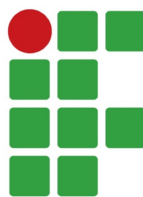


INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

GERSON LUIZ CAMILLO

**IMPACTO DAS PARAMETRIZAÇÕES DE MICROFÍSICA E DE CAMADA LIMITE
PLANETÁRIA NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM EVENTO DE PRECIPITAÇÃO
EXTREMA NO OESTE DE SANTA CATARINA**



**INSTITUTO
FEDERAL**
Santa Catarina

FLORIANÓPOLIS - SC, Agosto/2025

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE SAÚDE E SERVIÇO
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM CLIMA E AMBIENTE**

GERSON LUIZ CAMILLO

**IMPACTO DAS PARAMETRIZAÇÕES DE MICROFÍSICA E DE CAMADA LIMITE
PLANETÁRIA NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM EVENTO DE PRECIPITAÇÃO
EXTREMA NO OESTE DE SANTA CATARINA**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Clima e Ambiente do Campus Florianópolis do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Mestre em Clima e Ambiente.

Orientador:
Prof. Dr. Dirceu Luis Herdies

FLORIANÓPOLIS - SC, Agosto/2025

CDD 551.69

C183i

Camillo, Gerson Luiz

Impacto das parametrizações de microfísica e de camada limite planetária na simulação numérica de um evento de precipitação extrema no oeste de Santa Catarina [DIS] / Gerson Luiz Camillo; orientação de Dirceu Luis Herdies – Florianópolis, 2025.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Clima e Ambiente) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Esquemas de microfísica. 2. WRF. 3. Esquemas de camada limite planetária. 4. Eventos extremos. 5. Santa Catarina. I. Herdies, Dirceu Luis. II. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC

Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis

Catalogado por: Ana Paula F. Rodrigues - CRB 14/1117



Folha de Aprovação

Aluno: Gerson Luiz Camillo

Título:	<i>ESTUDO DE CASO DE EVENTO DE LINHA DE TEMPESTADE NO OESTE E CENTRO DE SANTA CATARINA EM 14/08/2020 QUANTO AO IMPACTO DAS PARAMETRIZAÇÕES DE MICROFÍSICA E DE CAMADA LIMITE PLANETÁRIA NA SIMULAÇÃO DE EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO USANDO O MODELO WRF</i>
----------------	---

Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Clima e Ambiente

Dr. Dirceu Luís Herdies

Documento assinado digitalmente
gov.br DIRCEU LUIS HERDIES
Data: 27/06/2025 14:34:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador / Presidente / IFSC / Florianópolis – SC

Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência

☒ Aprovado ☐ Reprovado

Dr. Mário Francisco Leal de Quadro

Documento assinado digitalmente
gov.br MARIO FRANCISCO LEAL DE QUADRO
Data: 30/06/2025 12:40:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador Interno / IFSC / Florianópolis - SC

Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência

☒ Aprovado ☐ Reprovado

Dr. Cássio Aurélio Suski

Documento assinado digitalmente
gov.br CASSIO AURELIO SUSKI
Data: 27/06/2025 15:50:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador Interno / IFSC / Itajaí - SC

Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência

☒ Aprovado ☐ Reprovado

Dr. Helber Barros Gomes

Documento assinado digitalmente
gov.br HELBER BARROS GOMES
Data: 27/06/2025 15:11:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador Externo / UFAL / Maceió - SC

Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência

☒ Aprovado ☐ Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

☐ maioria simples

☒ unanimidade

Florianópolis, 25 de junho de 2025



AGRADECIMENTOS

O Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) que proporcionou a possibilidade de adquirir conhecimentos no curso do Mestrado em Clima e Ambiente que são de suma importância para entender um pouco da dinâmica dos sistemas naturais nos quais vivemos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (PCAM) do IFSC.

Aos colegas da turma de 2021.

Ao Professor Doutor Mário Francisco Leal de Quadro, pela sua dedicação e por estar sempre disponível.

Ao meu orientador, o Professor Doutor Dirceu Luis Herdies, pela paciência, profissionalismo, conhecimento e pelo incentivo constante.

À minha família.

RESUMO

Extremos de tempo e de clima, conforme a *World Meteorological Organization* (WMO), constituem eventos raros em determinado lugar e tempo, com características não usuais em termos de magnitude, localização, duração temporal ou extensão geográfica. As tempestades são eventos convectivos que atuam isoladamente ou em forma de sistemas e que podem originar uma série de fenômenos meteorológicos severos, como, precipitação intensa, granizo, tornados, ventos fortes, rajadas e relâmpagos. Os fenômenos associados à convecção intensa estão na origem da maior parte dos danos e perdas relativos a desastres devidos ao tempo atmosférico. Logo, a previsibilidade de sistemas convectivos é importante para os processos de alerta antecipados. Os modelos de previsão numérica, ao lado de sistemas de monitoramento, são as ferramentas mais adequadas a esse objetivo. Esta pesquisa fez uso de simulações numéricas usando o modelo WRF em alta resolução espacial horizontal com 2 km. O objetivo foi verificar a sensibilidade do WRF quanto às configurações dos esquemas de camada limite planetária (PBL) e de microfísica de nuvens (MP) na acuracidade da previsão de precipitação em um evento de sistema convectivo severo que ocorreu no centro e no oeste do Estado de Santa Catarina na data de 14 de agosto de 2020. Os resultados das execuções das configurações pelo WRF foram verificadas através da precipitação coletada por estações meteorológicas de superfície na região de interesse. Foram avaliados cinco esquemas de parametrização de PBL e 28 esquemas de MP e os resultados consideraram a estatística da Raiz do Erro Quadrático Médio (*Root Mean Squared Error* - RMSE) entre valores previstos e dados coletados. As conclusões consideraram valores de RMSE e testes de significância estatística. Os resultados indicaram que não foram encontradas diferenças estatísticas significativas entre os esquemas de MP. Contudo, esquemas de PBL apresentaram diferenças significativas entre si. Logo, diferentes esquemas de PBL têm influência sobre os resultados do modelo na acurácia da previsão de precipitação. Considerando os resultados de PBL de forma isolada, os esquemas de PBL “Yonsei University” e “Shin-Hong” foram os que obtiveram os menores valores de erros RMSE, com média para todas as configurações, de 3,28 e 3,29, respectivamente. O esquema de PBL “MRF” teve a pior performance, pois obteve média do valor de RMSE para todos os casos de 3,61. As médias de RMSE para os esquemas PBL “Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5” (MYNN2) e “Boulac”, resultaram em 3,39 e 3,36, respectivamente. Avaliando os resultados para ambas as parametrizações de PBL e MP, as configurações de PBL-MP que obtiveram os menores erros RMSE foram “Yonsei University” (YSU)-“Jensen ISHMAEL” e “Shin-Hong”-“Purdue Lin”.

Palavras-chave: WRF. Esquemas de microfísica. Esquemas de camada limite planetária. Eventos Extremos. Santa Catarina.

ABSTRACT

Weather and climate extremes, according to the World Meteorological Organization (WMO), are rare events in a given place and time, with unusual characteristics in terms of magnitude, location, duration, or geographic extent. Storms originate from deep convection and can occur isolated or grouped into systems. They cause a range of severe weather phenomena, such as heavy precipitation, hail, tornadoes, strong winds, gusts, and lightning. Phenomena associated with intense convection are responsible for most of the damage and losses related to weather-related disasters. Therefore, the predictability of convective systems is important for early warning processes. Numerical prediction models, along with monitoring systems, are the most appropriate tools for this purpose. This research used numerical simulations using the WRF model at a high horizontal spatial resolution of 2 km. The objective was to verify the sensitivity of the WRF to planetary boundary layer (PBL) and cloud microphysics (MP) scheme configurations on the accuracy of precipitation forecasting during a severe convective system that occurred in central and western Santa Catarina State on August 14, 2020. The results of the WRF configuration executions were verified using precipitation collected by surface meteorological stations in the region of interest. Five PBL parameterization schemes and 28 MP schemes were evaluated, and the results considered the statistical Root Mean Squared Error (RMSE) between predicted values and collected data. The conclusions considered RMSE values and statistical significance tests. The results indicated that no statistically significant differences were found between the MP schemes. However, PBL schemes showed significant differences. Therefore, different PBL schemes influence the model results in precipitation forecast accuracy. Considering the PBL results in isolation, the PBL schemes "Yonsei University" and "Shin-Hong" obtained the lowest RMSE error values, with an average for all configurations of 3.28 and 3.29, respectively. The PBL scheme "MRF" had the worst performance, as it obtained an average RMSE value for all cases of 3.61. The average RMSE for the PBL schemes "Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5" (MYNN2) and "Boulac" resulted in 3.39 and 3.36, respectively. Evaluating the results for both PBL and MP parameterizations, the PBL-MP configurations that obtained the lowest RMSE errors were "Yonsei University" (YSU)-"Jensen ISHMAEL" and "Shin-Hong"-Purdue Lin".

Keywords: WRF. Microphysics schemes. Planetary boundary layer schemes. Extreme events. Santa Catarina.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Escalas espaciais e temporais de fenômenos atmosféricos.	20
Figura 2 – Ciclo de vida de uma célula convectiva com detalhes da interface com a camada limite planetária (<i>Atmospheric Boundary Layer</i> - ABL). Estágio 1: cumulus congestus. Estágio 2: maturação, com limite superior na tropopausa; presença de chuva e correntes descendentes de ar frio. Estágio 3: dissipação; predominância de correntes descendentes. Pós-tempestade: resto de nuvem da bigorna (<i>anvil</i>) com precipitação leve (<i>virga</i>); ar frio pode proceder ao desenvolvimento de nova célula de cumulus.	23
Figura 3 – Esquema de uma célula convectiva isolada com manifestação de uma tempestade. A nuvem cumulonimbus é limitada pela base da nuvem (<i>cloud base</i>) e pela tropopausa. Características suplementares: nuvens arcus (<i>arc cloud</i>), que estão associadas com frentes de rajada (<i>gust front</i>); virga (chuva que não chega ao chão); a bolha de ar ascendente (<i>updraft bubble</i>), que é limitada pela tropopausa. . .	24
Figura 4 – Condições ambientais associadas a tempestades intensas: camada limite planetária (<i>boundary layer</i>) com ar úmido e quente; mecanismo dinâmico para levantamento inicial - forçante (<i>trigger</i>); camada estável (<i>capping stable layer</i>); camada de ar mais seco em níveis médios (<i>dry air at mid levels</i>); ar frio em altos níveis (<i>cold air aloft</i>); cisalhamento do vento (<i>wind shear</i>).	26
Figura 5 – Tipos de tempestades (células individuais, multicelulas, supercélulas) em função do cisalhamento vertical do vento.	26
Figura 6 – Três formas de organização de sistemas convectivos de mesoescala vistos em imagens de satélite.	28
Figura 7 – Esquema de uma trovoadas em uma linha de tempestades e eventos atmosféricos associados.	29
Figura 8 – Dias com parâmetros favoráveis ao desenvolvimento de tempestades.	30
Figura 9 – Eventos de Ciclones, Vendavais e Tornados (Atlas Digital de Desastres no Brasil (1991-2024)).	31
Figura 10 – Eventos de Ciclones, Vendavais e Tornados (Atlas Digital de Desastres no Brasil (1991-2024)).	31

Figura 11 – Variação diuturna da camada limite planetária em relação à estrutura vertical e caracterização de estabilidade. Durante o dia: a camada de inversão (<i>Capping Inversion</i>) dá lugar a uma zona de entranhamento (<i>Entrainment Zone</i>); as camadas estável (<i>Stable Boundary Layer</i> - SBL) e residual (<i>Residual Layer</i> - RL) vão sendo misturadas e se tornando uma única camada de mistura (<i>Mixed Layer</i> - ML). Durante a noite: a camada estável (SBL) vai se intensificando o que deixa um ar residual (RL) e que acaba produzindo uma camada de inversão. .	32
Figura 12 – Influência de dois sistemas sinóticos sobre a estrutura vertical e organização da CLP (ABL). Imagem à esquerda: sistemas de pressão alta (<i>High Pressure</i>) e baixa (<i>Low Pressure</i>), com movimentos atmosféricos de divergência, convergência, subsidência e com correntes ascendentes (<i>updrafts</i>). Imagem à direita: frente fria, com movimentos horizontais de ar frio e quente e impacto na altura da CLP (ABL). São mostradas a zona e a inversão frontais além de sistemas de nuvens estratiformes e nuvens de tempestades (<i>thunderstorm</i>).	33
Figura 13 – Ilustração dos três elementos de um sistema de modelagem numérica: a) discretização espacial através de grade tridimensional (domínio), com destaque para um unidade de grade (<i>grid cell</i>); b) a parte da dinâmica do modelo que trata das equações do movimento (no exemplo, ar quente, úmido e rápido tendo modificada suas propriedades para ar frio, seco e lento); e, c) a parte da física com alguns fenômenos, como, radiação, precipitação e turbulência.	36
Figura 14 – Arranjo e organização dos pontos de grade e dos índices em um esquema de grade bidimensional Arakawa (C-Grid).	38
Figura 15 – Seção vertical da atmosfera com destaque para as linhas de coordenadas verticais.	40
Figura 16 – Principais processos físicos que não são resolvíveis pelas equações dos modelos numéricos e que requerem algum processo de parametrização.	41
Figura 17 – Diagrama que mostra as interações diretas entre os vários componentes da física do modelo WRF.	43
Figura 18 – Sequência de imagens no canal infravermelho realçada abrangendo o seguinte período temporal (da esquerda para a direita), todos do dia 14/08/2020: 16:40, 17:20, 18:00, 18:20, 18:50, 19:30, 20:20 e 20:30 (hora UTC).	49

Figura 19 – Imagens de satélite nos canais do infravermelho termal e visível para o horário das 18:30 UTC. A imagem acima é do canal IR termal com realce de cor enquanto a imagem abaixo é do canal visível com destaque para atividade elétrica em cor rosa.	51
Figura 20 – Área de estudo (estado de Santa Catarina) conforme eventos extremos ocorridos em 14/08/2020. Siglas e respectivas cidades com reporte de eventos: VAG (Vargem Bonita), AGD (Água Doce), CAT (Catanduvas), TAN (Tangará), IRI (Irineópolis), Ibicaré (IBI) e Campos Novos (CAN). Os retângulos com indicativos CH, XA, JO, CN, CR, e CA se referem a estações automáticas do INMET.	53
Figura 21 – Esquema do sistema de modelagem WRF com os módulos e tipos de dados/informação processada.	57
Figura 22 – Grades D1 (externa) e D2 (interna) da configuração B usada nos experimentos.	60
Figura 23 – Situação sinótica da data de 14/08/2020, às 00 UTC, representado por uma imagem do canal IR (à esquerda) e por um recorte da análise de superfície (à direita).	71
Figura 24 – Situação sinótica da data de 14/08/2020, às 12 UTC, representado por uma imagem do canal IR (à esquerda) e por um recorte da análise de superfície (à direita).	71
Figura 25 – Dados de reanálise MERRA-2 válidos para 14/08/2020, às 12UTC. À esquerda, vento em 10m e linhas de pressão à superfície. À direita, transporte de vapor de água integrado em conjunto a linhas de pressão à superfície.	72
Figura 26 – Dados de reanálise MERRA-2 válidos para 14/08/2020, às 12UTC. À esquerda, vento em 850 hPa e à direita o vento em 300 hPa.	73
Figura 27 – Plotagem (Boxplot) dos dados de RMSE em relação aos esquemas de parametrização PBL.	75
Figura 28 – Plotagem (Boxplot) dos dados de BIAS em relação aos esquemas de parametrização PBL.	77
Figura 29 – Plotagem (Boxplot) dos dados de MAE em relação aos esquemas de parametrização PBL.	78
Figura 30 – Plotagem (Boxplot) dos dados de RMSE em relação aos esquemas de parametrização PBL.	79
Figura 31 – Plotagem (Boxplot) dos dados de BIAS em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 1/3).	80
Figura 32 – Plotagem (Boxplot) dos dados de BIAS em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 2/3).	81

