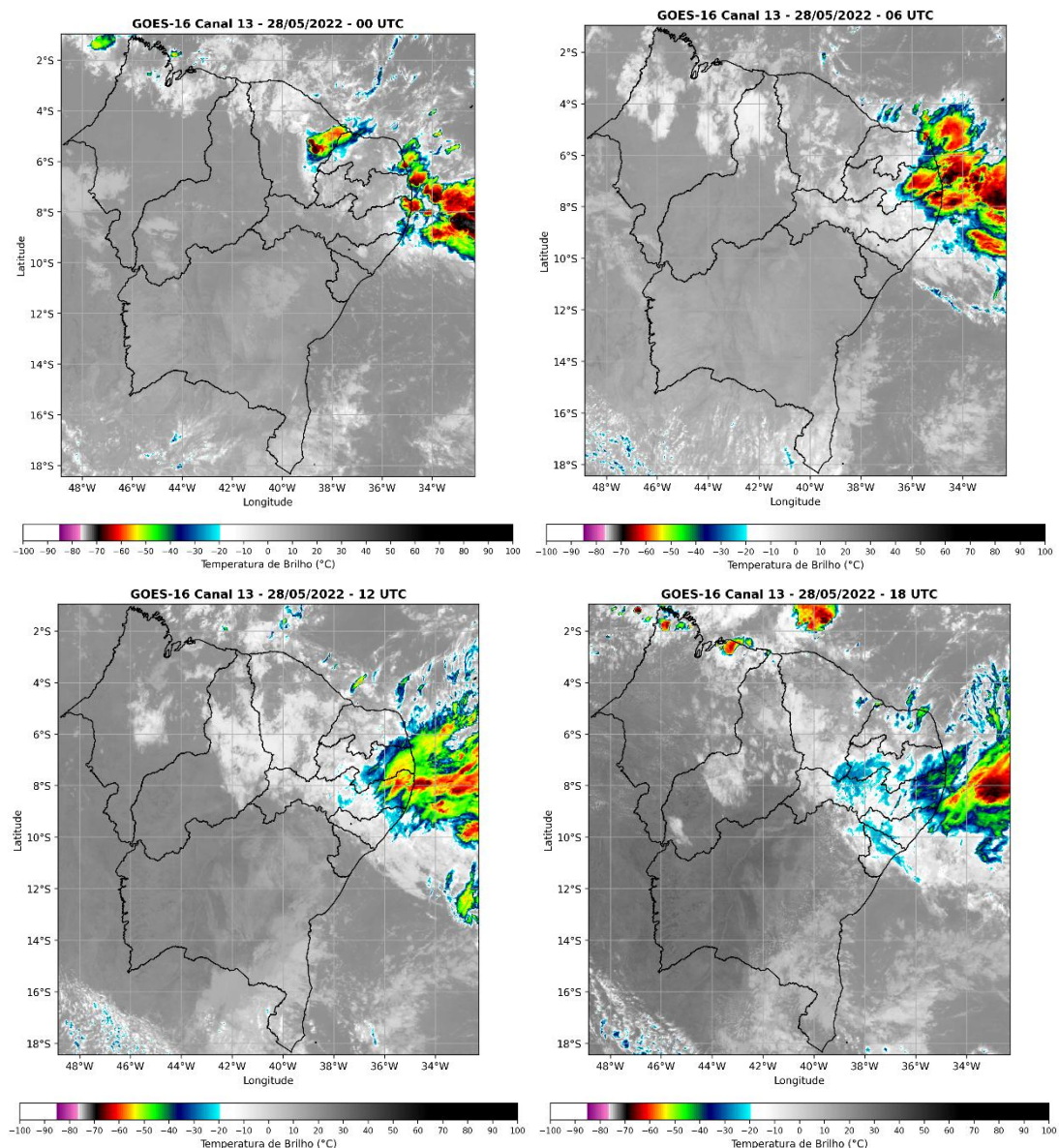
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.2 EPE2

No EPE2 (Figura 10), desde as 00 UTC, o sistema já se apresenta bem desenvolvido e com um núcleo intenso sobre a costa de Pernambuco e Alagoas. Sua característica mais proeminente é a vasta área com temperaturas de brilho extremamente baixas, inferiores a -80°C , indicativo de uma convecção muito profunda e severa. Às 06 UTC, o sistema se expande e

mantém sua intensidade, com o núcleo frio persistindo sobre a região costeira de Pernambuco. O sistema permanece intenso e de grande escala às 12 UTC, ainda que o núcleo mais frio comece a diminuir de tamanho. Às 18 UTC, o sistema mostra sinais de enfraquecimento, com o aquecimento dos topos de nuvem e um deslocamento para leste, sobre o oceano.

Figura 10 - Imagens do satélite GOES-16 no canal do infravermelho (banda 13) do sistema de 28 de maio de 2022 sobre o Nordeste do Brasil nos horários sinóticos de 00, 06, 12 e 18 UTC.

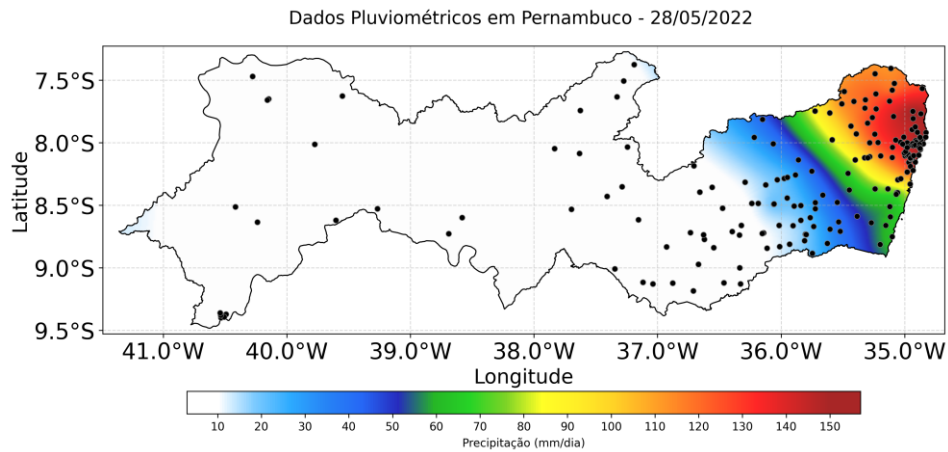


Fonte: CPTEC/INPE, adaptado pela autora (2025).

A Figura 11 mostra a interpolação da precipitação acumulada no estado de Pernambuco para o dia 28/05/2022, com base em dados de 188 estações meteorológicas do CEMADEN. As maiores concentrações de chuva, com acumulados acima de 120 mm/dia, estão localizadas na

porção leste do estado, especialmente na região metropolitana do Recife. A precipitação diminui gradativamente em direção ao oeste do estado, o que sugere um fenômeno com maior intensidade em uma área mais localizada.

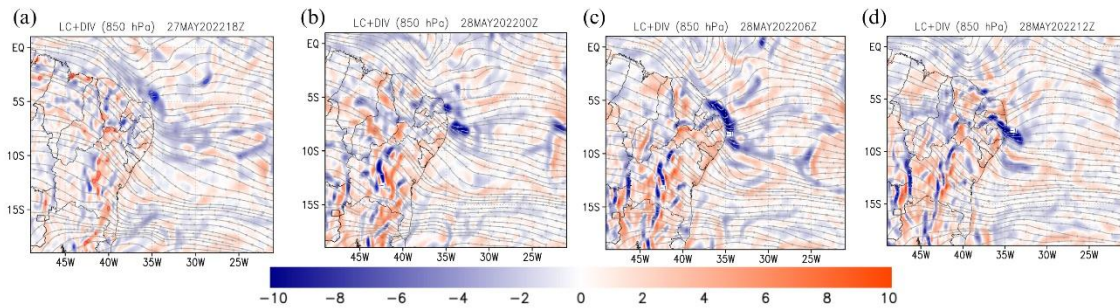
Figura 11 – Precipitação acumulada das estações meteorológicas para o EPE do dia 28/05/2022 em Pernambuco.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Figura 12, observa-se os campos de linha de corrente e divergência em 850 hPa para o EPE2. O cavado está bem definido no Atlântico tropical sudoeste, com eixo de nordeste para sudoeste entre 7 e 10°S e de 34 a 37°W, já induzindo convergência sobre a faixa costeira de Pernambuco e Alagoas, por volta de 8 a 9,5°S e 34,5 a 35,5°W (Figura 12a). À meia-noite, o eixo encosta na costa entre 8 e 10°S e de 33,5 a 35,5°W, concentrando máximos de convergência sobre a RMR e a Zona da Mata, em torno de 8,1 a 8,5°S e 34,9 a 35,3°W (Figura 12b). Às 6 UTC, observa-se avanço para oeste do eixo, que alcança 33 a 35°W entre 8 e 10°S, mantendo núcleos convergentes costeiros próximos de 8 a 9°S e 34,7 a 35,1°W (Figura 10c). Às 12 UTC, persiste um cavado raso com eixo entre 33 e 35°W e 8 a 10°S e banda convergente ativa a 8 a 9,5°S e 34,5 a 35,0°W, coerente com os picos de precipitação (Figura 12d). Os campos novamente mostram a atuação de DOLs.