Figura 33 – Plotagem (Boxplot) dos dados de BIAS em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 3/3).	82
Figura 34 – Plotagem (Boxplot) dos dados de MAE em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 1/3).	83
Figura 35 – Plotagem (Boxplot) dos dados de MAE em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 2/3).	84
Figura 36 – Plotagem (Boxplot) dos dados de MAE em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 3/3).	85
Figura 37 – Plotagem (Boxplot) dos dados de RMSE em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 1/3).	86
Figura 38 – Plotagem (Boxplot) dos dados de RMSE em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 2/3).	87
Figura 39 – Plotagem (Boxplot) dos dados de RMSE em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 3/3).	88
Figura 40 – Esquema do fluxo de dados pelos módulos do sistema de modelagem WRF (versão 4.7).	113
Figura 41 – Esquema padrão do fluxo de dados e respectivos programas num sistema WRF para previsão numérica de tempo.	117
Figura 42 – Esquema de grade horizontal do modelo WRF com destaque para os pontos de cálculo de variáveis atmosféricas.	127

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação de fatores categóricos (esquemas de PBL e de MP) definidos para experimentação usando o modelo WRF.	54
Quadro 2 – Parâmetros das grades da configuração “B” usada nos experimentos.	60
Quadro 3 – Estações automáticas do INMET que forneceram dados pluviométricos para a área de estudo.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Médias dos resultados das sumarizações estatísticas considerando todos os experimentos (execuções), para todas as localidades e para todo o período de previsão.	74
Tabela 2 – Configurações de MP e de PBL cujos valores de RMSE ficaram abaixo de 3,25.	76
Tabela 3 – Valores médios de RMSE para cada esquema de PBL considerando todas as configurações de PBL-MP.	88
Tabela 4 – Valores médios de RMSE para cada esquema de MP considerando todas as configurações de PBL-MP.	89
Tabela 5 – Dados de RMSE obtidas das extrações de dados de precipitação prevista e observada.	105
Tabela 6 – Dados de MAE obtidas das extrações de dados de precipitação prevista e observada.	107
Tabela 7 – Dados de BIAS obtidas das extrações de dados de precipitação prevista e observada.	109

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	Estrutura do Trabalho	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Processos Atmosféricos	19
2.2	Eventos Tempo Extremo e Tempestades	20
2.2.1	Sistemas Convectivos de Mesoescala	27
2.2.2	Climatologia de Tempo Severo	30
2.3	Camada Limite Planetária	31
2.4	Previsão Numérica de Tempo (PNT)	34
2.4.1	A Física dos Modelos PNT e Parametrizações	40
2.4.2	Parametrizações de Processos Físicos no ARW-WRF	42
3	TRABALHOS RELACIONADOS	46
4	MÉTODOS E EXPERIMENTOS	49
4.1	Delimitação do estudo de caso	49
4.2	Definição da experimentação com uso do modelo WRF	53
4.2.1	Delimitação e especificação dos fatores	54
4.3	Modelagem Numérica	55
4.3.1	Modelo WRF	57
4.3.2	Configuração de execução do WRF	58
4.3.3	Condições iniciais e de contorno	63
4.3.4	Execução dos experimentos com o WRF	64
4.4	Verificação das Previsões	65
4.4.1	Dados observacionais	66
4.4.2	Método de extração e cálculo de estatísticas	67
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
5.1	Análise sinótica e de mesoescala	70
5.2	Análise e discussão dos resultados	73
5.2.1	Extração de dados de previsão do modelo WRF	73
5.2.2	Análise descritiva dos dados	74
5.2.3	Análise do desempenho para configurações PBL-MP	74
5.2.4	Análise das estatísticas de Bias, MAE e de RMSE	76
5.2.5	Análise de Variância RMSE - ANOVA	90
5.3	Resultados e produtos	91
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
7	TRABALHOS FUTUROS	95
	Referências	96
	APÊNDICES	103
	APÊNDICE A – DADOS SUMARIZAÇÃO ESTATÍSTICA: RMSE	104
	APÊNDICE B – DADOS SUMARIZAÇÃO ESTATÍSTICA: MAE	106

	APÊNDICE C – DADOS SUMARIZAÇÃO ESTATÍSTICA: BIAS . .	108
	APÊNDICE D – COMANDOS R PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS RMSE	110
	APÊNDICE E – PRODUTO DESENVOLVIDO	112
E.1	Sobre Modelo WRF e seus Componentes	112
E.2	Automatizando Execução do Modelo WRF via Pacote “model-wrf”	115
E.3	Executando o Modelo WRF através do uso do Pacote “model-wrf”	117
E.3.1	Sobre opções para execução do programa “model-wrf”	117
E.4	Obtenção e Extração de Dados Observacionais de Estações de Superfície	124
E.5	Extração de Dados de Saída do Modelo WRF	126
E.5.1	Sistema de Coordenadas de Arquivos de Saída do WRF	126
E.5.2	Especificação das Coordenadas dos Pontos de Grade dos Dados NetCDF	127
E.5.3	Extração de Dados de Precipitação em Pontos de Grade NetCDF . .	128

1 INTRODUÇÃO

Eventos extremos de tempo e de clima¹ consistem, basicamente, em extremos de temperatura, fortes precipitações e inundações intensas, secas e tempestades, tornados e ciclones tropicais (Seneviratne et al., 2021). Esses extremos têm merecido atenção da sociedade como um todo, pelos impactos negativos causados na vida humana e no ambiente. A Organização Meteorológica Mundial - OMM (WMO - *World Meteorological Organization*) estabeleceu o tema de “Alerta antecipado e Ação antecipada” (*Early Warning and Early Action*) para o ano de 2022², com o objetivo de congregiar esforços e atividades³ para melhorar a informação de clima e de hidrometeorologia com o fim de reduzir os riscos de desastres e aumentar o nível de resiliência.

Um tipo de evento extremo são os fenômenos meteorológicos associados a nuvens convectivas de grande desenvolvimento vertical. Esse tipo de nebulosidade recebe o nome de cumulonimbus. Essas nuvens, a depender do ambiente sinótico (Nascimento, 2005), podem produzir tempestades, tornados, granizos, vendavais, microexplosões (*microbursts*) e precipitação intensa (John M. Alen, 2013; Barry & Chorley, 2013). A região Sul tem uma das maiores frequências de ocorrência de tempestades severas (Mantovani et al., 2024) e de fenômenos intensos associados, como vendavais, granizo e tornados (Balicki et al., 2021; Lopes & de Lima Nascimento, 2025; MIDR, 2023; Silva Dias, 2011).

Os modelos de previsão numérica constituem ferramentas importantes para a previsão de sistemas atmosféricos que podem suscitar desenvolvimentos convectivos intensos e seus respectivos fenômenos de tempo. A classe de modelos regionais, como o WRF (*Weather Research and Forecasting Model*) Skamarock et al. (2021), permite executar sistemas de previsão numérica de tempo com maior nível de resolução espacial para determinadas áreas de interesse. Nesse sentido, determinada configuração de modelo e dos esquemas de parametrização respondem de forma diferente considerando diferentes regiões geográficas. Por exemplo, os autores Patel et al. (2019) concluíram em seu trabalho que regiões diferentes respondem de forma diversa a um mesmo esquema de física para estimativa de precipitação.

Contudo, alguns processos físicos não estão ao alcance dos modelos em suas configurações atuais. Para isso, são usadas parametrizações para idealizar o comportamento dos processos quanto aos seus efeitos. Surgem, então, questões envolvendo o comportamento e influência de determinadas parametrizações e respectivos

¹ Conforme também definição reportada em WMO, disponível em <https://wmo.int/topics/extreme-weather>. Acesso em: 24 ago. 2024.

² Fonte: Esse dia específico é o dia 23 de março de 2022 e mais informações disponíveis em <https://wmo.int/about-us/world-meteorological-day/wmd-2022> - acesso em 24 de agosto de 2024.

³ Mais informações disponíveis em <https://wmo.int/topics/early-warning-system>.

esquemas nos resultados das previsões. E, nesse sentido, há condições ambientais que podem alterar os resultados de determinado esquema.

A previsibilidade de sistemas meteorológicos através do uso de modelos de previsão numérica depende de processos físicos que são resolvidos e aqueles que não são resolvidos pela modelagem numérica (Bauer et al., 2015). Alguns sistemas e processos atmosféricos de menor escala entram no campo dos não resolvíveis, devido a diversos fatores (Warner, 2011). Vários fenômenos físicos entram nessa categoria, tendo como exemplos: processos de formação nuvens, radiação solar e terrestre, camada da atmosfera mais próxima da superfície terrestre e processos de nuvens cumulus. Os modelos de previsão numérica são baseados em leis de conservação de massa, energia e momento, os quais são universais e aplicáveis para qualquer parte do globo. Contudo, há diferenças regionais que requerem formulações matemáticas e soluções de processos físicos específicos (Pu & Kalnay, 2018). Essas formulações para tratar processos físicos não resolvíveis diretamente pelos modelos são referidas como parametrizações. Dessa forma, estudos corroboram o entendimento de que uma configuração padrão de um modelo não pode ser usada para uma área geográfica muito extensa. Além disso, a performance de um modelo e sua configuração tem dependência, além da área geográfica, também com relação à época do ano (De Lange et al., 2021; Ruiz et al., 2010).

Nesse sentido, estudos de sensibilidade de modelos regionais em várias partes do globo estão considerando as formulações de diferentes esquemas de parametrizações em vista das especificidades geográficas e climáticas. A bibliografia é extensa em apresentar estudos de impacto de parametrizações de microfísica de nuvem (MP⁴), de camada limite planetária (CLP⁵) e de nuvem cumulus, em conjunto ou não, na assertividade do modelo WRF em simular fenômenos que vão de rajadas a precipitação intensa. Esses estudos tiveram dentre seus objetivos, a avaliação para determinadas regiões/países, como as seguintes: Argentina (Otero et al., 2025); Brasil/RS (Palenzuela, 2017), Brasil/bacia do Rio Paraíba do Sul de Campos (2022); Brasil/Nordeste (Comin et al., 2021); Peru (Moya-Álvarez et al., 2020); EUA/Califórnia (Kumar et al., 2024); Egito (Liu, 2024); Península Arábica (Schwitalla et al., 2019); Índia/Nagaland (Biswasharma et al., 2024); China (Liu et al., 2020); Tailândia (Macatangay et al., 2016).

Em consonância ao fator de encontrar a melhor combinação de esquemas de determinadas parametrizações, há o contínuo desenvolvimento de novas opções de física, que vão sendo incorporadas nos modelos regionais, especificamente, no WRF. Essas questões, aliadas à climatologia e à frequência alta de fenômenos atmosféricos intensos sobre a Região Sul do Brasil, são os elementos da justificativa do presente

⁴ A sigla MP designa a parametrização de microfísica (*Microphysics*) no WRF.

⁵ A sigla correspondente em inglês é PBL e designa a parametrização de camada limite planetária (*Planetary Boundary Layer*) no WRF.

trabalho. Ou seja, a pesquisa procurou identificar quais opções e esquemas de física do WRF que melhor respondem à simulação de um sistema meteorológico intenso sobre a região geográfica do estado de Santa Catarina. Considerando a questão científica reportada, foi definida a seguinte hipótese para o trabalho: parametrizações de microfísica e de camada limite planetária, através dos respectivos esquemas (fatores), definidos na pesquisa, não influenciam significativamente na acurácia dos resultados da previsão de precipitação pelo modelo WRF para o caso de 14 de agosto de 2020 e eles também não interagem significativamente entre si.

Ao lado da justificativa no campo de pesquisa científica, também é importante que o trabalho possa resultar e/ou indicar uma determinada configuração de execução do modelo WRF que possa ser implantada operacionalmente. Ainda, considerando o resultado da pesquisa científica, a respectiva configuração possa incorporar as opções que levem à execução do modelo WRF com nível de acurácia adequado ao monitoramento de sistemas de tempo severo em proveito da defesa civil.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a sensibilidade do modelo WRF para diferentes esquemas de parametrizações de camada limite planetária (CLP) e de microfísica de nuvens (MP), considerando os efeitos sobre a previsão de precipitação em um caso de sistema convectivo intenso ocorrido em 14 de agosto de 2020, o qual afetou as regiões centro e oeste do Estado de Santa Catarina.

1.1.2 Objetivos Específicos

Compõem objetivos específicos:

- a) Compreender as principais características em termos de escalas espacial e temporal das tempestades e de sistemas convectivos de mesoescala de forma a encontrar a configuração mais adequada para execução do modelo regional WRF no contexto geográfico do Estado de Santa Catarina;
- b) Identificar os esquemas de parametrizações de camada limite planetária e de microfísica de nuvens que mais impactam na precipitação devida à simulação do caso de evento de tempo severo ocorrido no dia 14 de agosto de 2020, no centro e oeste de Santa Catarina;
- c) Definir uma configuração de execução do modelo WRF para ser executada operacionalmente considerando os melhores parâmetros resultados da presente pesquisa; e,

- d) Definir um roteiro de produto técnico-tecnológico com especificação da execução operacional e de pesquisa para o modelo WRF e também com a metodologia de extração de dados usando a linguagem R.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado conforme: o Capítulo 2 irá apresentar definições básicas que servirão de suporte ao presente trabalho; o Capítulo 3 apresentará resultados de trabalhos anteriores congêneres a este; o Capítulo 4 discorrerá sobre a metodologia usada na experimentação; o Capítulo 5 apresentará os resultados e discussão sobre os achados; e, o Capítulo 6 apresentará um resumo conclusivo sobre a pesquisa e quanto à aplicabilidade operacional dos resultados da pesquisa. O Capítulo 7 apresentará questões em aberto que podem ser exploradas em trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresentará conceitos e subsídios para melhor contextualizar o presente trabalho. Serão conceituados os principais processos da física atmosférica, o tempo severo e tempestades e as respectivas caracterizações e climatologia, os elementos básicos em camada limite planetária e, finalizando, com uma descrição sumária sobre previsão numérica de tempo e processos de parametrização de física.

2.1 Processos Atmosféricos

A Terra pode ser considerada uma máquina térmica, que tem a energia solar como fonte no sistema e a emissão de radiação terrestre, como sumidouro de energia. Neste processo, há transformações em energia mecânica que produzem a maior parte da atividade atmosférica McIlveen (2010). A energia térmica no sistema atmosférico se relaciona às propriedades de pressão e densidade do ar, via lei dos gases e leis da termodinâmica. Além disso, participa das transformações do componente água presente na atmosfera para produção dos principais fenômenos atmosféricos (Lutgens et al., 2018).