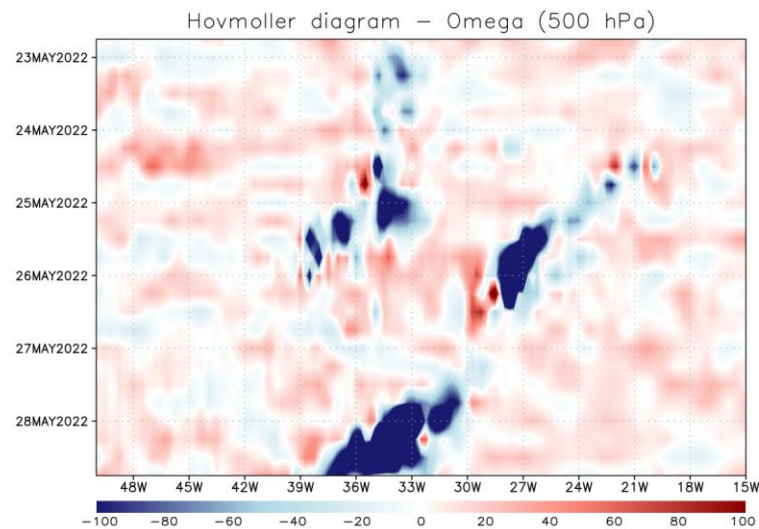
Figura 12 - Linha de corrente (m/s) e divergência (sombreada, $10^4/s$) em 850 hPa 27 de maio de 2022 às 18 (a) e 28 de maio de 2022 às 00 (b), 06 (c), 12 UTC (d) com os dados da reanálise ERA5.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na figura 12 mostra o Hovmöller da ω em 500 hPa em 8°S, com perturbações que no Atlântico (aproximadamente entre 39-33°W) e chegam próximo à costa (aproximadamente 35°W) em 28/05 no litoral Pernambuco. Os núcleos de ascensão atingem valores de ω entre -80 a -100 Pa/s no período de máxima organização. A intensificação de valores negativos de ω com a aproximação da costa reforça a atuação de DOLs sustentando convecção organizada no caso de 2022.

Figura 13 - Diagrama de Hovmöller de ω (Pa/s; 500 hPa) entre 23 e 28 de maio a 8°S de latitude.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Figura 14 apresenta a distribuição espacial da precipitação acumulada no dia 28 de maio de 2022. Observa-se no campo dos dados do MERGE/CPTEC (Figura 14a), o evento extremo foi caracterizado por acumulados superiores a 150 mm/dia, especialmente

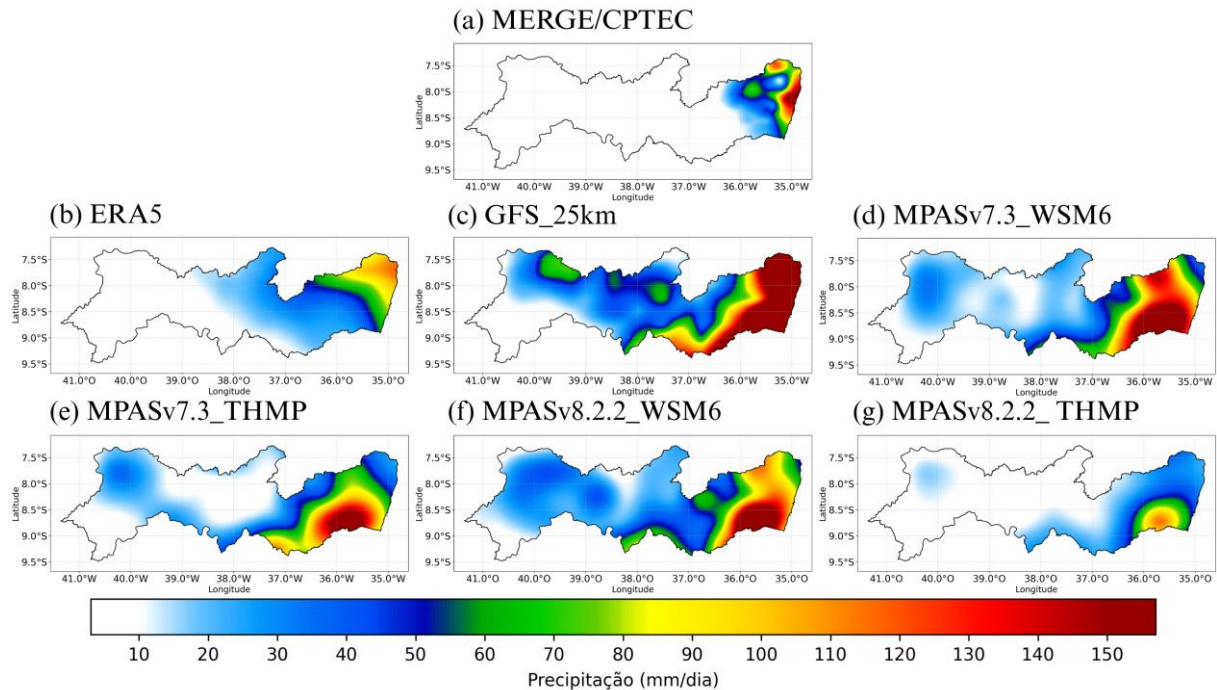
concentrados na faixa leste do estado, abrangendo a Região Metropolitana do Recife (RMR), a Zona da Mata Pernambucana e parte do Agreste próximo ao litoral. A reanálise ERA5 (Figura 14b), subestima a intensidade da precipitação, apresentando valores máximos entre 80 e 100 mm/dia e falha na representação da concentração do núcleo mostrando um padrão de precipitação mais espalhado e suavizado.

A simulação do GFS_25km (Figura 14c) apresenta uma superestimação da precipitação, com valores que ultrapassam 150 mm/dia no leste de Pernambuco, cobrindo uma área maior do que a do MERGE/CPTEC. O modelo reproduz razoavelmente bem a localização do núcleo, mas exagera na intensidade e na extensão da área chuvosa, gerando um campo que é mais amplo e mais intenso do que o representado pelo MERGE/CPTEC. O núcleo que, na observação, aparece restrito à faixa litorânea, é expandido pelo GFS em direção ao interior.

A simulações com MPASv7.3 os dois esquemas de parametrização apresentaram um núcleo de precipitação mais intenso no Sul da Zona da Mata Pernambucana e Agreste, evidenciando um núcleo fechado que atinge o norte de Alagoas. O esquema WSM6 (Figura 14d) apresenta uma variação maior da precipitação, embora não atinja os valores máximos do MERGE/CPTEC na RMR. A simulação com Thompson (Figura 14e) mostra uma faixa de chuva menos na costa da RMR com acumulados de 40 a 100 mm/dia, subestimando levemente a intensidade.

A versão MPASv8.2.2 do modelo apresenta diferenças maiores entre as parametrizações. O esquema WSM6 (Figura 15f) apresenta maiores acumulados na área como um do se comparado com os outros, com acumulados entre 70 e 140 mm/dia. Já a simulação com Thompson (Figura 15g) demonstra um desempenho inferior, com acumulados inferiores a 40 mm/dia na maior parte da faixa litorânea.