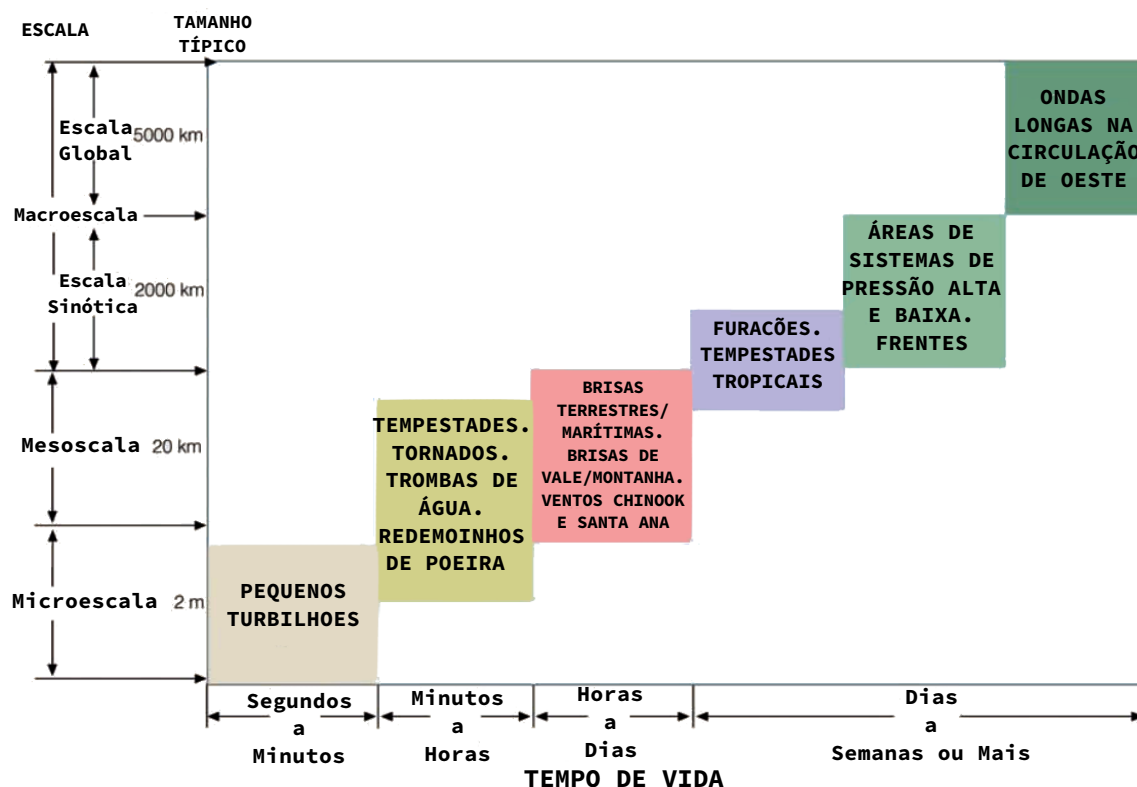
Antes de considerar o papel da umidade nos principais fenômenos atmosféricos, será apresentada a concepção de tempo atmosférico (*weather*, em inglês), que consiste nas condições da atmosfera em algum espaço e tempo particulares. Compreende os seguintes elementos (Ahrens, 2013): temperatura; pressão; umidade; nuvens; precipitação; visibilidade; e, vento. Os processos relacionados à física do conteúdo de umidade e seus processos de mudança de fase através do ciclo hidrológico geram os fenômenos de tempo, como, chuvas, neve, granizo, nevoeiro, para citar alguns (Hakim & Patoux, 2021). Ainda, a umidade tem importância fundamental nos processos de desenvolvimento de nuvens, sistemas de tempestades e ciclones, dentre os principais. O vapor de água é o componente da atmosfera que está associado a maior parte dos fenômenos meteorológicos através da física de armazenamento e liberação de calor latente e sensível (Lutgens et al., 2018). Uma importante característica desses processos é o *feedback*. Ao mesmo tempo que o vapor de água reage à temperatura do ambiente, ele também afeta a propriedade de temperatura do ar circundante quando forçado a mudar de densidade e/ou de estado¹ (Stull, 2017).

Os movimentos atmosféricos e os fenômenos associados seguem um padrão de organização espacial e temporal. São referidas como escalas atmosféricas e a Figura 1 contém um gráfico dos principais fenômenos de tempo e sua extensão espacial e temporal. De forma geral, fenômenos atmosféricos que tem menores escalas

¹ São os estados ou as fases em que a água pode ser encontrada na atmosfera: sólida, líquida e gasosa.

temporais tendem a se caracterizar por menor escala espacial, e vice-versa (Markowski & Richardson, 2010). Compreender os fenômenos e processos de escala influenciará nas escolhas da metodologia de previsão numérica de tempo, principalmente nos sistemas de área limitada.

Figura 1 – Escalas espaciais e temporais de fenômenos atmosféricos.



Fonte: Adaptado de Ahrens (2013).

2.2 Eventos Tempo Extremo e Tempestades

Eventos de tempo extremo são definidos como raros para determinado lugar e estação do ano, com características não usuais em termos de magnitude, localização, duração ou extensão, conforme definição reportada pelo *World Meteorological Organization* (WMO)². Incluem uma variedade de fenômenos meteorológicos, como aqueles considerados na base de dados de tempo severo na Europa (*European Severe Weather Database*), quais sejam, conforme relação constante do respectivo sítio³: tornado, vento severo, granizo grande, chuva intensa, nuvem funil, *gustnado*, redemoinhos, queda de neve intensa, tempestade de neve, acúmulo de neve, avalanche associada à neve e descargas elétricas. Contudo, os eventos de tempo extremo associados a tempestades convectivas severas têm frequência de ocorrência maior e estão associadas a maiores perdas, considerando os fenômenos de granizo, precipitação intensa, tornados

² Disponível em: <https://wmo.int/topics/extreme-weather>. Acesso em: 15 ago. 2025.

³ Disponível em <https://www.eswd.eu/>. Acesso em: 15 ago. 2025

e ventos fortes (Hoeppe, 2016). Do ponto de vista de previsão e monitoramento, o serviço de meteorologia dos EUA⁴ considera os fenômenos de tornados, granizo e ventos intensos na vigilância de tempestades severas. Os autores Zipser et al. (2006) discutem em seu trabalho de revisão de dados de satélite a questão da intensidade de uma tempestade e fenômenos associados. De forma geral, a ocorrência desses eventos pode ser avaliada considerando:

- A caracterização e parâmetros para desenvolvimento e severidade;
- Os sistemas e padrões meteorológicos nos quais esses fenômenos de tempo severo se desenvolvem; e,
- A climatologia que permite discernir áreas e épocas do ano mais propícias à formação dos fenômenos meteorológicos intensos.

Os fenômenos de tempo relacionados anteriormente, em sua maior parte, estão associados a um tipo nuvem convectiva que se caracteriza por um extenso desenvolvimento vertical. São referidas como nuvens cumulonimbus e se caracterizam por grande extensão vertical, tendo normalmente um topo achatado em forma de bigorna característica⁵. Contém uma grande variedade de hidrometeoros, como gotículas e gotas de água, cristais de gelo e granizo. De forma geral, as condições ambientais que são favoráveis e também necessárias para formar tempestades severas (Mohr et al., 2020; Stull, 2017) são:

- Altos níveis de umidade na camada limite planetária (CLP)⁶;
- Instabilidade condicional não local;
- Forte cisalhamento do vento (direção e/ou velocidade); e,
- Mecanismo de acionamento que causa o levantamento do ar da camada limite planetária.

A convecção isolada pode ser caracterizada por uma bolha de ar quente e úmido que sobe atravessando ambiente com instabilidade condicional e cujo desenvolvimento subsequente depende de parâmetros como cisalhamento do vento na vertical

⁴ Serviço *Severe Thunderstorm or Tornado Watch* disponível no endereço <https://www.spc.noaa.gov/products/watch/>.

⁵ Algumas nuvens cumulonimbus têm um topo que não possui o espalhamento fibroso, sendo denominada de c. calvus.

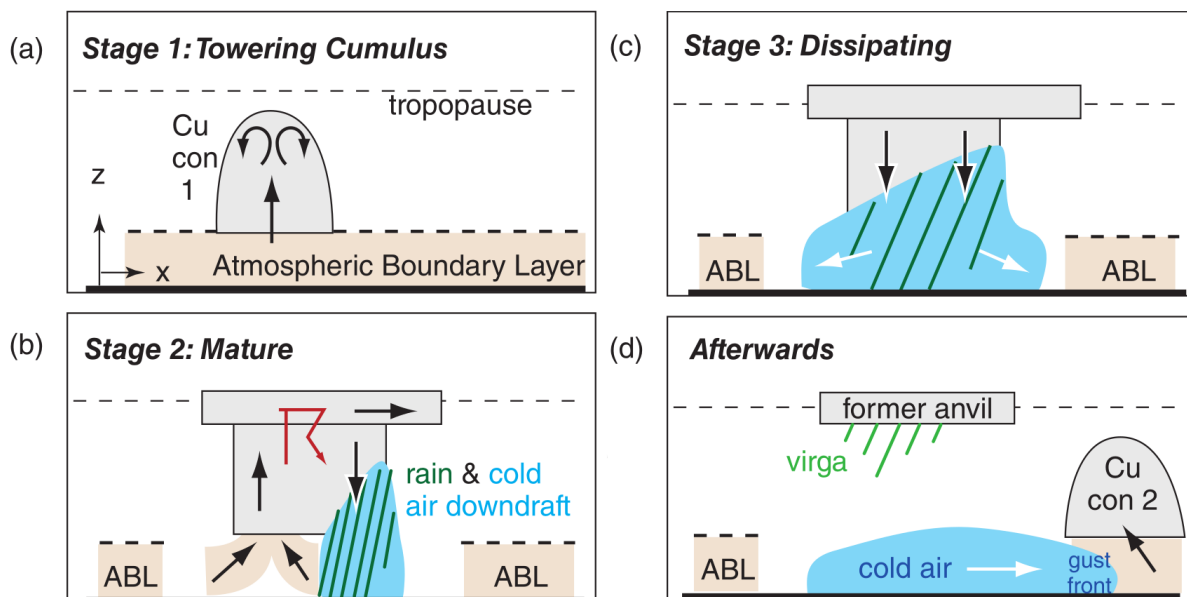
⁶ De forma geral, a CLP é definida como aquela que sofre os efeitos diretos do aquecimento e resfriamento noturnos e onde os fluxos de ar são turbulentos além de ser limitada verticalmente por uma camada de inversão de temperatura. Será tratada na Seção 2.3.

e CAPE (*Convective Available Potential Energy*)⁷ (Markowski & Richardson, 2010). O ar ascendente libera calor latente devido à condensação do vapor de água e essa energia acelera o fluxo ascendente de ar, contribuindo para que a nuvem se desenvolva continuamente e chegue até níveis superiores da troposfera. A instabilidade condicional não local ocorre quando uma camada de ar estável é limitada por uma inversão de temperatura (normalmente dentro da camada limite planetária) e, ao transpor a inversão, se torna instável. A camada de inversão funciona mantendo o calor sensível e o calor latente associado ao conteúdo de umidade dentro da camada limite planetária, de forma a prover combustível para as nuvens cumulonimbus.

A Figura 2 apresenta o ciclo de vida de uma tempestade de massa de ar e a interação com a camada limite planetária. A imagem (a) mostra uma nuvem cumulus que se desenvolve na troposfera acima da CLP mas na presença de condições ambientais adequadas, a nuvem pode evoluir para cumulus congestus e para cumulonimbus (b). Esse estágio de maturidade requer que a CLP forneça a umidade para o crescimento da nuvem. Nesta fase há presença de correntes ascendentes e descendentes dentro da nuvem. A ocorrência de precipitação leva ar mais frio em direção à superfície, contribuindo para o processo de dissipação. As correntes ascendentes contribuem para trazer mais ar úmido (combustível) para dentro da nuvem. O estágio de dissipação (c) se caracteriza por predominância de correntes descendentes em conjunção ou não com precipitação. Em virtude do ar frio que chegou à superfície, podem ser formados nuvens cumulus congestus (d) em resposta à frente de rajada que força levantamento de ar mais úmido da CLP. Alguns dos principais mecanismos de levantamento inicial do ar são o aquecimento da superfície dentro de massas de ar, o contraste de temperatura entre oceano e ar adjacente, os sistemas frontais e o levantamento orográfico.

⁷ CAPE é um parâmetro indicador de quantidade de energia disponível para desenvolvimento convectivo.

Figura 2 – Ciclo de vida de uma célula convectiva com detalhes da interface com a camada limite planetária (*Atmospheric Boundary Layer* - ABL). Estágio 1: cumulus congestus. Estágio 2: maturação, com limite superior na tropopausa; presença de chuva e correntes descendentes de ar frio. Estágio 3: dissipação; predominância de correntes descendentes. Pós-tempestade: resto de nuvem da bigorna (*anvil*) com precipitação leve (*virga*); ar frio pode proceder ao desenvolvimento de nova célula de cumulus.

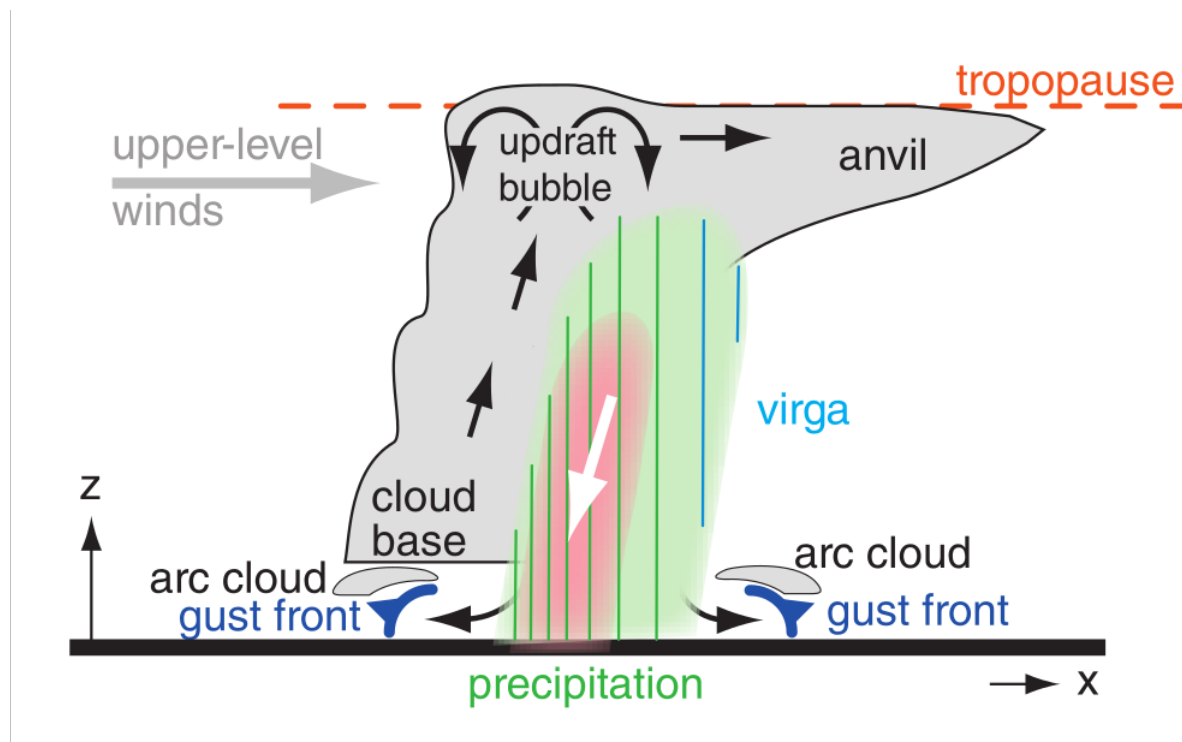


Fonte: Adaptado de Stull (2017).

Devido à grande quantidade de energia armazenada no processo de desenvolvimento vertical, as nuvens cumulonimbus dão origem a fenômenos de tempestades⁸. A imagem da Figura 3 apresenta os elementos de uma tempestade de massa de ar, na qual constam os principais elementos estruturais. A nuvem é caracterizada por uma base (*cloud base*) e a parte do topo com presença de torres devidas a correntes ascendentes (*updraft bubble*) e também a um manto de nuvens cirriformes em forma de bigorna (*anvil*). Há dois tipos de precipitação: aquela que chega ao solo e aquela que, caindo, acaba por voltar pra fase de vapor de água (*virga*) sem contudo atingir o solo. Também constam da imagem as frentes de rajada (*gust front*), que tem alto poder destrutivo e são caracterizadas por mudanças bruscas na direção e/ou velocidade do vento. Podem ou não se formar nuvens em forma de rolo (*arc cloud*) no processo de deslocamento da frente de rajada.

⁸ Tempestade é um temporal associado a nuvens cumulonimbus e que têm presença de raios e trovões (Ahrens, 2013). No inglês, esse fenômeno é referido pelo termo *thunderstorm*.

Figura 3 – Esquema de uma célula convectiva isolada com manifestação de uma tempestade. A nuvem cumulonimbus é limitada pela base da nuvem (*cloud base*) e pela tropopausa. Características suplementares: nuvens arcus (*arc cloud*), que estão associadas com frentes de rajada (*gust front*); virga (chuva que não chega ao chão); a bolha de ar ascendente (*updraft bubble*), que é limitada pela tropopausa.



Fonte: adaptado de Stull (2017).

Os critérios para definir uma tempestade severa não são consistentes e variam conforme o país e região (Nascimento, 2005). Os autores Johns & Doswell III (1992) elencaram as seguintes características que devem estar presentes numa tempestade convectiva severa: tornados; ventos destrutivos ou rajadas⁹ com velocidades iguais ou superiores a 26 m/s e diâmetro de granizo com tamanhos igual ou maior que 1,9 cm. Os autores Brooks et al. (2003), em sua pesquisa com dados de reanálise, utilizaram os seguintes valores para classificar uma tempestade severa significativa: granizo de ao menos 5 cm de diâmetro, rajadas de vento com ao menos 120 km/h ou tornado na categoria F2 de destruição. Ainda, conforme o serviço americano de tempo, *National Weather Service* (NWS), tempestades severas são assim definidas quando apresentam ao menos um dos seguintes elementos (Ahrens, 2013): granizo com diâmetro de ao menos uma polegada e/ou rajadas em superfície com velocidades iguais ou maiores a 50 kt ou ainda tornados. Outros eventos associados normalmente a tempestades e/ou a nuvens de grande desenvolvimento vertical: *microburst*¹⁰, que

⁹ As rajadas são definidas como mudanças bruscas na velocidade do vento em um pequeno intervalo de tempo. De acordo com a Escala Beaufort, as rajadas de vento ocorrem quando essa variação é superior a 10 km/h ou 3,6 m/s. Fonte: <https://portal.inmet.gov.br/glossario/gloss%C3%A1rio#R>.

¹⁰ Definição disponível também na *American Meteorological Society* (AMS). Fonte: <https://glossary>.

é uma corrente convectiva descendente (*downburst*) que cobre uma área menor que quatro quilômetros e cujos picos de vento duram ao menos dois a cinco minutos (Ahrens, 2013). Se a área atingida em superfície for maior, então, tem-se o fenômeno de *macroburst*. As frentes de rajada estão associadas as essas correntes descendentes e se caracterizam por fortes cisalhamentos de ventos em níveis próximos ao solo.

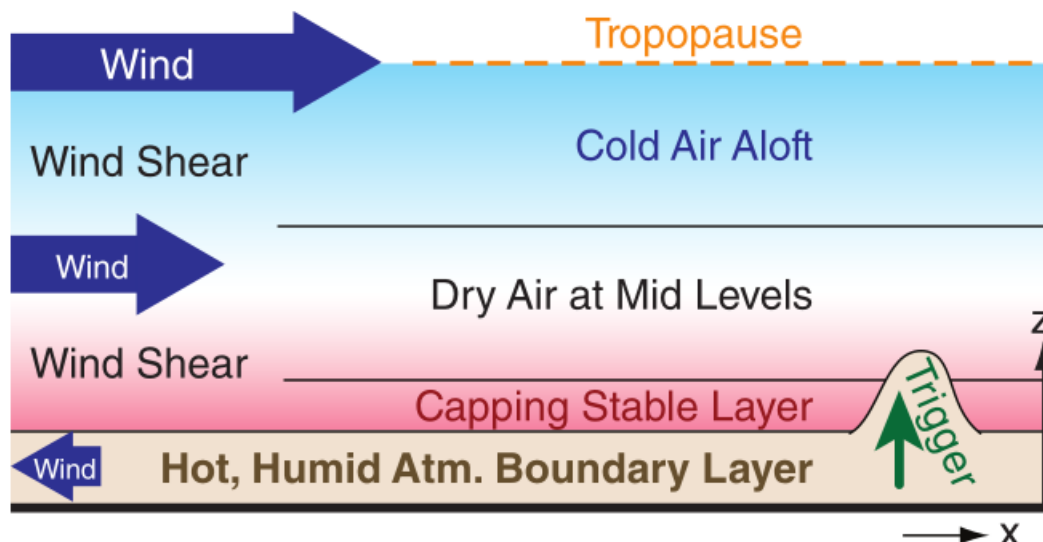
As células individuais de tempestades são características de nuvens cumulonimbus de massa de ar. Se caracterizam por um ciclo de vida curto, de algumas horas, sendo limitadas em área e em deslocamento horizontal. Apesar de não produzirem fenômenos intensos, nas regiões tropicais e no verão geram grandes acumulados de chuva (Nascimento, 2005). A intensidade e grau de desenvolvimento dessas nuvens de tempestades são dependentes diretamente da energia disponível para o levantamento (*buoyancy*) e do suprimento contínuo da umidade. Esse ar úmido provém da camada limite planetária (Stull, 2017), de forma que se houver algum processo que interrompa esse suprimento de vapor de água, a nuvem perderá a capacidade de continuar a se desenvolver.

Após o levantamento inicial de ar, as condições ambientais vão determinar a subsequente evolução. Dos parâmetros já elencados, o cisalhamento do vento na vertical exerce a maior influência no tipo de tempestade que irá se desenvolver (Markowski & Richardson, 2010). Conforme Stull (2017), o cisalhamento de vento é fator que permite às tempestades severas terem maior tempo de duração pois há um contínuo suprimento de ar úmido. O que ocorre em ambientes com cisalhamento, principalmente, entre os níveis de 500 e 6.000 metros (Nascimento, 2005), ou ainda, o preditor 0-6 km do centro *Storm Prediction Center* (SPC) da NOAA¹¹, é a dissociação espacial entre as correntes ascendentes e descendentes. O SPC ainda usa os preditores de cisalhamento vento por velocidade entre os níveis 0-2 km e 4-6 km para discriminar tempestades que podem ou não desenvolver tornados. Logo, ambientes com cisalhamento de vento são propícios ao desenvolvimento de sistemas de tempestades multicelulares (Nascimento, 2005). A Figura 4 apresenta todos os fatores para o desenvolvimento convectivo.

ametsoc.org/wiki/Microburst.

¹¹ Mais informações em <https://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/help/begin.html>.

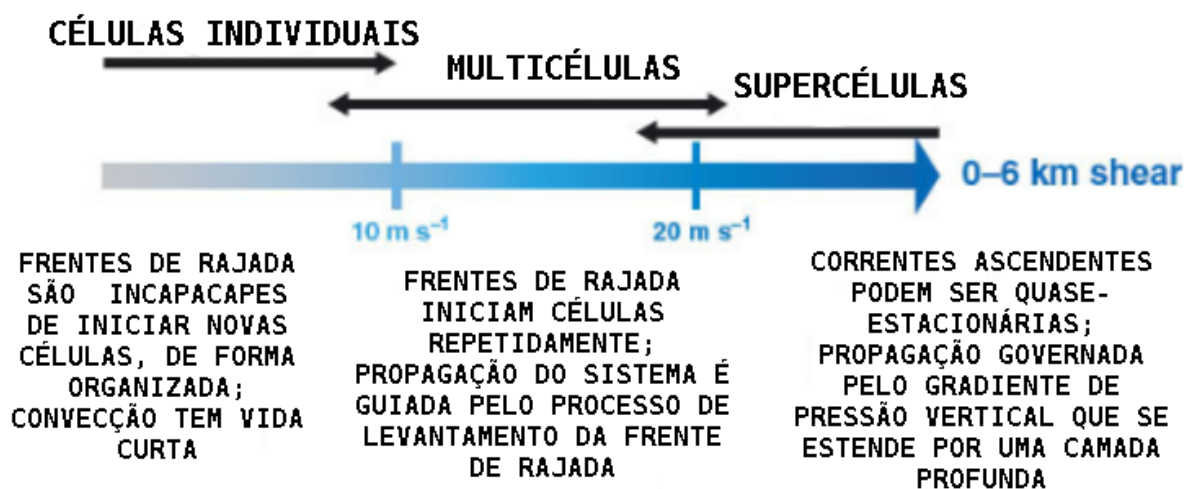
Figura 4 – Condições ambientais associadas a tempestades intensas: camada limite planetária (*boundary layer*) com ar úmido e quente; mecanismo dinâmico para levantamento inicial - forçante (*trigger*); camada estável (*capping stable layer*); camada de ar mais seco em níveis médios (*dry air at mid levels*); ar frio em altos níveis (*cold air aloft*); cisalhamento do vento (*wind shear*).



Fonte: Stull (2017).

Como já fora explanado, o cisalhamento do vento é um dos fatores contribuintes para nuvens cumulunimbus produzirem tempestades organizadas e/ou com capacidade de rotação. O cisalhamento nos ambientes sinótico e de mesoescala podem levar ao desenvolvimento de supercélulas e de sistemas convectivos de mesoescala (SCM) (Stull, 2017). A caracterização de SCMs será vista adiante.

Figura 5 – Tipos de tempestades (células individuais, multicélulas, supercélulas) em função do cisalhamento vertical do vento.



Fonte: Adaptado de Markowski & Richardson (2010).

A Figura 5 apresenta os três tipos de tempestades referidas, células indivi-

duais, multicélulas e supercélulas, quanto à relação ao cisalhamento vertical do vento. Especificamente, as supercélulas se caracterizam por apresentarem mais de uma região de correntes ascendentes em rotação, o que pode resultar em tornados (Ahrens, 2013). E, se conjugado ao cisalhamento de vento em níveis baixos, o suprimento de ar quente e úmido não é interrompido por correntes descendentes. Então, o cisalhamento é essencial para tempestades severas e com tempo de vida mais longo. Por isso, conforme mencionado anteriormente, o centro SPC da NOAA calcula o cisalhamento para diferentes camadas, com o intuito de rastrear ambientes propícios ao desenvolvimento de supercélulas e com probabilidade de gerar tornados. Os tornados são a característica mais violenta associada a tempestades severas e, se caracterizam, basicamente, por (Silva Dias, 2011):

- Vida útil curta (geralmente de alguns minutos a 20 min);
- Curto caminho de deslocamento (geralmente menos de 20 km); e,
- Pequenas dimensões espaciais (algumas centenas de metros de diâmetro).

2.2.1 Sistemas Convectivos de Mesoescala

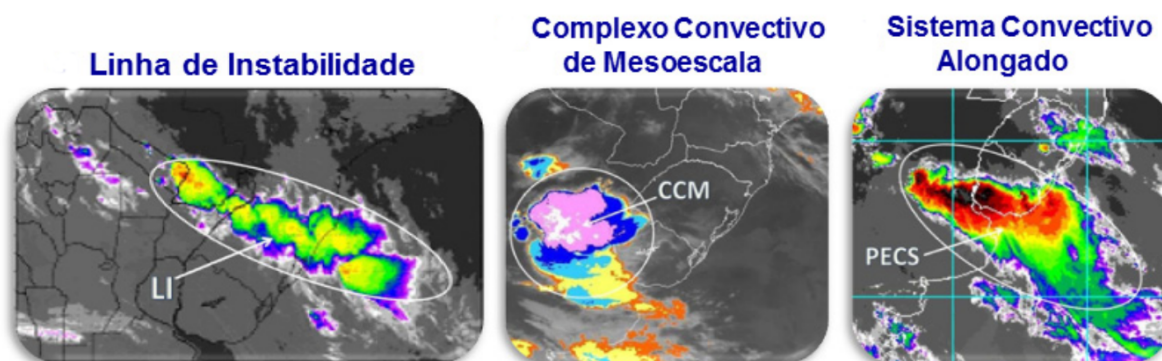
As células de nuvens convectivas de tempestades individuais podem se organizar em sistemas mais complexos ou linhas, que irão se estender por áreas maiores e/ou perdurar por mais tempo. Nesses casos há um ambiente de escala maior que provê condições dinâmicas para o desenvolvimento e intensificação desses sistemas (Markowski & Richardson, 2010). Esses conjuntos de aglomerados de células convectivas são conhecidos com sistemas convectivos de mesoscala (SCM), em inglês, *mesoscale convective systems*. SCMs são descritos como um agrupamento organizado de tempestades nos trópicos e nas latitudes médias e que pode se estender por milhares de quilômetros quadrados (Schumacher & Rasmussen, 2020). O autor Markowski & Richardson (2010) traz como definição aquela encontrada no glossário da Associação Americana de Meteorologia: um conjunto de tempestades que produz precipitação contínua sobre uma área com escala horizontal de 100 km em uma direção. Esse valor de escala é aquela em que a aceleração de Coriolis se torna significativa.

Os sistemas convectivos de mesoscala podem ser subclassificados em, conforme Markowski & Richardson (2010): linhas de instabilidade ou sistemas convectivos quase-lineares¹²; *bow echoes*; e, complexos convectivos de mesoscala (CCM). A organização e intensificação desses sistemas de tempestades ocorrem, basicamente, pela combinação de processos de convecção úmida profunda e por cisalhamento vertical do vento. A Figura 6 apresenta um esquema organização de três sistemas convectivos

¹² Os sistemas convectivos quase-lineares são uma associação entre linhas de instabilidade e *bow echoes* (Trapp et al., 2005).

de mesoescala: linha de instabilidade, complexo convectivo de mesoescala (CCM) e sistema convectivo alongado.

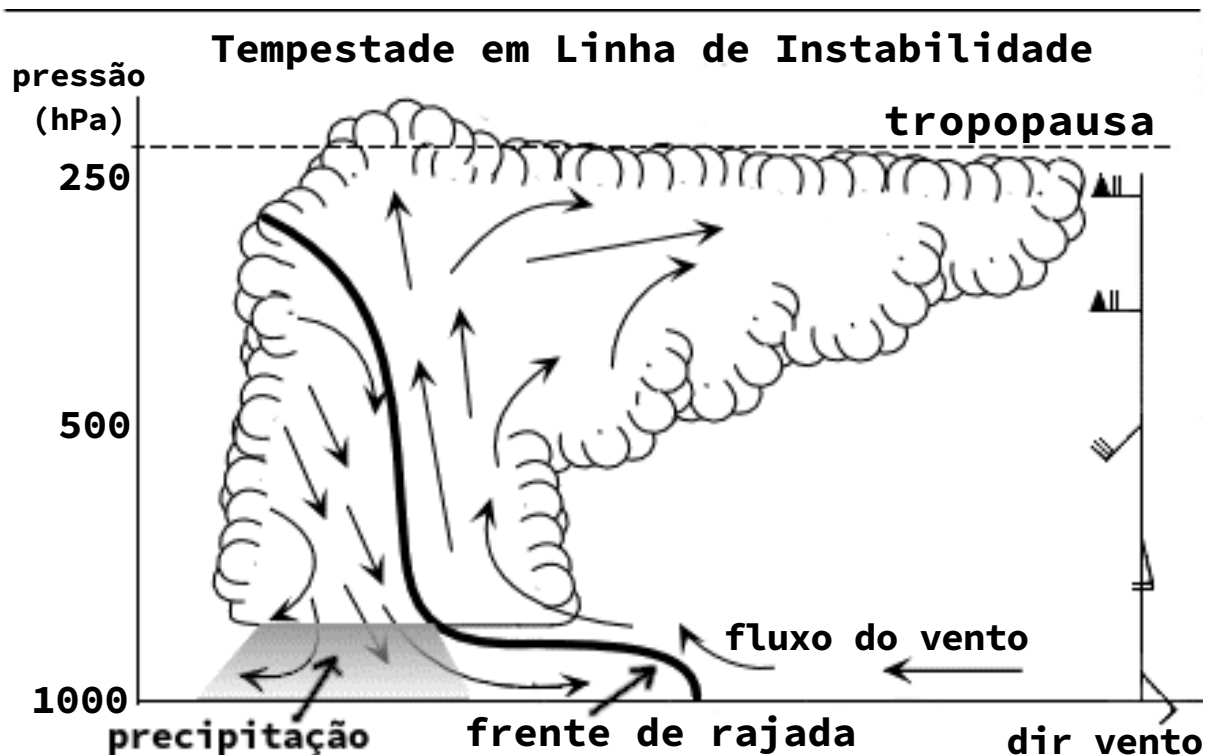
Figura 6 – Três formas de organização de sistemas convectivos de mesoescala vistos em imagens de satélite.



Fonte: Reboita et al. (2012).

A linha de instabilidade, que em inglês, é conhecida como *squall line*, é um tipo de sistema convectivo de mesoescala no qual um mecanismo de ativação linear, como uma frente fria, linha seca ou frente de rajada faz com que nuvens de tempestades entrem num arranjo de uma linha longa (Stull, 2017). A organização multicelular de cumulonimbus ocorre em uma faixa relativamente estreita, que pode se estender por centenas de quilômetros, caracterizando-se por variação brusca na direção do vento e condições de tempo extremas (rajadas de vento, granizo, tornados, etc). Se formam ao longo e adiante de frentes frias, no ar quente, distando em torno de 100 a 300 km e são as do tipo linhas de tempestades pré-frontais, um dos sistemas mais intensos nas latitudes médias (Reboita et al., 2012; Ahrens, 2013). Essas linhas se caracterizam como distúrbios autopropagados através de correntes descendentes de tempestades, “podendo formar uma pseudofrente fria entre o ar resfriado pela chuva e uma zona livre de chuva dentro da mesma massa de ar” (Barry & Chorley, 2013, p. 252). A Figura 7 apresenta um esquema de trovoadas numa vista lateral que mostra o processo da frente de rajada e que é fator para gênese de novas células na direção de deslocamento da linha. A convergência de ar úmido e o cisalhamento vertical do vento são fatores que resultam num sistema mais intenso e duradouro.