Figura 14 – Precipitação acumulada (mm/dia) em 28 de maio de 2022. Comparação entre a precipitação observada pelo MERGE/CPTEC (a) e ERA5 (b), GFS_25km (c), MPASv7.3_WSM6 (d), MPASv7.3_THMP (e), MPASv8.2.2_WSM6 (f) e MPASv8.2.2_THMP (g).

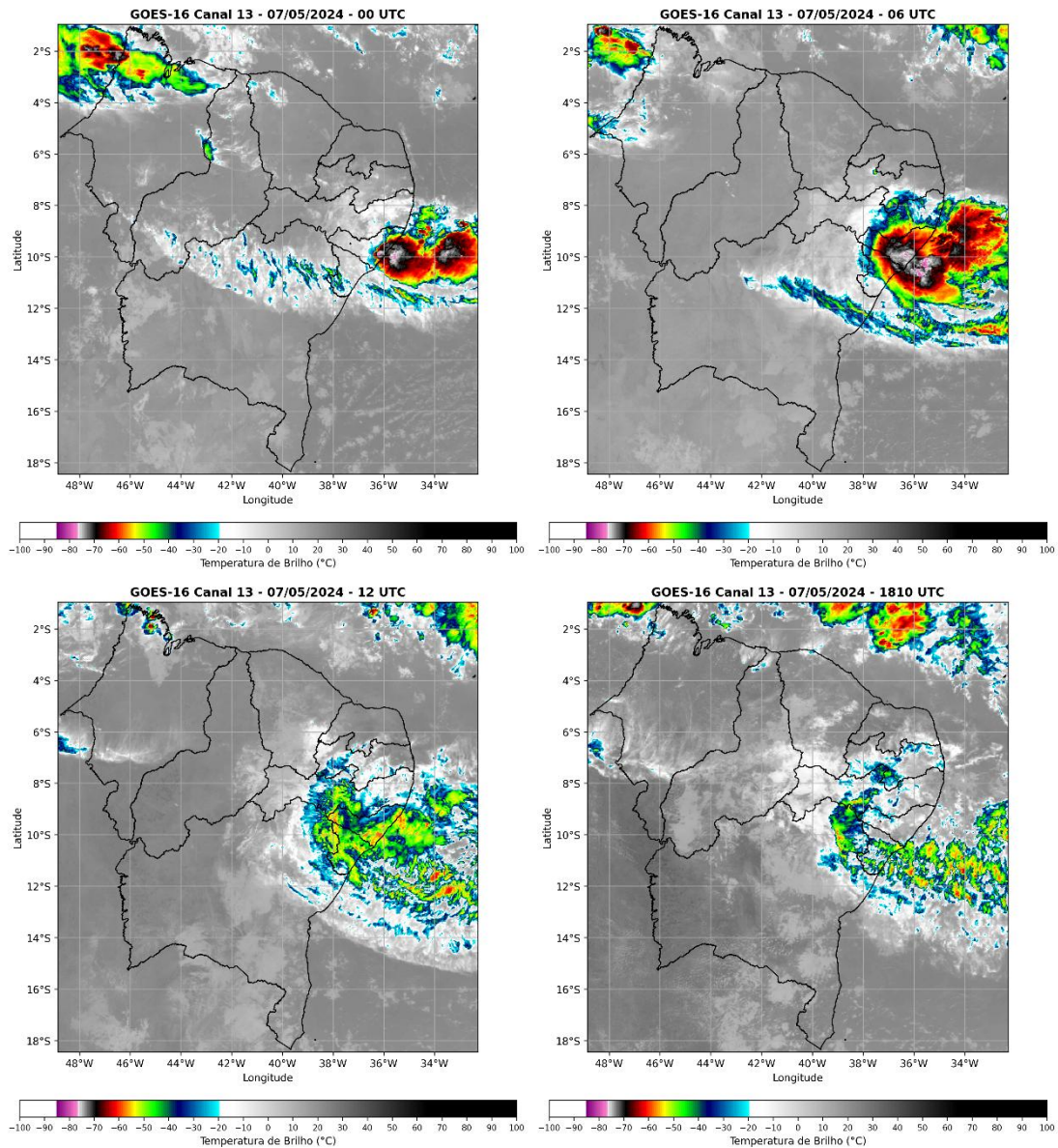


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.3 EPE3

Na figura 15, o sistema já se apresenta em formação sobre os estados de Sergipe e Alagoas às 00 UTC, exibindo um núcleo inicial com temperaturas de brilho (TB) extremamente baixas, inferiores a -80°C . O momento de maior desenvolvimento ocorre seis horas depois, às 06 UTC, quando o sistema demonstra uma maior intensificação em um núcleo com temperaturas de topo de nuvem extremamente frias sobre a região de Alagoas. A partir deste pico, o sistema entra em fase de enfraquecimento. Às 12 UTC, a imagem mostra o início da dissipação do sistema com mudança do núcleo intenso e as temperaturas do topo das nuvens entre -60°C e -70°C . Apesar do enfraquecimento, o sistema ainda cobre uma área extensa sobre Alagoas e o oceano adjacente. Finalmente, às 18:10 UTC, o sistema encontra-se em plena fase de dissipação, com apenas nuvens remanescentes e sem a presença de um núcleo frio organizado.

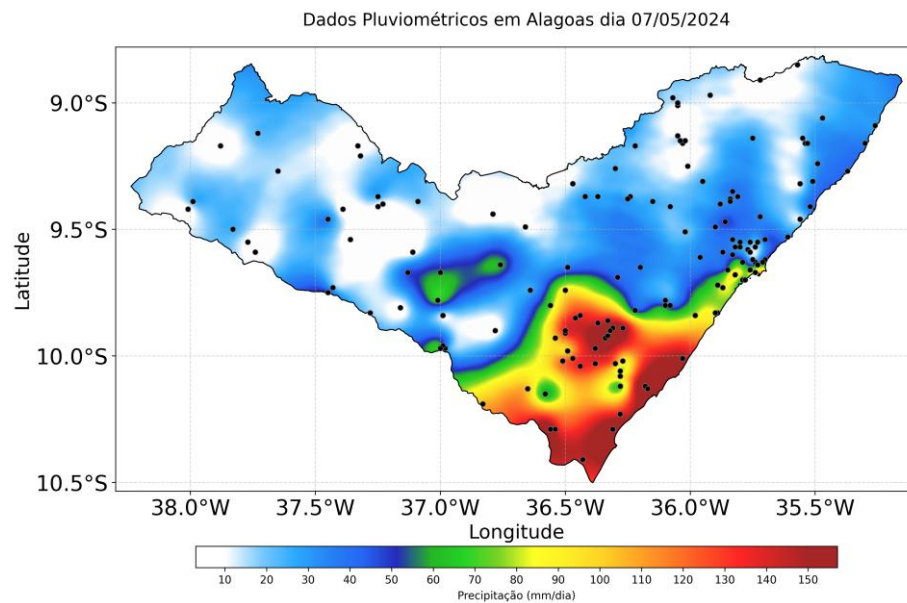
Figura 15 – Imagens do satélite GOES-16 no canal do infravermelho (banda 13) do sistema de 07 de maio de 2024 sobre o Nordeste do Brasil nos horários sinóticos de 00, 06, 12 e 18 UTC.



Fonte: CPTEC/INPE, adaptado pela autora (2025).

Na Figura 16 exibe a interpolação da precipitação acumulada em Alagoas para o dia 07/05/2024, a partir de 172 estações meteorológicas da SEMARH-AL. A partir da análise da figura, observa-se que a maior concentração de chuvas, com valores superiores a 100 mm/dia, está localizada na região sul do estado, abrangendo as sub-regiões do Litoral e do Agreste. Em cidades como Cururipe os acumulados ultrapassam 150 mm/dia. As chuvas diminuem em direção ao norte do estado, com acumulados abaixo de 50 mm/dia.