Figura 7 – Esquema de uma trovoadas em uma linha de tempestades e eventos atmosféricos associados.



Fonte: Adaptado da fonte disponível em [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(G1\)/guides/mtr/svr/mod1/line/squall.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(G1)/guides/mtr/svr/mod1/line/squall.rxml). Acesso em: 15 jul. 2024

Os complexos convectivos de mesoescala (CCMs) constituem sistemas de convecção organizada e profunda com ciclo de vida bem definido e identificados em imagens satélite como área relativamente circular. A definição, inclusive, leva em conta o padrão de organização, área e nível de brilho em imagens de satélite do canal do infravermelho. Os CCMs que se desenvolvem nos subtrópicos, especialmente Norte da Argentina, Paraguai e Oeste da Região Sul do Brasil possuem origem e ciclo de vida maior que aqueles dos trópicos. A formação desses sistemas nos subtrópicos está intimamente ligada à circulação do jato de baixos níveis que flui da bacia Amazônica em direção à região do norte da Argentina (Salio et al., 2007). O jato é melhor caracterizado durante noite-madrugada, vindo a ser também referido em inglês como *nocturnal low-level jets* (NLLJ). Os sistemas convectivos que são associados a esta dinâmica apresentam condições para a produção de eventos intensos durante o seu desenvolvimento e maturação.

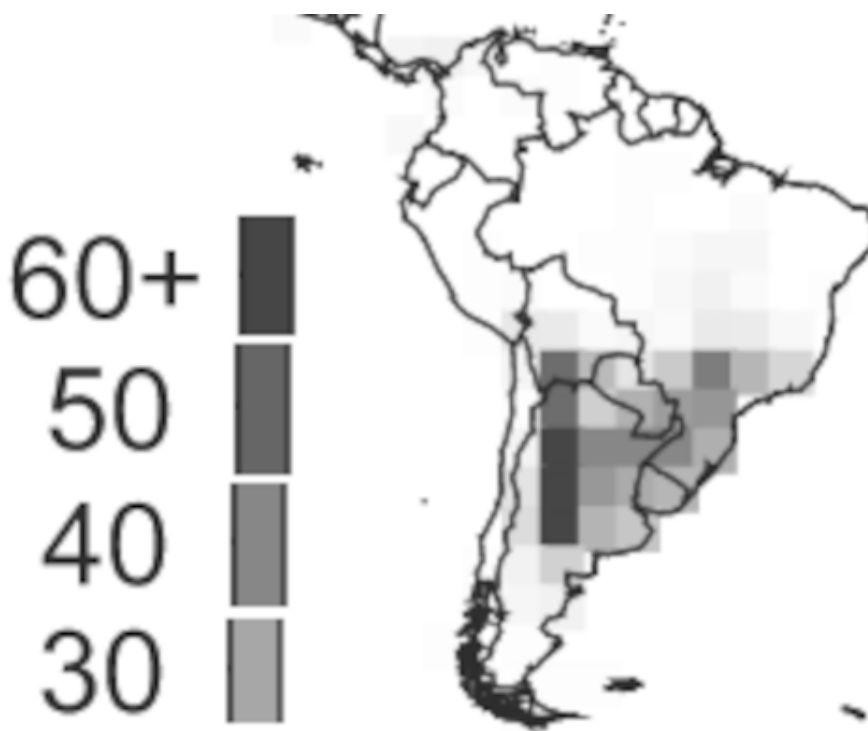
As frentes frias, principalmente as de deslocamento rápido, também podem propiciar o desenvolvimento de cumulonimbus com capacidade para gerar eventos destrutivos. Os sistemas apresentados são os principais e mais característicos quanto a produzir tempestades severas. Contudo, condições de circulação atmosférica, como

áreas de convergência/divergência, e orografia íngreme também podem suscitar tempestades violentas.

2.2.2 Climatologia de Tempo Severo

Nesta seção, o termo climatologia será usado no sentido da predominância de ocorrência de determinados fenômenos e não na concepção formal do termo na ciência meteorológica. Os autores Brooks et al. (2003), em seu estudo para o globo, indicaram que o Sul do Brasil e Norte da Argentina apresentam ambientes e condições propícias para o desenvolvimento de tempestades severas e de tornados. A Figura 8, que trata do número de dias com parâmetros favoráveis ao desenvolvimento de tempestades, mostra que os estados do PR e as porções Oeste do RS e SC têm mais dias com probabilidade de tempestades. A bibliografia também aponta um aumento do reporte de ocorrência de tornados nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil (Silva Dias, 2011).

Figura 8 – Dias com parâmetros favoráveis ao desenvolvimento de tempestades.

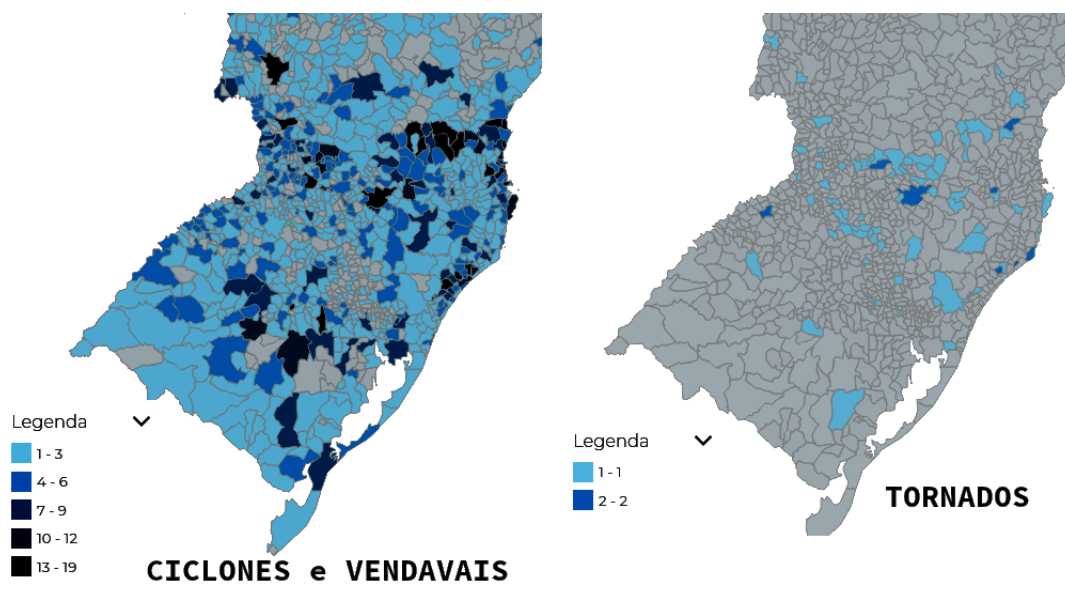


Fonte: adaptado de Brooks et al. (2003).

Ainda, considerando estatísticas de tempo severo, a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil/Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional (Secdec/MIDR) publica o Atlas Digital de Desastres no Brasil (MIDR, 2023). O respectivo atlas contém dados históricos sobre desastres no Brasil entre os anos de 1991 e 2024, sendo constantemente atualizado. As Figuras 9 e 10 contém, respectivamente, dados de ciclones, vendavais, tornados, chuvas intensas e granizo. Os dados das imagens

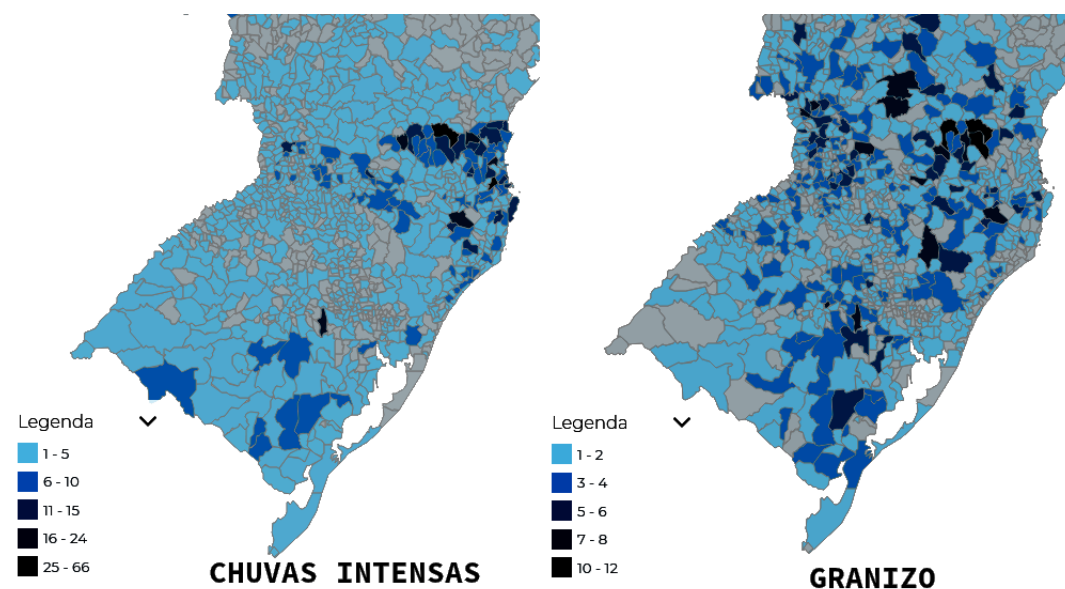
demonstram a frequência de ocorrência de fenômenos intensos associados a tempestades intensas, como tornados, vendavais, chuvas intensas e granizo sobre os três estados da Região Sul.

Figura 9 – Eventos de Ciclones, Vendavais e Tornados (Atlas Digital de Desastres no Brasil (1991-2024)).



Fonte: Adaptado de MIDR (2023).

Figura 10 – Eventos de Ciclones, Vendavais e Tornados (Atlas Digital de Desastres no Brasil (1991-2024)).



Fonte: Adaptado de MIDR (2023).

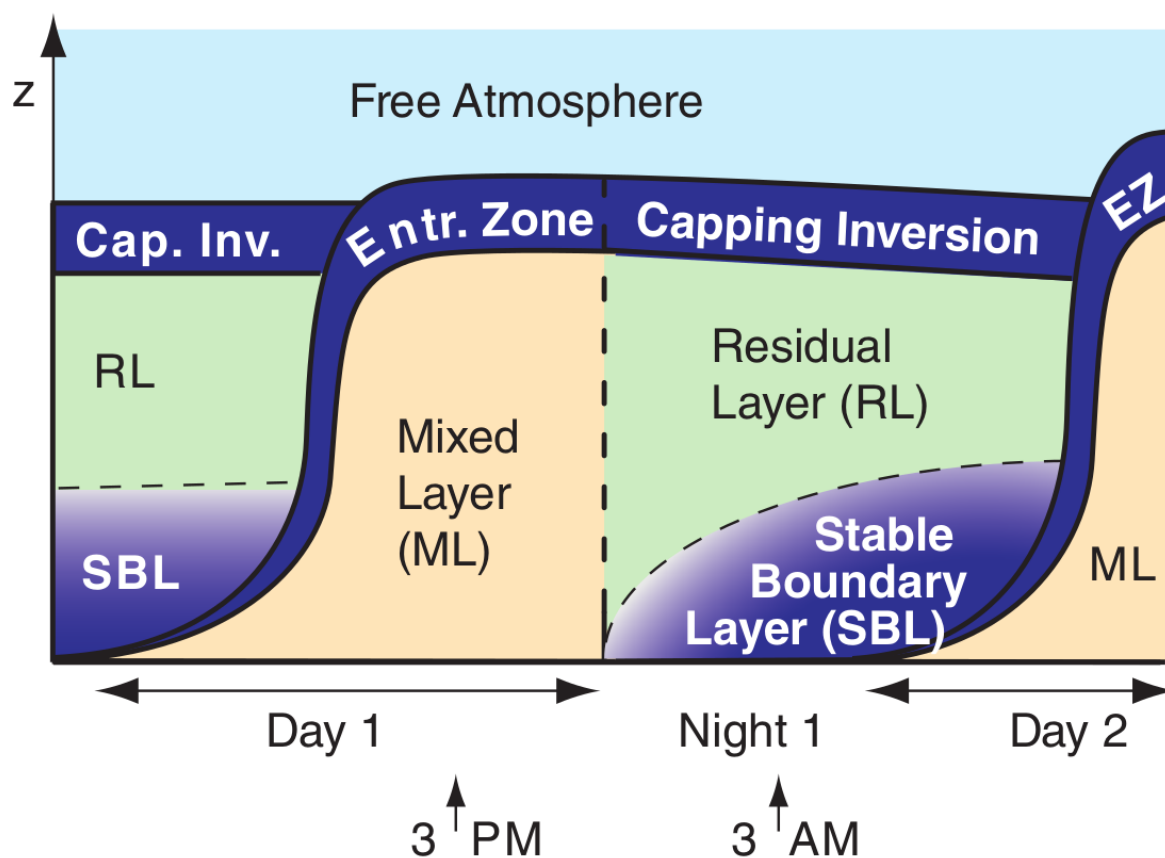
2.3 Camada Limite Planetária

A camada limite planetária (CLP) ou atmosférica, em inglês, referida como *Atmospheric Boundary Layer* (ABL), é a parte da atmosfera que é influenciada dire-

tamente pela presença da superfície terrestre e responde às forçantes de superfície com escala de horas ou menos (Stensrud, 2009). Os fluxos de energia da camada superficial determinam os processos de mistura turbulenta e de espessura da CLP logo acima e são devidos ao aquecimento e resfriamento radiativos e ao efeito da fricção na camada superficial. A CLP pode ser rasa, com poucas dezenas de metros, até alguns quilômetros e sua dinâmica responde à evolução do dia e noite mas também a fenômenos de diferentes escalas.

Em condições atmosféricas estáveis sobre uma região, a estrutura e evolução da camada limite planetária se dá em resposta à variação diuturna sobre o local. A Figura 11 destaca o processo de variação para dois dias com ênfase para o meio do período da tarde (3 PM) e também para o meio do período da noite (3 AM). Durante o dia, em resposta à insolação que gera turbulência, ocorre um processo de transporte e mistura vertical de umidade, calor e momento.

Figura 11 – Variação diuturna da camada limite planetária em relação à estrutura vertical e caracterização de estabilidade. Durante o dia: a camada de inversão (*Capping Inversion*) dá lugar a uma zona de entranhamento (*Entrainment Zone*); as camadas estável (*Stable Boundary Layer* - SBL) e residual (*Residual Layer* - RL) vão sendo misturadas e se tornando uma única camada de mistura (*Mixed Layer* - ML). Durante a noite: a camada estável (SBL) vai se intensificando o que deixa um ar residual (RL) e que acaba produzindo uma camada de inversão.

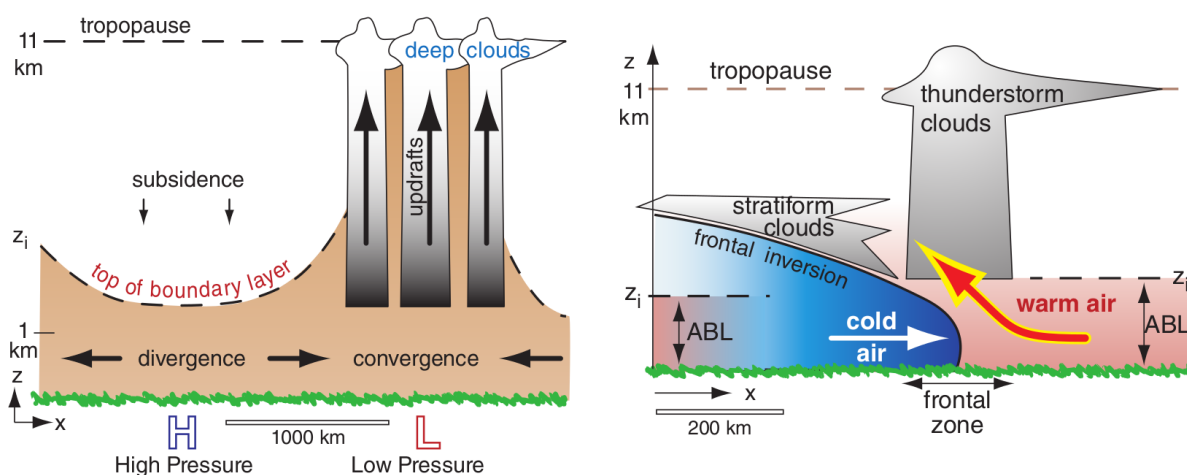


Fonte: Stull (2017).

A camada limite planetária estável (*Stable Boundary Layer* - SBL) tem início antes do por do Sol e se consolida durante a noite, vindo a desfazer-se através dos processos turbulentos gerados durante o aquecimento superficial matutino. A intensidade da inversão é dependente do processo de resfriamento da superfície e o limite superior delimita o início da camada residual (*Residual Layer* - RL). É dentro dessa camada que os jatos de baixos níveis circulam durante a noite e início da manhã pois estão associados à inversão térmica perto da superfície do solo (Luiz & Fiedler, 2024). Ainda, conforme mostrado na Figura 11, existem mecanismos que separam a camada limite planetária da atmosfera livre. À noite, é uma camada que limita através de uma forte inversão térmica (*Capping Inversion*). Durante o dia, há uma zona de entranhamento (*Entrainment Zone*), também caracterizada por estabilidade.

A CLP também responde a forçantes sinóticas. A Figura 12 contém duas imagens, sendo que a da esquerda indica a influência de sistemas de pressão de escala sinótica sobre a camada limite planetária. As altas pressões tendem a diminuir a espessura e também contribuem para o estabelecimento de forte inversão térmica. Já nas baixas pressões, que estão associadas normalmente a sistemas convectivos, a CLP perde sua característica de camada devido aos processos das correntes ascendentes. Na mesma figura, a imagem à direita apresenta o esquema de um sistema frontal e o reflexo na organização e estrutura vertical da CLP.

Figura 12 – Influência de dois sistemas sinóticos sobre a estrutura vertical e organização da CLP (ABL). Imagem à esquerda: sistemas de pressão alta (*High Pressure*) e baixa (*Low Pressure*), com movimentos atmosféricos de divergência, convergência, subsidência e com correntes ascendentes (*updrafts*). Imagem à direita: frente fria, com movimentos horizontais de ar frio e quente e impacto na altura da CLP (ABL). São mostradas a zona e a inversão frontais além de sistemas de nuvens estratiformes e nuvens de tempestades (*thunderstorm*).



Fonte: Stull (2017).

2.4 Previsão Numérica de Tempo (PNT)

Modelos numéricos de previsão de tempo, em inglês, *Numerical Weather Prediction* - NWP, constituem a ferramenta essencial para estimar o estado futuro da atmosfera e prever fenômenos atmosféricos. Podem ser usados para prognosticar as condições meteorológicas para tempos curtos (de 6 até 24 h), até dias e, para anos ou décadas, no caso de modelos climáticos. Os modelos numéricos permitem prever os principais fenômenos atmosféricos, como precipitação e nebulosidade a partir do prognóstico futuro das principais variáveis atmosféricas, como vento, temperatura, densidade (pressão) e umidade.

O processo de modelagem numérica parte do instante no tempo no qual o estado da atmosfera deve ser quantificado o mais preciso possível. Esse instante corresponde ao conjunto de observações atmosféricas globais, tanto do ar quanto à superfície (terrestre e oceânica). Sobre esses dados são aplicadas um conjunto básico de equações que prognosticam o estado futuro da atmosfera através das mudanças sobre as variáveis atmosféricas. Basicamente, os processos atmosféricos são governados por um conjunto de equações que são referidas coletivamente como primitivas: conservação do momento por unidade de massa¹³ (segunda lei de Newton); conservação da energia termodinâmica por unidade de massa (calor); conservação da umidade por unidade de massa (equação da substância água); conservação de massa (equação da continuidade de massa); e, equação de estado (lei do gás ideal). A conservação do momento, de calor, umidade e massa são tratadas por equações prognósticas, cujas mudanças nas variáveis são em relação ao tempo. A equação de estado é diagnóstica, pois não é função do tempo. Essas sete equações tratam das variáveis básicas que descrevem o estado atmosférico através das seguintes variáveis: U ¹⁴, V , W , T , r_T , ρ e P . As variáveis U , V e W são as três componentes do vento, T a temperatura do ar, r_T , a razão de mistura total (umidade), ρ , a densidade do ar e P , a pressão atmosférica.

A solução analítica das equações não é possível e, para tratar dessa dificuldade há três opções (Stull, 2017, p. 749): a) encontrar a solução analítica exata das versões simplificadas (aproximadas) das equações governantes (primitivas); b) conceber um modelo físico simplificado e adotar as equações exatas para a solução; ou, c) encontrar solução numérica aproximada para todas as equações governantes. Notadamente, a terceira opção acabou sendo adotada, na qual as equações do movimento são substituídas por aproximações numéricas cuja discretização no espaço ocorre em uma grade tridimensional e, no tempo, em passos de tempo finitos. A aproxi-

¹³ As equações de movimento se desdobram em três, uma para cada direção do vetor tridimensional (U , V e W).

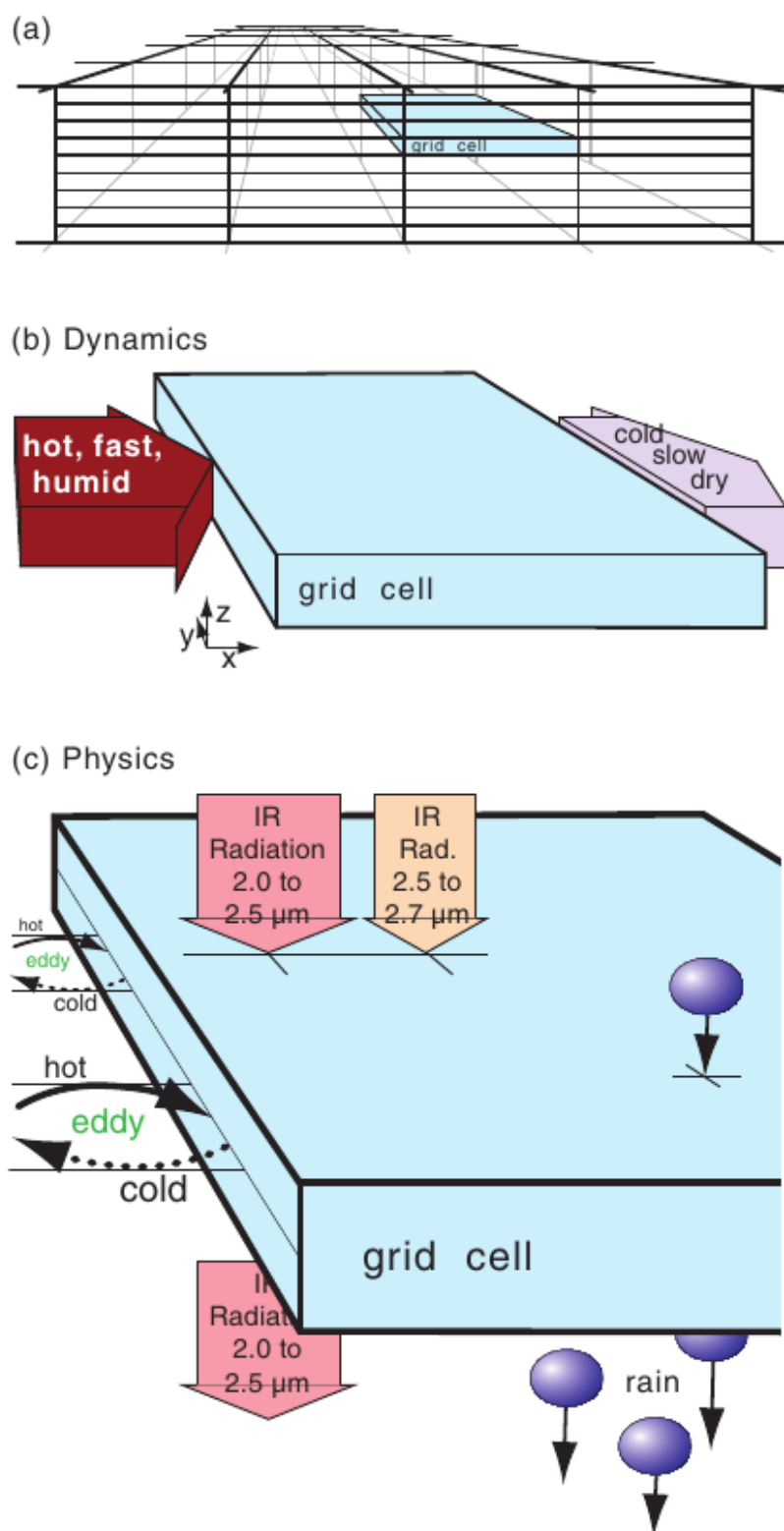
¹⁴ As letras indicadoras das variáveis segue conforme a literatura consultada (Stull, 2017).

mação numérica para a previsão de tempo inclui os seguintes elementos (Stull, 2017, p. 750): o domínio sendo previsto, os sistemas de mapeamento e de coordenadas e a representação dos dados.

O domínio de previsão, ou seja, o volume atmosférico é dividido em células tridimensionais discretas, com dimensão horizontal muito maior que a dimensão vertical. A parte da **dinâmica** em um sistema de previsão numérica se refere às porções resolvíveis das equações do movimento (vento), estados termodinâmicos e de umidade. Uma variável é dita resolvível quando pode ser representada pelo estado médio dentro de uma célula da grade tridimensional. A Figura 13 esquematiza os três elementos de um sistema numérico: domínio, na forma de grade tridimensional; dinâmica; e, física.

A grade de domínio trata dos esquemas numéricos de diferenças finitas para discretização espacial das equações primitivas. Uma consequência importante da discretização é que processos físico-químicos em escala de subgrade não são resolvidos pelas equações, além da dependência de condições iniciais e de contorno. A dinâmica trata das seguintes características da modelagem numérica: esquemas de integração temporal; advecção horizontal e vertical; termo de Coriolis; contorno lateral (modelos regionais); e, difusão horizontal. A configuração da grade que está associada aos processos de discretização é também uma característica própria de cada modelo e a organização do domínio em termos de aninhamento, resolução e tamanho do domínio de execução irão refletir em como a dinâmica será aplicada na modelagem. A parte da **física** representa os demais processos que não são resolvidos pela dinâmica do modelo. Contudo, esses processos físicos tratam de importantes fenômenos da atmosfera terrestre e importantes à atividade humana, como a formação de nuvens e de precipitação, tempestades, a interação da radiação solar e terrestre, dentre alguns.

Figura 13 – Ilustração dos três elementos de um sistema de modelagem numérica: a) discretização espacial através de grade tridimensional (domínio), com destaque para um unidade de grade (*grid cell*); b) a parte da dinâmica do modelo que trata das equações do movimento (no exemplo, ar quente, úmido e rápido tendo modificada suas propriedades para ar frio, seco e lento); e, c) a parte da física com alguns fenômenos, como, radiação, precipitação e turbulência.



Fonte: Stull (2017).

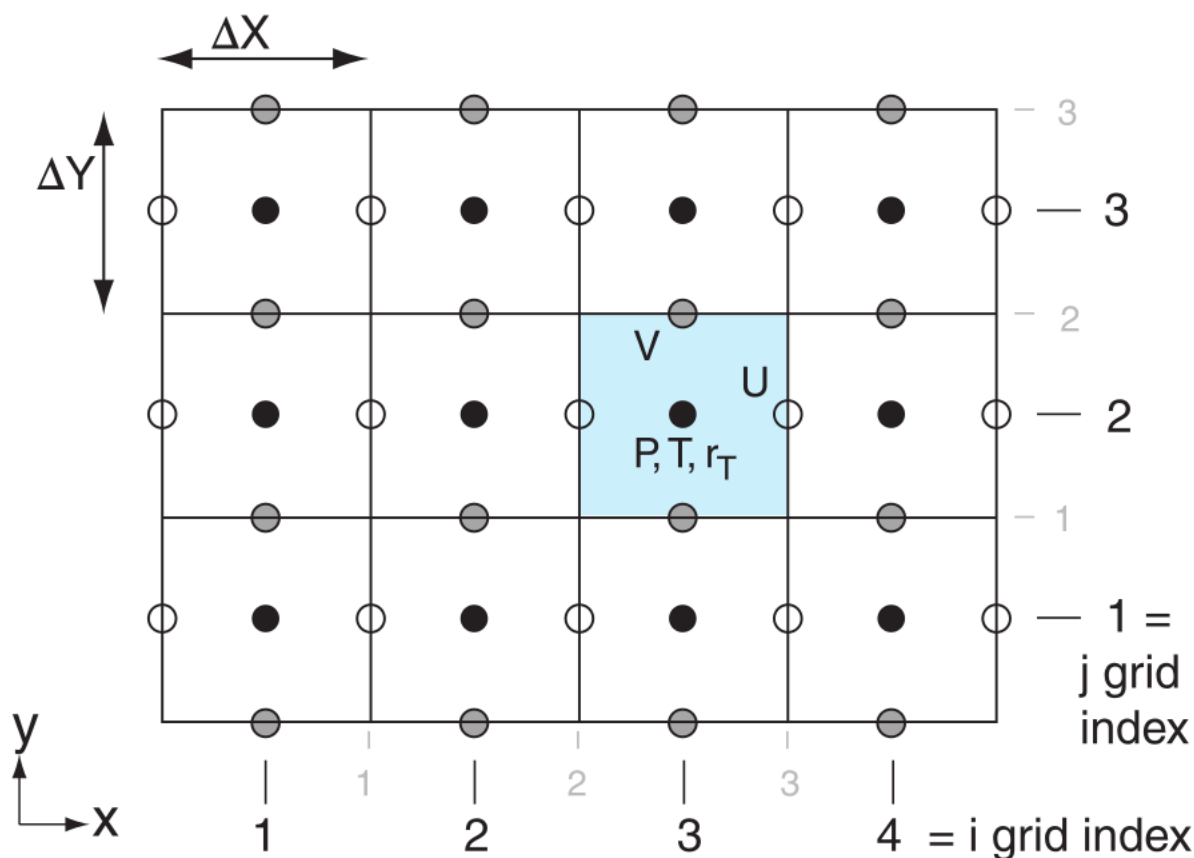
Um modelo numérico de PNT é constituído basicamente pelos seguintes módulos: pré-processamento; *solver*, unidade que trata da dinâmica e da física do modelo; e, pós-processamento. O pré-processamento trata da inicialização e da geração das condições iniciais¹⁵, que podem vir da assimilação de dados (observações) atmosféricos e/ou de modelos globais. Inclui informações e dados de temperatura de superfície do mar (*Sea Surface Temperature* - SST), relevo, cobertura e umidade do solo, dados de corpos de água interiores, para citar as mais importantes.

De forma geral, a discretização espacial ocorre, nos modelos de área limitada, em forma de grades retangulares¹⁶. Os cálculos dos principais parâmetros atmosféricos ocorre por interpolação nestes pontos de grade. À dependência do tipo de grade adotado, as variáveis atmosféricas são calculadas no centro, borda ou interseção das grades. A distância entre esses pontos determina a resolução espacial. A Figura 14 apresenta o esquema de organização de grade referida como C-Grid, dentre aquelas propostas por Arakawa. São usados as letras *i* e *j* para designar os índices dos pontos nas coordenadas *x* e *y*, respectivamente. A distinção (preenchimento) dos pontos indica em quais é calculada a respectiva variável meteorológica. Na imagem, as arestas calculam as componentes horizontais do vento enquanto o ponto central as variáveis de pressão, temperatura e razão de mistura.

¹⁵ As condições iniciais representam o estado inicial da atmosfera através dos valores iniciais das variáveis.

¹⁶ Atualmente estão sendo propostas grades com outros formatos, além do retangular/quadrado.

Figura 14 – Arranjo e organização dos pontos de grade e dos índices em um esquema de grade bidimensional Arakawa (C-Grid).



Fonte: Stull (2017).