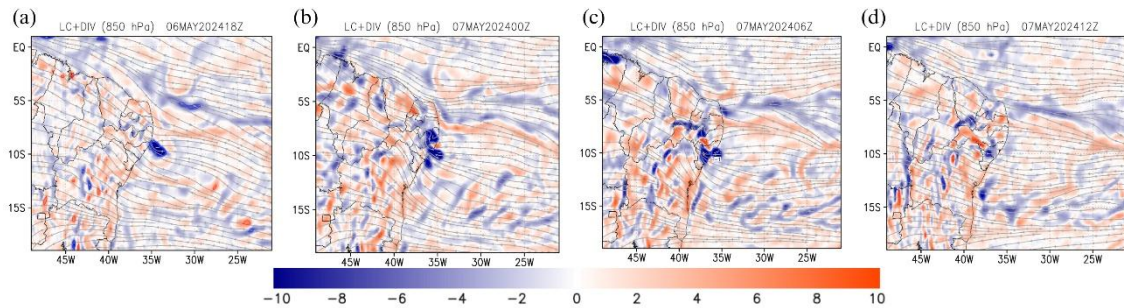
Figura 16 – Precipitação acumulada das estações meteorológicas para o EPE do dia 07/05/2024 em Alagoas.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Figura 17, mostra os campos de linha de corrente e divergência em 850 hPa para o EPE3. O cavado amadurece a leste da costa com eixo inicialmente entre 6 e 10°S e de 36 a 39°W e convergência a aproximadamente 200 a 300 km do litoral, próxima de 9 a 10°S e 36 a 37°W (Figura 17a). À meia-noite, o eixo avança para 35 a 37°W entre 8 e 10°S, com máximo convergente já junto ao litoral de Alagoas, em torno de 9,3 a 9,8°S e 35,4 a 35,9°W (Figura 17b). Às 6 UTC, o eixo praticamente cruza a linha de costa em 35 a 36°W e 8,5 a 10°S, mantendo convergência costeira persistente por volta de 9,5°S e 35,6°W (Figura 17c). Às 12 UTC, inicia-se atenuação e leve deslocamento do cavado para oeste ou noroeste, com eixo em 34,5 a 35,5°W e 8 a 10°S e sinal convergente ainda na faixa Alagoas e Pernambuco, próximo de 9 a 9,8°S e 34,8 a 35,4°W, porém mais difuso (Figura 17d). Assim como no EPE2, a progressão leste-oeste do cavado, a curvatura ciclônica e a maximização da convergência costeira quando o eixo se aproxima de 35 e 36°W constituem evidência clara da presença e atuação de um DOL em baixos níveis.

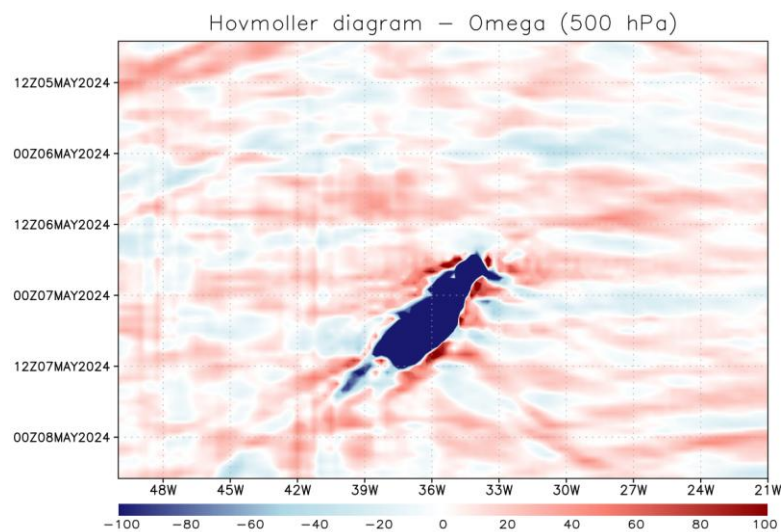
Figura 17 - Linha de corrente (m/s) e divergência (sombreada, $10^4/s$) em 850 hPa 06 de maio de 2024 às 18 (a) e 07 de maio de 2024 às 00 (b), 06 (c), 12 UTC (d) com os dados da reanálise ERA5.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para o EPE3, a figura 18 mostra o Hovmöller do ômega em 500 hPa em 10°S , é possível observar que o evento tem uma propagação diferente dos outros eventos, mas ainda se nota a propagação de leste para oeste, que se intensificam em entre $37-36^\circ\text{W}$ ao alcançar a costa, com pico em 07/05. Os valores de ômega na costa de Alagoas ficam entre -80 a -100 Pa/s. Após o pico, observa-se enfraquecimento e esgarçamento do sinal a partir de 08/05, compatível com a passagem do eixo da perturbação. A assinatura dinâmica é similar aos demais casos em que tem-se uma gênese oceânica, propagação de leste para oeste e o máximo junto à costa.

Figura 18 - Diagrama de Hovmöller de ômega (Pa/s; 500 hPa) entre 05 e 08 de maio a 10°S de latitude.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

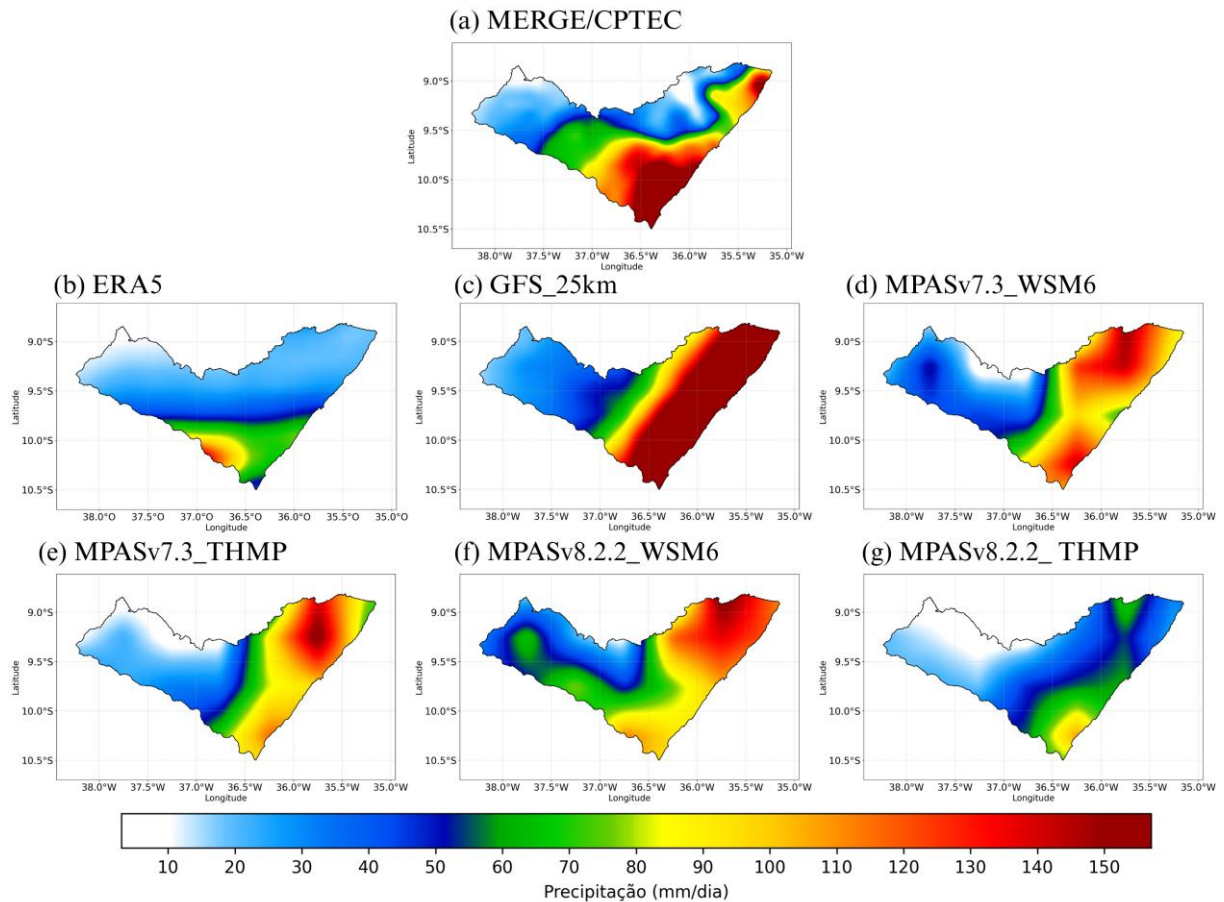
A Figura 19 apresenta a distribuição espacial da precipitação acumulada do dia 7 de maio de 2024. O MERGE/CPTEC (Figura 19a) apresenta um evento foi caracterizado por acumulados extremos ao longo da faixa litorânea sul e centro do estado, com valores superiores a 150 mm/dia, alcançando até 130 mm/dia nas proximidades de Maceió. A distribuição espacial da chuva indica um núcleo concentrado e bem definido sobre o litoral, evidenciando um episódio de convecção intensa.