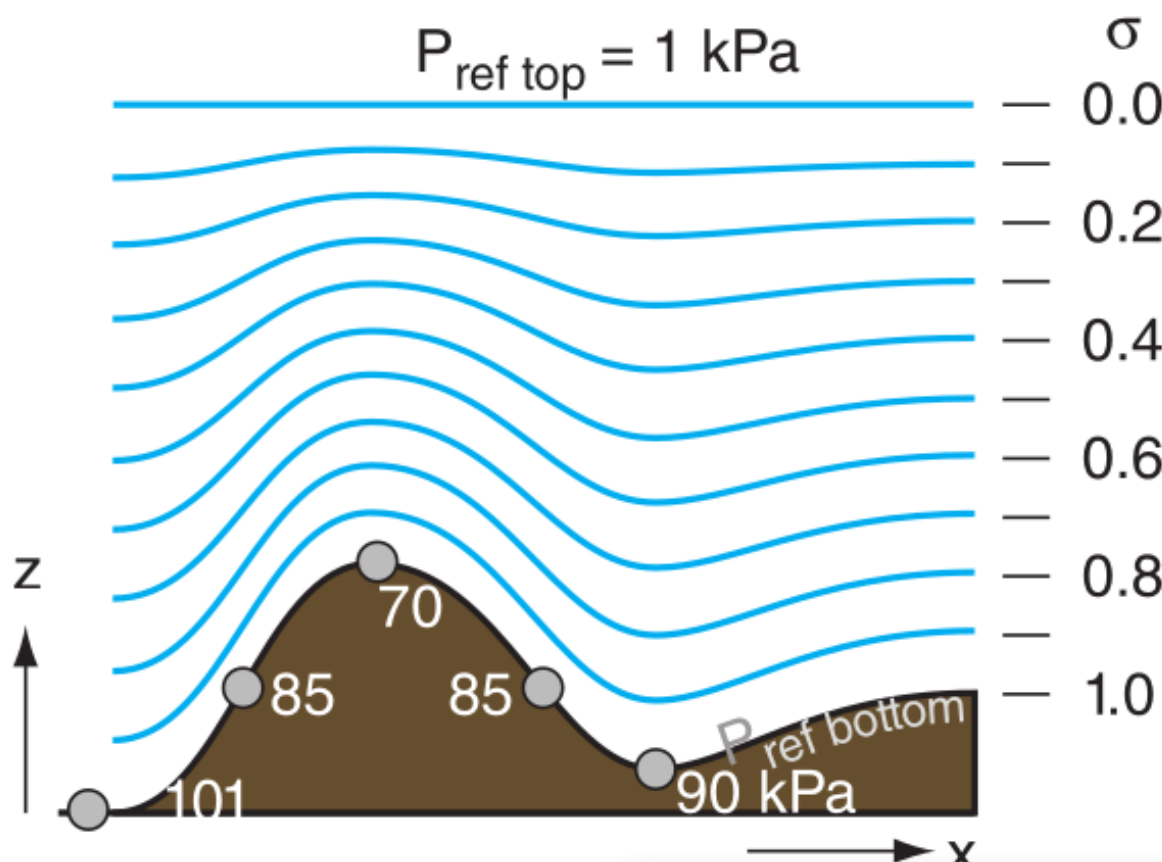
Os modelos de previsão numérica são classificados genericamente em globais e regionais¹⁷. O requisito para um maior detalhamento da atmosfera e que requer maior nível de discretização horizontal e vertical pode inviabilizar o tempo de processamento. Foram criados modelos de área limitada, em inglês, *limited-area model* (LAM), que se destacam por maior resolução espacial sobre um limite geográfico. Eles são uma opção para realizar tanto experimentos quanto execução operacional de grades com maior nível de detalhamento. O seu uso tem sido disseminado pois contempla o objetivo básico que é reduzir os erros dos modelos ao reduzir a resolução horizontal (Pu & Kalnay, 2018). Esses modelos, ao serem limitados por uma determinada região geográfica permitem definir esquemas de física mais apropriados às condições de clima, relevo e vegetação da área. Além disso, a resolução espacial horizontal exerce papel importante na acurácia das simulações numéricas de eventos meteorológicos de curta duração, como tornados, precipitações intensas, ventos fortes com rajada e

¹⁷ A classificação é também hierárquica, pois os modelos regionais, também referidos como modelos de área limitada, estão aninhados em modelos de circulação global. Mas há outros modelos que estão fora do escopo do trabalho.

granizo (Bryan et al., 2003; Liang et al., 2019; Macatangay et al., 2016; Meroni et al., 2021; Potvin & Flora, 2015). Então, em geral, se buscam configurações de modelos regionais com resoluções espaciais mais altas. Contudo, há algumas questões que surgem com a execução desses tipos de modelos.

A primeira consideração é quanto à necessidade de dados iniciais e dados de borda, em inglês, *Lateral Boundary Conditions* (LBCs), para todo o período de previsão. O uso operacional deve levar em conta que o modelo regional só pode ter sua execução iniciada após o término do ciclo do modelo global (assimilação, previsão, geração das saídas e disponibilização). Uma outra característica dos modelos regionais é o requisito dos refinamentos de grade através de processo de *nesting*, que é o encaixe de grades menores, mas de resoluções mais altas dentro de grades externas. O domínio encaixado (*nest*) é controlado, nas suas fronteiras laterais, pelo domínio maior (*parent*). Surge, então, a questão do tratamento das bordas laterais nas grades, ou seja, como a previsão mais refinada vai influenciar o domínio externo. Existem duas opções básicas: interação *one-way*, na qual a informação flui apenas em uma direção, do domínio externo para a grade interna; e, interação *two-way*, na qual o fluxo de dados flui nas duas direções. Em suma, modelos de área limitada, ao implementarem as condições LBCs e *nesting*, são impactados em sua acurácia durante as previsões numéricas.

A discretização espacial da solução das equações das primitivas também ocorre na vertical. Os modelos regionais de PNT, pela maior resolução espacial horizontal, são impactados pelo relevo. Então, foi proposto um tipo de coordenada que segue o relevo do terreno e que foi referida como σ (*sigma*). A Figura 15 apresenta uma ilustração do processo de coordenadas verticais *sigma*. Ela é baseada em pressões hidrostáticas de referência no solo e no topo do domínio, de forma que recebe o valor um (1), perto do solo, e zero (0) no topo. Então, os níveis σ na vertical vão de 1 até 0. A pressão de referência na superfície varia horizontalmente devido elevação terreno e varia no espaço e no tempo devido alteração dos padrões de sistemas de tempo (Stull, 2017, p. 746). Sistemas de previsão de área limitada, como o WRF, adotam as coordenadas híbridas, que usam as coordenadas *sigma* perto do solo, seguindo o terreno, mas coordenadas de pressão constante em níveis médios e altos da atmosfera.

Figura 15 – Seção vertical da atmosfera com destaque para as linhas de coordenadas verticais.

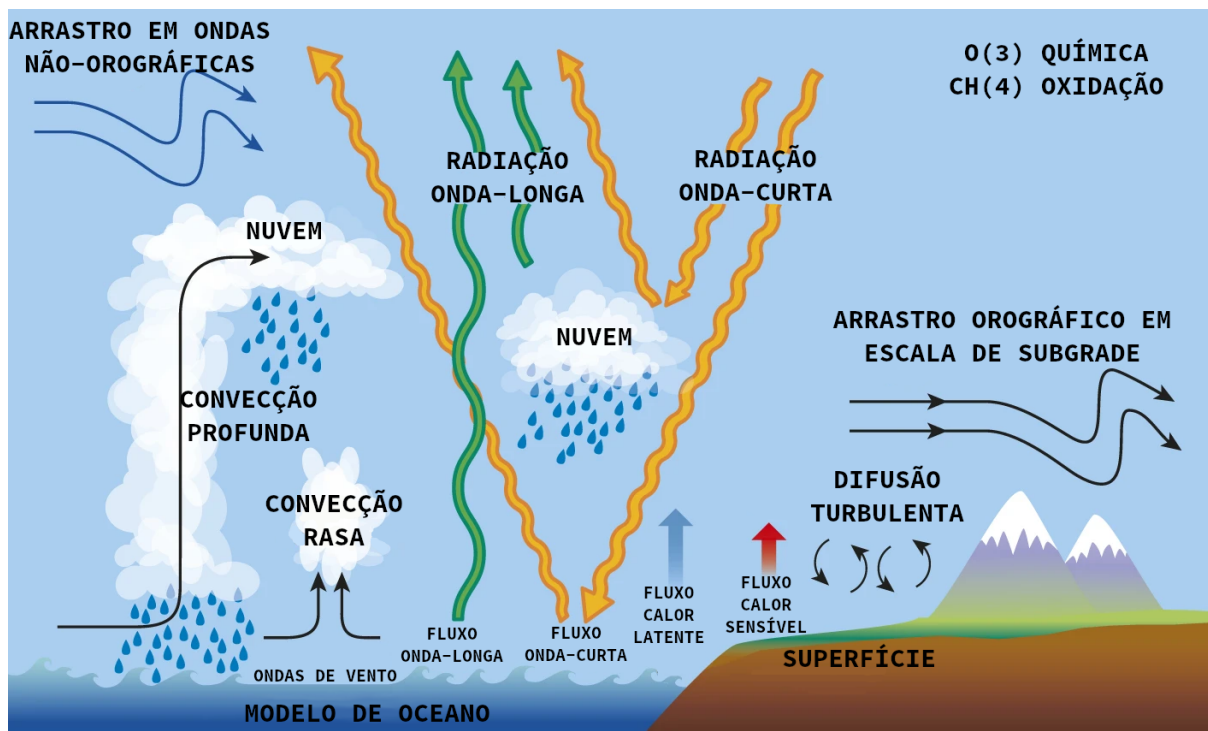
Fonte: Stull (2017).

2.4.1 A Física dos Modelos PNT e Parametrizações

Os modelos numéricos (PNT) contêm a parte da física da atmosfera e das interações com os outros componentes do sistema, como o oceano e a superfície terrestre. A Figura 16 esquematiza e discretiza os principais processos físicos no sistema atmosfera, oceano e superfície terrestre. Esses processos se caracterizam por (Stull, 2017):

- Não são previstos pelas equações de movimento;
- Não são bem entendidas do ponto de vista da física apesar de seus efeitos poderem ser medidos;
- A escala de resolução do movimento ou das partículas é muito pequena (escala de subgrade) que não pode ser resolvida em escala de grade dos atuais modelos; e/ou
- Suas interações são tão complexas que exigiriam computação além da disponível (Warner, 2011).

Figura 16 – Principais processos físicos que não são resolvíveis pelas equações dos modelos numéricos e que requerem algum processo de parametrização.



Fonte: Adaptado de Bauer et al. (2015).

A solução mais amplamente adotada por modelos PNTs para tratar os processos físicos é por meio da parametrização. A **parametrização** é definida como a aproximação física ou estatística de um processo físico por um ou mais de seus termos ou fatores (Stull, 2017). Parametrizar um efeito físico como a turbulência é aproximar seus efeitos no lugar de simular a complexa física dos mesmos. São importantes pois influenciam as previsões do modelo e interagem entre elas indiretamente via mudanças nas variáveis do modelo (Stensrud, 2009). Os principais processos que demandam esquemas de parametrização (Stensrud, 2009; Pu & Kalnay, 2018): processos de interação entre atmosfera e solo; processos de interação entre atmosfera-vegetação-solo; processos de interação entre atmosfera-superfícies líquidas; camada limite planetária, no inglês, *Planetary Boundary Layer* (PBL); processos turbulentos; processos convectivos; microfísica de nuvens e precipitação; radiação e processos químicos; arrasto devido à orografia e arrasto devido a ondas gravitacionais (produzidas por convecção profunda, frentes, etc); para citar os mais importantes.

Alguns processos físicos subgrade podem ser resolvidos diretamente pela dinâmica do modelo em caso de mudança de escala, como por exemplo, a parametrização de nuvens cumulus. Nos modelos globais e modelos regionais de resolução mais baixa requerem uso de esquemas de parametrização de nuvens cumulus. Existe uma faixa de resolução espacial entre um e dez quilômetros que é conhecida como

zona cinza da parametrização de cumulus, pois ambas, a parametrização e a solução explícita são problemáticas (Liang et al., 2019). Nas resoluções mais altas, em torno de um a três km, ou ainda mais altas, a convecção pode ser resolvida diretamente pelo modelo. Os autores Liang et al. (2019) encontraram problemas de acuracidade quando eram usadas grades com tamanhos intermediários, no caso, entre três e dez km.

2.4.2 Parametrizações de Processos Físicos no ARW-WRF

Nesta seção serão apresentados alguns aspectos da implementação e suporte à parametrizações no modelo *Advanced Research Weather Research and Forecasting* (ARW-WRF¹⁸) (Skamarock et al., 2021). O WRF é um sistema para previsão numérica de tempo que pode ser usado para diversos tipos de aplicações, dentre elas, pesquisas e em previsões de centros meteorológicos operacionais. Como é um modelo regional, os benefícios de sua execução são explorados quando se definem domínios com alta resolução espacial, que permitem endereçar configurações de terreno com maior resolução espacial além de permitir reproduzir fenômenos de escala menor, como sistemas de tempestades. A caracterização do WRF será apresentada na Seção 4.3.1 contida no capítulo da metodologia.

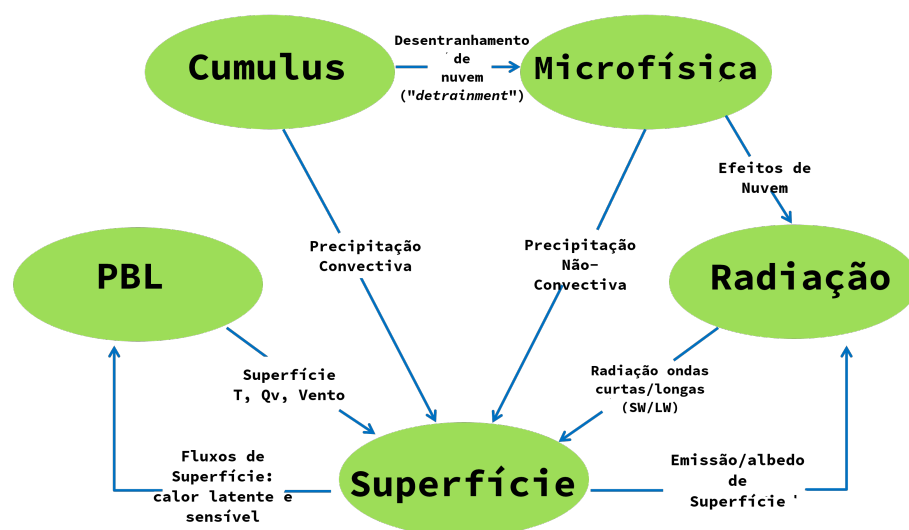
A Figura 17 apresenta os principais módulos da física do modelo WRF (Skamarock et al., 2021), incluindo as interações entre os processos físicos. Esses processos são modelados e tratados através de esquemas de parametrização, cuja execução e resultados são importantes pois influenciam fortemente as previsões do modelo numérico e interagem entre si indiretamente através das mudanças das variáveis de estado do modelo (Stensrud, 2009, p. 35). O sítio de documentação da física do WRF¹⁹ apresenta referências e opções para a física de modelo, especificamente, para *Micro Physics*²⁰, *PBL Physics*, *Cumulus Physics*, *Radiation Options*, *Land Surface*, *Shallow Convection*, *Surface Layer*, *Urban Physics*, *Ocean Options*, LES (Large Eddy Simulations) além de outras opções.

¹⁸ Doravante, será usado o termo WRF para designar o modelo ARW-WRF.

¹⁹ Disponível em https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_references.html. Acesso em 5 set. 2024.

²⁰ Serão usados os termos em inglês, conforme constam da documentação.

Figura 17 – Diagrama que mostra as interações diretas entre os vários componentes da física do modelo WRF.



Fonte: Adaptado de Werner (2021).

Neste trabalho, serão objeto de pesquisa as parametrizações de microfísica e de camada limite planetária. Os esquemas²¹ de microfísica são usados para regular o processo de vapor d'água e a formação de gotas de chuva, neve e granizo dentro e fora das nuvens. O que distingue os vários esquemas e que resulta das dificuldades da física presente na formação das nuvens é a quantidade de fases da água incorporadas e as diferentes interações entre as diferentes partículas e a nuvem. Os processos de condensação, evaporação, colisão-coalescência de gotas, deposição de vapor sobre cristais de gelo que atuam sobre hidrometeoros e que podem chegar a seis tipos de mudanças de fase que a água pode passar durante sua entrada na atmosfera como vapor e o retorno como líquido ou sólido (granizo, neve) (Stensrud, 2009). Ainda tem a quantidade de categorias de hidrometeoros que podem estar presentes nos processos de nuvens, dentre as quais: gotículas de nuvem, gotas de chuva, granizo pequeno (*graupel*), granizo (*hail*), cristais de gelo e neve.