A reanálise ERA5 (Figura 19b) subestima a intensidade da precipitação e não reproduz o núcleo observado. Os maiores acumulados não ultrapassam 90 mm/dia. O campo simulado pelo ERA5 não evidencia o evento extremo registrado e desloca o núcleo para o interior. Na Figura do GFS_25km (Figura 19c) observa-se que o modelo simula um acumulado de precipitação bem definido sobre o litoral e parte do Agreste de Alagoas, com valores máximos acima de 150 mm/dia, superestimando a intensidade da precipitação em algumas regiões, mas reproduz a localização do núcleo chuvoso.

As simulações com o MPASv7.3 mostram uma divisão no volume de precipitação, que começa mais intenso na costa e vai diminuindo ao entrar mais no interior do estado, similar ao GFS, mas com volumes de precipitação menores. O WSM6 (Figura 19d) apresenta acumulados de 140 mm/dia, com máxima bem localizada sobre o litoral sul, reproduzindo parcialmente o núcleo observado. No entanto, a área de maior precipitação aparece mais extensa do que no MERGE/CPTEC, mesmo não sendo mais intensa. O esquema Thompson (Figura 19e), apresenta uma mancha de precipitação mais restrita no entorno da região do evento, com máximos entre 110 mm/dia, representando a precipitação, mas subestimando sua intensidade.

Na versão do modelo MPASv8.2.2 apresenta uma maior divergência entre as duas parametrizações. A simulação com WSM6 (Figura 19f) apresenta valores próximos a 150 mm/dia sobre o litoral norte, mas com precipitações entre 90 mm/dia no entorno do evento. Já o Thompson (Figura 19g) mostra distribuição com volumes menores em toda a extensão do estado, no entanto há um núcleo na mesma localização do MERGE/CPTEC, embora não atinja os valores máximos registrados.

Figura 19 – Precipitação acumulada (mm/dia) em 07 de maio de 2024. Comparação entre a precipitação observada pelo MERGE/CPTEC (a) e ERA5 (b), GFS_25km (c), MPASv7.3_WSM6 (d), MPASv7.3_THMP (e), MPASv8.2.2_WSM6 (f) e MPASv8.2.2_THMP (g).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Essa diferença entre o modelo e o observado contrasta com os resultados de Lyra et al. (2024), que obtiveram simulações mais satisfatórias para outros eventos extremos de precipitação na mesma região dos casos 1 e 3, utilizando o MPAS. A dificuldade em simular a intensidade e localização do evento pode estar mais ligada à escolha do conjunto geral de parametrizações do que à microfísica. A performance inferior do conjunto de convection-permitting levanta a hipótese de que o conjunto de Mesoscale seja mais adequada para a previsão de eventos extremos na costa leste do NEB. Bem como, a dinâmica dos sistemas meteorológicos de cada caso pode ter apresentado desafios para o modelo que não estavam presentes nos eventos analisados por Lyra et al, (2024).

O terceiro caso, mostrado na Figura 20, corresponde a um evento de maior intensidade associado à convecção profunda. O GFS_25km (Figura 20a) volta a apresentar subestimação predominante, especialmente no norte do litoral e no interior de Alagoas, com apenas uma pequena área no litoral sul, coincidente com parte do evento, com valores próximos de zero. Apesar disso, a subestimação atinge no máximo -20 mm/dia, o que representa um desempenho relativamente melhor do que nas regiões superestimadas, que ultrapassaram 80 mm/dia.

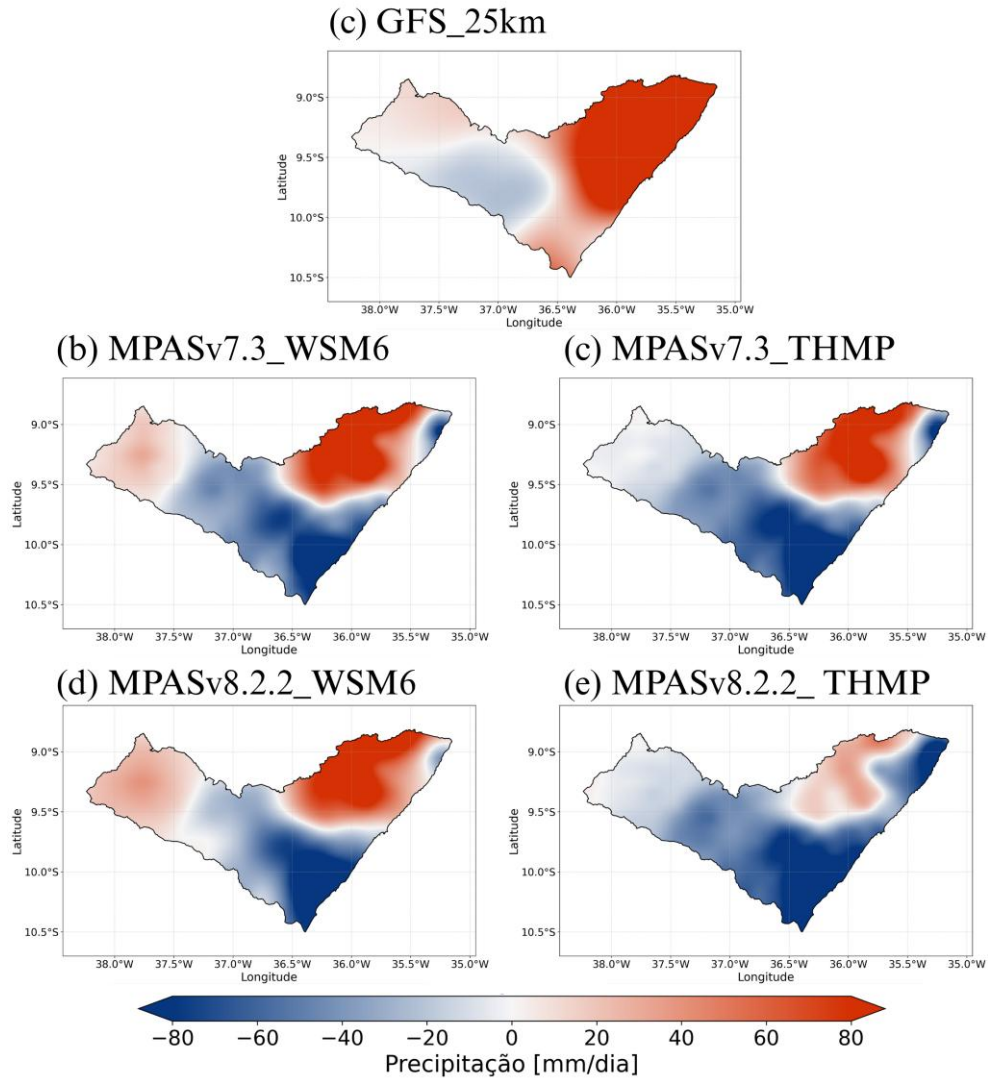
Na simulação com o MPASv7.3 e WSM6 (Figura 20b), há uma redução os valores do BIAS, embora apresente áreas de superestimação significativa na faixa centro-leste. No litoral centro-sul, o modelo volta a subestimar fortemente, com valores inferiores a -80 mm/dia. O esquema Thompson (Figura 20c) exhibe padrão similar ao WSM6, com diferenças pontuais na subregião do sertão Alagoano, onde o WSM6 superestima e o Thompson tende a subestimar. Porém, destaca-se a região próxima à capital, onde o viés se aproxima de zero.

As simulações com o MPASv8.2.2 mantêm o padrão geral de desempenho. Com WSM6 (Figura 20d), observa-se pouca diferença em relação à versão anterior. Já com Thompson (Figura 20e), há uma melhora perceptível na distribuição do BIAS, principalmente na área anteriormente superestimada, que agora apresenta valores entre 0 e 20 mm/dia. Ainda assim, todas as simulações do MPAS, mesmo na versão mais recente, subestimam a precipitação na região centro-sul do estado, local associada ao núcleo do evento.

No geral, o GFS_25km apresentou desempenho inferior nos três casos analisados, com subestimação nos EPE 1 e 3, e superestimação acentuada no EPE2, falhando em representar adequadamente os núcleos de precipitação intensa. Enquanto o MPASv7.3, especialmente com o esquema Thompson, mostrou avanços em relação ao GFS, com redução do BIAS e maior fidelidade à distribuição observada, mas ainda com limitações evidentes na região do evento principal, como em Maceió e Recife.

A atualização para o MPASv8.2.2 contribuiu para melhorar significativamente a distribuição espacial do BIAS, com destaque para o uso do esquema Thompson, que proporcionou maior homogeneidade, redução de extremos e melhor representação dos eventos. Mesmo nas melhores simulações, ainda ocorrem subestimações persistentes nas regiões centrais e costeiras do domínio, especialmente nos locais onde se concentraram os eventos extremos, evidenciando que há espaço para ajustes nos parâmetros físicos ou na resolução espacial.

Figura 20 – BIAS da precipitação do EPE3 entre o MERGE/CPTEC e as simulações do GFS_25km (a), MPASv7.3 WSM6 (b), MPASv7.3_THMP (c), MPASv8.2.2 WSM6 (d) e MPASv8.2.2_THMP (e).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

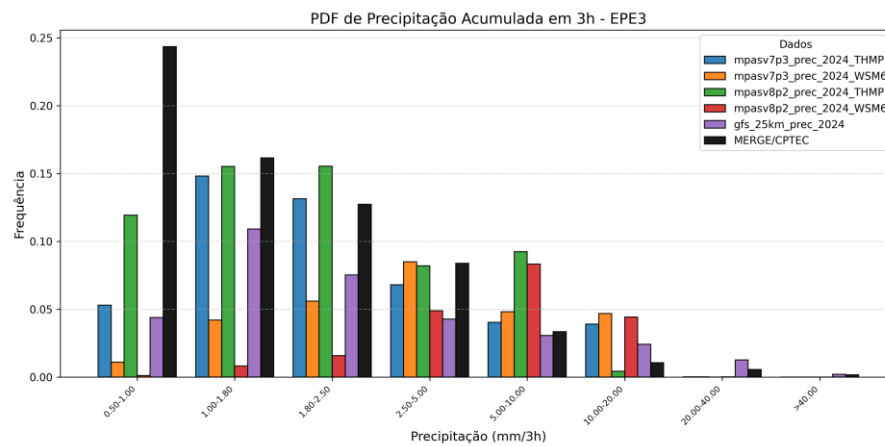
O EPE3 (Figura 21) caracteriza-se pela ocorrência de eventos extremos de precipitação, com acumulados superiores a 30 mm em 3 horas. A curva do MERGE/CPTEC apresenta uma distribuição com cauda longa, evidenciando a ocorrência desses eventos de alta magnitude. Nenhum dos modelos foi capaz de reproduzir de forma satisfatória essa característica.

A simulação MPASv8.2.2_THMP, embora tenha mantido alguma coerência com os bins intermediários (10-20 mm), falhou em simular adequadamente os extremos, com queda abrupta da frequência após 25 mm. As simulações MPASv7.3_THMP e MPASv8.2.2_WSM6

foram ainda mais diferentes, com concentração da densidade em acumulados inferiores a 10 mm e ausência de eventos mais extremos, como já foi observado nas distribuições espaciais da precipitação. O modelo GFS, por sua vez, apresentou desempenho inferior, limitando sua distribuição a acumulados fracos e moderados.

Esse comportamento comum entre os modelos evidencia uma dificuldade sistemática em representar a física associada a convecção profunda e precipitação extrema. A resolução dos modelos e a escolha do esquema microfísico impactam diretamente esses resultados, sendo o esquema THPM aquele que mais se aproximou da observação, embora ainda com limitações relevantes.

Figura 21 – Funções de densidade de probabilidade (PDFs) do acumulado de 3 h da precipitação para o EPE3.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os resultados do PDF indicam que a simulação MPASv8.2.2 com o esquema de microfísica das nuvens Thompson apresentou o melhor desempenho relativo entre as simulações, especialmente na representação de eventos moderados a intensos. A combinação MPASv8.2_WSM6 mostrou-se limitada, com viés consistente em favor de chuvas fracas. O modelo GFS, apesar de sua relevância operacional, apresentou desempenho inferior nos três casos, especialmente na representação de eventos extremos. Em contrapartida, em um estado de precipitação extrema para China Oriental, Zhao et al. (2019) apresentaram uma análise de microfísica das nuvens no modelo MPAS-A. Na análise PDF realizada pelos autores, os esquemas de microfísica, especialmente em resoluções variáveis de 60-4 km, tiveram como resultados que o esquema Thompson tendendo a superestimar a frequência e intensidade dos eventos mais extremos em comparação com o WSM6.

De forma geral, as PDFs dos três eventos mostram um padrão consistente em que o MPAS v8.2.2 com Thompson apresentou o melhor desempenho, sobretudo na faixa de precipitações moderadas, enquanto o WSM6 concentrou frequência em chuva fraca e o GFS manteve desempenho inferior nos acumulados mais altos. Observa-se, porém, uma dificuldade em representar a cauda direita (≥ 25 –30 mm em 3 h) em todos os modelos, indicando limitações na representação da convecção profunda. Nenhuma configuração capturou adequadamente os extremos mais intensos, reforçando a necessidade de novas investigações e ajustes no modelo.

4.4 Validação dos EPE

A Tabela 3 apresenta uma avaliação quantitativa do desempenho das simulações do modelo numérico MPAS nas versões 7.3 e 8.2.2 e as parametrizações de microfísica de nuvens de WSM6 e Thompson, além do modelo GFS com resolução de 25 km, aplicadas a três eventos extremos de precipitação. A comparação com os dados do MERGE/CPTEC foi feita por meio de três métricas estatísticas: o BIAS (viés), que indica a tendência sistemática de superestimação ou subestimação; o RMSE, que mede a magnitude geral dos erros; e o CC, que avalia a capacidade do modelo em reproduzir o padrão espacial e temporal do fenômeno observado.

No evento de 27 de maio de 2017, observa-se que todas as simulações com o MPAS apresentaram superestimação da precipitação, com destaque para a configuração MPASv8.2.2 com WSM6, que registrou o maior BIAS de 87,16 mm/dia e RMSE de 105,82 mm/dia. Em contrapartida, a simulação com Thompson nessa mesma versão do modelo reduziu substancialmente os erros sistemáticos, com BIAS de 32,52 mm/dia e RMSE de 60,08 mm/dia, apresentando o segundo melhor desempenho em termos de magnitude. Apesar disso, o maior coeficiente de correlação de 0,49 foi obtido com o MPASv7.3 com WSM6, indicando melhor correspondência espacial com o campo observado. Ainda assim, esse valor de correlação não é alto, refletindo a dificuldade do modelo em representar a distribuição espacial da precipitação neste caso, possivelmente devido à natureza caótica do evento e à predominância de processos convectivos de pequena escala.

Para o evento de 28 de maio de 2022, houve uma melhoria geral no desempenho das simulações. A versão MPASv8.2.2 com Thompson destacou-se por apresentar os menores valores de BIAS de 6,92 mm/dia e RMSE de 30,23 mm/dia, indicando uma aproximação bastante satisfatória entre os campos simulados e observados. O WSM6, nesta mesma versão do modelo, também apresentou resultados consistentes, com RMSE de 55,44 mm/dia e o maior

CC do caso de 0,45, sugerindo uma boa representação da estrutura espacial da precipitação, embora ainda com superestimação em relação ao observado. O modelo GFS mostrou desempenho inferior, com BIAS de 77,63 mm/dia e RMSE de 128,07 mm/dia, o que indica uma superestimação acentuada do evento e erros generalizados de maior magnitude.

O evento de 7 de maio de 2024 foi o melhor representado entre os três analisados. A simulação com o MPASv8.2.2 utilizando o esquema Thompson apresentou o melhor desempenho geral, com BIAS de -36,60 mm/dia, RMSE de 56,41 mm/dia e coeficiente de correlação de 0,75, o maior entre todas as simulações realizadas. Embora o valor negativo do BIAS indique uma tendência de subestimação, como já foi visto na distribuição espacial. O GFS apresentou valores extremamente altos de BIAS de 130,24 mm/dia e RMSE de 159,42 mm/dia, reforçando uma superestimação do evento extremo região, mesmo tendo alcançado um CC de 0,64. Já a configuração MPASv7.3 com WSM6 apresentou BIAS próximo de zero de -3,06 mm/dia, com RMSE de 57,28 mm/dia e CC de 0,33, confirmando uma performance aceitável, porém inferior à versão mais recente do modelo.

Tabela 3 – Métricas estatísticas de precipitação acumulada (mm/dia) para cada evento.

	EPE1 (27/05/2017)			EPE2 (28/05/2022)			EPE3 (07/05/2024)		
	BIAS	RMSE	CC	BIAS	RMSE	CC	BIAS	RMSE	CC
GFS_25km	2,37	21,21	0,15	77,63	128,07	0,28	130,24	159,42	0,64
MPASv7.3_WSM6	73,76	94,81	0,49	35,34	61,27	0,44	-3,06	57,28	0,33
MPASv7.3_THMP	41,19	69,89	0,26	26,01	52,23	0,28	-13,60	60,45	0,31
MPASv8.2.2_WSM6	87,16	105,82	0,14	35,61	55,44	0,45	1,90	60,28	0,18
MPASv8.2.2_THMP	32,52	60,08	0,21	6,92	30,23	0,38	-36,60	56,41	0,75

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo avaliar a sensibilidade do modelo atmosférico MPAS na simulação de três eventos extremos de precipitação associados aos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs), ocorridos em 2017, 2022 e 2024 na costa leste do Nordeste do Brasil. Foram realizadas simulações com duas versões do modelo (v7.3 e v8.2.2), empregando uma grade de resolução variável centrada nas regiões afetadas, além de dois esquemas distintos de microfísica de nuvens (WSM6 e Thompson), sob a configuração convection-permitting. Os resultados foram comparados aos dados do produto MERGE/CPTEC, à reanálise ERA5 e às previsões do modelo GFS, e validados por meio de métricas estatísticas como BIAS, RMSE e coeficiente de correlação (CC), além da análise da distribuição espacial e probabilísticas.

As simulações mostraram que o MPAS foi capaz de representar alguns dos padrões espaciais dos núcleos de precipitação intensa, com melhor desempenho na versão 8.2.2, especialmente quando utilizado o esquema de microfísica Thompson. A versão 8.2.2 com o Thompson foi a configuração que apresentou os melhores resultados no evento de 2024, alcançando um coeficiente de correlação de 0,75. Entretanto, ainda foram observadas limitações, como a tendência de superestimação em eventos como o de 2017 e subestimação em áreas pontuais, especialmente com o esquema WSM6.

Além das métricas tradicionais, as funções de densidade de probabilidade (PDFs) permitiram uma análise mais detalhada do comportamento estatístico das simulações frente aos dados observados. A análise dos PDFs mostrou que o modelo MPAS v8.2.2 com Thompson apresentou uma distribuição mais próxima à observada em todos os casos, com menor dispersão nos valores extremos e melhor representação da frequência de precipitações intensas. Por outro lado, o GFS demonstrou maior concentração em valores extremos, indicando superestimação das chuvas fortes, enquanto o MPAS com WSM6 apresentou maior assimetria nas distribuições, evidenciando instabilidades na representação dos extremos.

Apesar de os resultados estatísticos oferecerem uma avaliação quantitativa clara do desempenho do modelo, a análise da distribuição espacial da precipitação revelou nuances importantes que não são totalmente captadas pelos índices tradicionais. Em alguns casos, observou-se que as simulações do MPAS, especialmente com o esquema WSM6, apresentaram valores de BIAS e RMSE elevados, o que poderia sugerir uma baixa performance. No entanto, ao analisar os campos espaciais de precipitação, notou-se que o modelo foi capaz de representar adequadamente a localização dos principais núcleos convectivos e a extensão das áreas afetadas, mesmo quando a intensidade dos acumulados foi superestimada. De forma

semelhante, em simulações com baixo BIAS, como no caso do Thompson em 2024, a intensidade média foi subestimada, mas a estrutura espacial da chuva foi bem reproduzida, com um núcleo principal posicionado corretamente sobre a faixa litorânea. Essa divergência ressalta a importância de uma análise integrada, em que a avaliação visual da distribuição espacial complementa os dados estatísticos, fornecendo uma visão mais completa sobre a capacidade do modelo de capturar as características físicas do evento.

De forma geral, conclui-se que o modelo MPAS, principalmente na versão mais recente com esquema microfísico mais complexo, apresenta elevado potencial para simular eventos extremos de precipitação no NEB. O estudo demonstrou a importância da escolha adequada das parametrizações físicas, da resolução espacial e da análise estatística integrada para aumentar a confiabilidade de previsões em regiões vulneráveis a desastres causados por eventos extremos de precipitação. Contudo, reforça-se a necessidade de continuidade de estudos que explorem a calibração do modelo, uso de outros conjuntos de parametrizações, outras resoluções variáveis e uniformes, além de avaliações do impacto da qualidade das condições iniciais usadas na previsão dos eventos extremos.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- BERRY, Frederic Aroyce et al. (Ed.). Handbook of meteorology. New York: McGraw-Hill, 1945.
- COUTINHO, Eliane de Castro; FISCH, Gilberto. Distúrbios ondulatórios de leste (DOLs) na região do Centro de Lançamento de Alcântara-MA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, p. 193-203, 2007.
- DE SOUSA, Francisco de Assis Salviano et al. Estimativas dos riscos de chuvas extremas nas capitais do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 2, p. 430-439, 2016.
- 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.
- FEDOROVA, Natalia; LEVIT, Vladimir (Ed.). Adverse meteorological phenomena in Northeast Brazil. Cambridge: Cambridge Scholars Publishing, 2023.
- FEDOROVA, Natalia; LEVIT, Vladimir; DA CRUZ, Cezar Duarte. On frontal zone analysis in the tropical region of the Northeast Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 173, n. 4, p. 1403-1421, 2016.
- FISCHER, Erich M.; KNUTTI, Reto. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 6, p. 560-564, 2015.
- G1 ALAGOAS. Chuva provoca alagamentos e queda de árvores em Maceió. **G1 Alagoas**, 07 maio 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2024/05/07/videos-mostram-alagamentos-provoados-pela-chuva-em-maceio-inmet-emite-alertas-para-regioes-de-al.ghml>. Acesso em: 28 out. 2024.
- G1 ALAGOAS. Chuvas causam 4 mortes em Maceió e cidade decreta estado de calamidade pública. **G1 Alagoas**, 27 maio 2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/chuvas-fortes-causam-deslizamentos-de-barreiras-e-deixam-mortos-e-feridos-em-maceio.ghml>. Acesso em: 28 out. 2024.
- G1 PERNAMBUCO. Dois anos após tragédia das chuvas com 133 mortos, mais de 2 mil pessoas ainda não voltaram para casa. **G1 Pernambuco**, 28 maio 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2024/05/28/dois-anos-apos-tragedia-das-chuvas-com-133-mortos-mais-de-2-mil-pessoas-ainda-nao-voltaram-para-casa.ghml>. Acesso em: 28 out. 2024.
- GILLIAM, Robert C. et al. Establishing the suitability of the model for prediction across scales for global retrospective air quality modeling. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 126, n. 10, p. e2020JD033588, 2021.
- GOMES, Helber B. et al. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. **Climate Dynamics**, v. 53, p. 1393-1411, 2019.

GOMES, Helber Barros et al. Easterly wave disturbances over Northeast Brazil: An observational analysis. **Advances in Meteorology**, v. 2015, n. 1, p. 176238, 2015.

GRELL, Georg A.; FREITAS, Saulo R. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 10, p. 5233-5250, 2014.

GÜRER, Kemal et al. The evaluation of global and regional applications of Model for Prediction Across Scales-Atmosphere (MPAS) against Weather Research Forecast (WRF) model over California for a winter (2013 DISCOVER-AQ) and summer (2016 CABOTS) episode. **Atmosphere**, v. 15, n. 10, p. 1248, 2024.

HEINZELLER, Dominikus; DUDA, Michael G.; KUNSTMANN, Harald. Towards convection-resolving, global atmospheric simulations with the Model for Prediction Across Scales (MPAS) v3.1: An extreme scaling experiment. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 1, p. 77-110, 2016.

HERDIES, Dirceu L. et al. Moisture budget of the bimodal pattern of the summer circulation over South America. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. D20, p. LBA 42-1-LBA 42-10, 2002.

HERSBACH, Hans et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.

HONG, Song-You; DUDHIA, Jimmy; CHEN, Shu-Hua. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. **Monthly Weather Review**, v. 132, n. 1, p. 103-120, 2004.

HONG, Song-You; LIM, Jeong-Ock Jade. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 42, n. 2, p. 129-151, 2006.

HUFFMAN, George J. et al. NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG). Algorithm theoretical basis document (ATBD) version, v. 4, n. 26, p. 2020-05, 2015.

IACONO, Michael J. et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 113, n. D13, 2008.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas de população para 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 8 mar. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter11.pdf. Acesso em: 16 jun. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Summary Volume. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em:

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryVolume.pdf. Acesso em: 16 jun. 2024.

KOUSKY, Vernon E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.

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

KRAMER, Matthijs et al. Assessment of MPAS variable resolution simulations in the grey-zone of convection against WRF model results and observations: An MPAS feasibility study of three extreme weather events in Europe. **Climate Dynamics**, v. 55, n. 1, p. 253-276, 2020.

KUNKEL, Kenneth E. et al. Monitoring and understanding trends in extreme storms: State of knowledge. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 94, n. 4, p. 499-514, 2013.

LI, Jianduo et al. Global evaluation of the Noah-MP land surface model and suggestions for selecting parameterization schemes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 127, n. 5, p. e2021JD035753, 2022.

LIU, Zhiquan et al. Data assimilation for the Model for Prediction Across Scales–Atmosphere with the Joint Effort for Data assimilation Integration (JEDI-MPAS 1.0.0): EnVar implementation and evaluation. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 2022, p. 1-33, 2022.

LIU, Zijun et al. Global variable-resolution simulations of extreme precipitation over Henan, China, in 2021 with MPAS-Atmosphere v7.3. **Geoscientific Model Development**, v. 17, n. 14, p. 5477-5496, 2024.

LYRA, Matheus J. A.; FEDOROVA, Natalia; LEVIT, Vladimir. Mesoscale convective complexes over northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 118, p. 103911, 2022.

LYRA, Matheus JA et al. Synoptic patterns of extreme precipitation events in Northeast Brazil. **Natural Hazards**, v. 121, n. 6, p. 7511-7531, 2025.

LYRA, Matheus José Arruda et al. Extreme precipitation events over the east coast of northeast Brazil: Synoptic study and MPAS simulation. **Weather and Climate Extremes**, v. 45, p. 100711, 2024.

LYRA, Matheus José Arruda et al. Ligação entre extremidade frontal e zona de convergência intertropical sobre a região Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 413-424, 2019.

LYRA, Matheus José Arruda; ARRAUT, Josefina Moraes; DE SOUZA, Enio Pereira. Alteration in the large-scale circulation of South America triggered by the upper-tropospheric cyclonic vortices of Northeast Brazil. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, p. 101582, 2025.

MARENGO, José Antônio et al. Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. **Weather and Climate Extremes**, v. 39, p. 100545, 2023.

MARTINEZ-VILLALOBOS, Cristian; NEELIN, J. David. Climate models capture key features of extreme precipitation probabilities across regions. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 2, p. 024017, 2021.

NAKANISHI, Mikio; NIINO, Hiroshi. An improved Mellor–Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 119, p. 397-407, 2006.

NAKANISHI, Mikio; NIINO, Hiroshi. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. **Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II**, v. 87, n. 5, p. 895-912, 2009.

NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH (NCAR). MPAS Atmosphere User's Guide: Version 8.2.0. Boulder, CO: NCAR, 2023. Disponível em: https://www2.mmm.ucar.edu/projects/mpas/mpas_atmosphere_users_guide_8.2.0.pdf. Acesso em: 1 set. 2024.

NIU, Guo-Yue et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 116, n. D12, 2011.

NOAA. Advanced Baseline Imager (ABI) Band 13 (10.3 μm) – Clean Longwave Window: Quick Information Guide. Washington, DC: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2018. Disponível em: https://www.star.nesdis.noaa.gov/GOES/documents/ABIQuickGuide_Band13.pdf. Acesso em: 15 mar. 2025.

NÚÑEZ OCASIO, K. M.; RIOS-BERRIOS, Rosimar. African easterly wave evolution and tropical cyclogenesis in a pre-Helene (2006) Hindcast using the Model for Prediction Across Scales-Atmosphere (MPAS-A). **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 15, n. 2, p. e2022MS003181, 2023.

O'GORMAN, Paul A.; SCHNEIDER, Tapio. The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 35, p. 14773-14777, 2009.

OLIVEIRA, Fernando P.; OYAMA, Marcos D. Squall-line initiation over the northern coast of Brazil in March: Observational features. **Meteorological Applications**, v. 27, n. 1, p. e1799, 2020.

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

OLMO, Matías; BETTOLLI, María Laura; RUSTICUCCI, Matilde. Atmospheric circulation influence on temperature and precipitation individual and compound daily extreme events: Spatial variability and trends over southern South America. **Weather and Climate Extremes**, v. 29, p. 100267, 2020.

PEZZI, Luciano P. et al. The effect of Oceanic South Atlantic Convergence Zone episodes on regional SST anomalies: the roles of heat fluxes and upper-ocean dynamics. **Climate Dynamics**, v. 59, n. 7, p. 2041-2065, 2022.

QUADRO, Mario Francisco Leal de et al. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 152-162, 2012.

RAYMOND, Colin et al. Understanding and managing connected extreme events. **Nature Climate Change**, v. 10, n. 7, p. 611-621, 2020.

- RIEHL, Herbert et al. Tropical meteorology. New York: McGraw-Hill, 1954.
- ROZANTE, José Roberto et al. Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. 3, p. 885-894, 2010.
- ROZANTE, José Roberto et al. Performance of precipitation products obtained from combinations of satellite and surface observations. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 19, p. 7585-7604, 2020.
- SCHMIT, Timothy J. et al. A closer look at the ABI on the GOES-R series. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 4, p. 681-698, 2017.
- SCHNEIDER, Tapio; BISCHOFF, Tobias; HAUG, Gerald H. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. **Nature**, v. 513, n. 7516, p. 45-53, 2014.
- SKAMAROCK, William C. et al. A multiscale nonhydrostatic atmospheric model using centroidal Voronoi tessellations and C-grid staggering. **Monthly Weather Review**, v. 140, n. 9, p. 3090-3105, 2012.
- SKAMAROCK, William C. et al. Atmospheric kinetic energy spectra from global high-resolution nonhydrostatic simulations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 71, n. 11, p. 4369-4381, 2014.
- SOUZA, Werônica Meira; DE AZEVEDO, Pedro Vieira; DE ARAÚJO, Lincoln Eloi. Classificação da precipitação diária e impactos decorrentes dos desastres associados às chuvas na cidade do Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 2, p. 250-268, 2012.
- THOMPSON, Gregory et al. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme, Part II: Implementation of a new snow parameterization. **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 12, p. 5095-5115, 2008.
- UTIDA, Giselle et al. Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1698, 2019.
- WILKS, Daniel S. Statistical methods in the atmospheric sciences. Academic Press, 2011.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Guidelines on the definition and characterization of extreme weather and climate events. 2023.
- XU, Kuan-Man; RANDALL, David A. A semiempirical cloudiness parameterization for use in climate models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 53, n. 21, p. 3084-3102, 1996.
- XU, Mingyue et al. Convection-permitting hindcasting of diurnal variation of Mei-yu rainfall over East China with a global variable-resolution model. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 126, n. 14, p. e2021JD034823, 2021.
- XU, Mingyue et al. Modeling across scales of heavy precipitation with a global variable-resolution model: A case study of a catastrophic event in China. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 129, n. 19, p. e2024JD041180, 2024.
- ZHAO, Chun et al. Modeling extreme precipitation over East China with a global variable-resolution modeling framework (MPASv5.2): Impacts of resolution and physics. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 7, p. 2707-2726, 2019.