A complexidade dos processos de hidrometeoros em nuvens levou à criação de diversos esquemas de microfísica para o modelo WRF²². Em termos gerais, os esquemas são classificados como do tipo "*bin*" ou como "*bulk*" (Stensrud, 2009). Os esquemas do tipo "*bin*" são mais detalhados de forma que consideram curvas de distribuição estatística para cada tamanho/tipo de hidrometeoro, o que aumenta a demanda computacional. O tipo "*bulk*" usa distribuições estatísticas pré-computadas

²¹ A documentação do WRF refere o termo esquema para indicar as formulações específicas relativas a determinado processo físico sendo parametrizado. Em partes deste texto, os termos parametrização e esquema são usados com o mesmo significado.

²² Consta da documentação a relação de 27 esquemas de microfísica, conforme encontrados em https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/physics.html#microphysics. Ao longo da vida do WRF, novos esquemas vão sendo incorporados, resultantes de pesquisas mais recentes.

de tamanhos dos hidrometeoros, de forma que é computacionalmente mais rápido. Os esquemas de parametrização de microfísica adotam ainda métodos de computação referidos como momento simples (“*single-moment*”) e momento duplo (“*double-moment*”). Esquemas de momento simples tem uma única equação de predição para massa por tipo de hidrometeoro sendo que a distribuição do tamanho das partículas é derivada de parâmetros fixos. Esquemas do tipo momento duplo adicionam equação de predição para o número da concentração de hidrometeoros e inclui processos adicionais, como efeitos de aerossóis²³.

A camada limite planetária exerce papel fundamental na previsão de precipitação. A representação correta da CLP resulta em modelos com previsões mais acuradas de eventos extremos associados a chuva intensa (Avolio et al., 2017). A CLP foi definida na Seção 2.3 e aqui serão apresentados, de forma superficial, alguns aspectos relacionados à respectiva parametrização no modelo WRF. Os esquemas de parametrização de camada limite planetária (CLP) são fundamentais nos modelos numéricos, pois afetam diretamente os perfis de temperatura e umidade em níveis baixos, além de tratarem da evaporação, umidade do solo e trocas de calor. Especificamente, os esquemas de parametrização de CLP são responsáveis pelos fluxos verticais subgrade que são devidos ao transporte turbulento em toda a coluna atmosférica. A turbulência é devida ao escoamento, principalmente, quando há presença de cisalhamento do vento, e também tem origem nos processos convectivos. Os esquemas de parametrização de CLP têm como resultado a previsão da profundidade (extensão vertical) da CLP o que também determina os perfis verticais de temperatura, umidade e vento como função da resolução do estado e da turbulência (Stull, 2017, p. 751).

As parametrizações de CLP no WRF seguem um dos dois métodos de resolução da turbulência: energia cinética turbulenta (*Turbulence Kinetic Energy* - TKE) e diagnóstica não local. As classes baseadas em TKE resolvem a energia da turbulência em toda a coluna e tem como resultado a intensidade da turbulência por unidade de massa. Os esquemas não locais calculam o topo da camada de CLP e incluem termos para o cálculo do transporte de pequenos turbilhões (locais) mas também para o transporte realizado por turbilhões de maiores dimensões. Esses esquemas devem tratar a superposição de turbilhões de diferentes escalas de tamanho, o que apesar de obter maior acurácia, tem o problema do custo computacional da complexidade (Stull, 2017).

As nuvens cumulus têm papel fundamental no processo de desenvolvimento das tempestades e na produção de precipitação. Os processos físicos do ciclo de vida dessas nuvens também requerem resolução por parametrização, conforme apontado na Seção 2.4.1. A parametrização de nuvens cumulus trata basicamente dos efeitos

²³ Conforme encontrado na documentação do WRF em https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/physics.html#microphysics.

de nuvens cumulus em escalas subgrade. Conforme o diagrama da Figura 17, a física resultante da parametrização de cumulus afeta a precipitação convectiva e interage com a parametrização de microfísica através do processo de liberação (*cloud detrainment*) de ar, umidade e partículas de nuvem no ambiente. Os estudos de Khain et al. (2024) confirmaram a conexão entre as propriedades da dinâmica de nuvens cumulus e as propriedades de microfísica de nuvens. Conforme o material online do WRF (Werner, 2021), o modelo suporta vários esquemas de parametrização de cumulus. Ocorre que, em resoluções mais altas, tipicamente abaixo de três quilômetros²⁴, a regra é desabilitar o uso de esquemas de parametrização de cumulus, pois os processos são resolvidos diretamente pelo modelo.

²⁴ A documentação do modelo WRF contém regras gerais sobre a dependência da parametrização de cumulus e resolução espacial horizontal, conforme consta em https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/physics.html#cumulus-parameterization.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

O contexto do presente trabalho trata da sensibilidade de parametrizações de camada limite planetária e de microfísica de nuvens na habilidade do modelo WRF prever eventos e fenômenos meteorológicos intensos, como tempestades, linhas de instabilidade, precipitação, todos relacionados à atividade convectiva profunda. A literatura científica tem apresentado resultados de pesquisas nesta área e três processos de parametrizações são considerados: microfísica de nuvens (MP¹), camada limite planetária (PBL) e de nuvens cumulus. As parametrizações de PBL e de MP foram consideradas importantes na acurácia da previsão de eventos de chuva intensos (Comin et al., 2021; Efstathiou et al., 2013; Meroni et al., 2021; Moya-Álvarez et al., 2020; Palenzuela, 2017; Schwitalla et al., 2019). A parametrização de microfísica (MP), que inclui a resolução explícita do vapor de água, de nuvens e dos processos de precipitação (todos os tipos) (Skamarock et al., 2021; Warner, 2011), determina não somente a quantidade como também o padrão de distribuição espacial, principalmente nos modelos regionais (Chawla et al., 2018).

Também foi pesquisada a influência dos esquemas de parametrização de camada limite planetária (PBL) na previsão de precipitação. Foi encontrado que a parametrização de PBL exerce papel fundamental na previsão de precipitação (Shin & Hong, 2011), principalmente na magnitude da mesma. Por isso, foi incorporada em diversos estudos de impacto de PBL no desenvolvimento convectivo intenso (Comin et al., 2021; Efstathiou et al., 2013; Meroni et al., 2021; Moya-Álvarez et al., 2020; Schwitalla et al., 2019). Serão apresentados alguns trabalhos envolvendo parametrizações PBL e MP e respectivos resultados.

Esquemas de parametrização de MP e de PBL foram avaliadas no WRF para simular eventos intensos de precipitação em localidade ao norte da Grécia (Efstathiou et al., 2013). Foram testados dois esquemas de PBL (MYJ e YSU) e três esquemas de microfísica (Purdue Lin, WSM6 e ETA), totalizando seis experimentos. Foram definidos três domínios aninhados, tendo o externo cobrindo boa parte da Europa e norte da África (27 km), enquanto os outros dois domínios cobriam áreas da Grécia (9 km) e, a de maior resolução (3 km), o norte do país. Os diferentes esquemas de PBL e MP tiveram diferenças quanto à distribuição e intensidade da precipitação, mas as precipitações mais intensas foram melhores simuladas pela parametrização MP ETA e PBL YSU.

Palenzuela (2017) fez um estudo sinótico e também simulação numérica para um caso de precipitação intensa ocorrido na cidade de Pelotas (RS), entre os dias 28 e 29 de janeiro de 2009. No trabalho realizou testes com quatro configurações

¹ Serão usadas as siglas em inglês para parametrizações de camada limite planetária, no caso, PBL, e para microfísica de nuvens, a sigla MP.

de MP (Kessler, Purdue Lin, WSM6 e ETA Ferrier) para previsões de 12, 24, 48 e 72 horas. Foram definidos três domínios aninhados com 18, 6 e 2 km de resolução espacial horizontal. Os resultados das simulações não foram capazes de estimar com a devida precisão (localização e intensidade) a chuva ocorrida. A previsão de 12 horas de antecedência foi a que apresentou maiores volumes, mas ainda abaixo do observado.

Os autores Chawla et al. (2018) investigaram o WRF quanto à simulação de eventos de chuva extrema na bacia do rio Ganga (área geográfica do rio Ganges próxima à cordilheira do Himalaia.). Foram feitos experimentos com quatro esquemas de parametrização de MP, dois de cumulus, dois de PBL e duas opções de superfície, além de diferentes resoluções de grade. Os resultados apontaram para o seguinte conjunto de parametrizações que apresentaram os menores erros temporais e espaciais: MYJ (PBL), BMJ (cumulus) e Goddard (MP). Outros achados: identificaram a influência do parâmetro de (PBL) na modulação da magnitude da precipitação enquanto o padrão de distribuição dela sendo impactada pelo fator MP. Um outro aspecto relevante foram os melhores resultados para o conjunto de duas grades de 27 e 9 km, quando comparado com os domínios de 27 e 3 km. Apesar deste último trabalhar com grade de resolução maior, os processos de interação (*downscaling*) possuem melhores respostas nas proporções de grade menores, como foi o caso do primeiro conjunto, de 3 para 1 (27:9 km).

A convecção sobre a península Arábica foi estudada por Schwitalla et al. (2019) através do modelo WRF. As parametrizações testadas foram a PBL e a MP e o objetivo foi verificar qual conjunto reportava melhores resultados de potencial de desenvolvimento convectivo intenso. Os melhores resultados foram obtidos pelos esquemas MYNN (PBL) e Thompson (MP). Destaque para a pesquisa foi a definição do domínio, com uma grade de 900x700 pontos e com 100 níveis no domínio vertical.

Tendo como região de interesse a região geográfica das montanhas do Peru, Moya-Álvarez et al. (2020) fizeram experimentos com o modelo WRF, mas considerando apenas a parametrização de PBL. Foram definidas duas grades com resolução espacial de 18 e 6 km. A orografia acidentada da área é uma questão sensível para os modelos numéricos e, em última análise, na definição dos diversos parâmetros. A intensa variabilidade das elevações pode refletir na energia das ondas na solução das equações do modelo, o que pode gerar o desenvolvimento de instabilidades não-lineares (Warner, 2011). Nas definições dos limites das grades, devem ser evitados que atravessem áreas de relevo acidentado, pois podem gerar resultados errôneos.

A pesquisa tratou de averiguar um total de dez esquemas de PBL. De forma geral, todos as parametrizações levaram a uma estimativa abaixo da quantidade de precipitação sobre os Andes Peruanos, em média, sete por cento. O esquema MYJ (Mellor-Yamada-Janjic) foi o que apresentou a média de precipitação mais próxima

à observada, mas também foi o que apresentou a menor variabilidade, logo, menos sensível a extremos de precipitação. O esquema BL (BouLac ou Bougeault–Lacarrère) foi o que apresentou maior variabilidade, mas neste caso, houve superestimativa da quantidade prevista em relação ao registrado pelas observações.

Os autores Comin et al. (2021) usaram o modelo WRF para estimar previsões de eventos de chuva extremos no Nordeste do Brasil, mais especificamente na região litorânea. Foram definidos como fatores a investigar o conjunto de parametrizações de microfísica (MP) e de camada limite planetária (PBL). Foram seis esquemas de MP e três de PBL e o domínio foi configurado com três grades aninhadas: 25 km, 5 km e 1,66 km. Foram realizados um total de 24 experimentos considerando o período de 20 a 30 de maio de 2017. Em aspectos gerais, as simulações capturaram bem a quantidade e a distribuição espacial das chuvas extremas. Os esquemas de microfísica WSM3, WSM6 e Morrison-2mom apresentaram similares resultados de distribuição espacial da precipitação. O esquema YSU (PBL) foi o que apresentou os melhores resultados de distribuição temporal e espacial da precipitação, para qualquer parametrização de microfísica. Independente da configuração dos esquemas, a grade de resolução de 1,66 km foi a que apresentou os dados mais consistentes de simulação de quantidade de precipitação.

O trabalho dos autores Merino et al. (2022) no Nordeste da Espanha com modelo WRF e analisando 45 casos de precipitação intensa chegou às seguintes conclusões: que a parametrização de microfísica (MP) era mais importante que a de camada limite planetária (PBL) na acurácia dos casos de precipitação; e, que não foi obtida uma configuração ótima de MP e de PBL para todos os eventos simulados.

Os autores Biswasharma et al. (2024) exploraram o uso do modelo WRF para simular um evento de precipitação intensa em julho de 2018 na região montanhosa de Nagaland, situada a nordeste da Índia. Foi um estudo de sensibilidade para encontrar a combinação de parametrizações de nuvens cumulus (CU) e de microfísica (MP) que melhor respondesse à precipitação em terrenos complexos. Os esquemas de New SAS (CU) e de WDM5 (MP) são mais consistentes em reproduzir a variabilidade da precipitação e a combinação dos esquemas Multiscale Kain Fritsch-New Thompson (CU-MP) foi a que apresentou a maior correlação. Esquemas de MP do tipo momento duplo (New Thompson, Morrison (2 M), WDM5, WDM6) obtiveram melhores resultados que esquemas baseados em momento simples (Kessler, Lin et al., WSM3, WSM5, WSM6), independente da combinação com esquemas de cumulus. Esse resultado confirma a pesquisa dos autores Madhulatha et al. (2023) no qual encontraram que o esquema WDM6, que é momento duplo, obteve melhor performance de simulação de sistema convectivo intenso. Um outro resultado foi que a predição dos valores de pico de precipitação foi menor que o registro das observações.

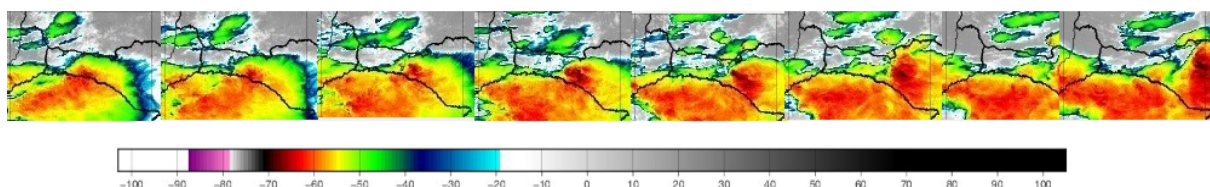
4 MÉTODOS E EXPERIMENTOS

Este capítulo apresentará a metodologia usada para execução dos experimentos usando o modelo WRF para um caso de estudo e usando abordagem quantitativa para análise dos resultados. A experimentação ocorreu pela realização de simulações numéricas variando os parâmetros de microfísica de nuvens (MP) e de camada limite planetária (PBL¹) de forma a encontrar o conjunto que melhor representa o resultado de precipitação para o caso em estudo. Será apresentada, inicialmente, a delimitação da área de estudo e que vai impactar na escolha da grade do modelo. A seguir será apresentado o modelo WRF usado na presente pesquisa e as respectivas configurações de execução, ou seja, como os experimentos foram realizados. E, a última seção irá tratar da validação dos resultados, iniciando pela obtenção dos dados observacionais, e seguindo pelos métodos e passos para extrair e obter as estatísticas.

4.1 Delimitação do estudo de caso

A área de estudo envolve o estado de Santa Catarina pois se situa em uma região com grande potencial para ocorrência de eventos meteorológicos intensos gerados por convecção profunda, conforme apontado na Seção 2.2.2. A escolha do evento para estudo de caso levou em consideração a intensidade das condições meteorológicas associadas e sua localização dentro do Estado de Santa Catarina. Dessa forma, chegou-se ao evento do dia 14 de agosto de 2020, no qual houve formação e deslocamento de várias células convectivas intensas desde o Norte-Noroeste do RS e pelo centro e Oeste de SC a partir das 15 UTC aproximadamente. O sistema de tempestades evoluiu na direção Leste-Nordeste do Estado de SC de Santa Catarina, chegando ao litoral entre 21 e 22:30 UTC. A Figura 18 contém uma sequência de extratos de imagens do canal do infravermelho termal, com realce, entre 14 UTC e 20h30min UTC.

Figura 18 – Sequência de imagens no canal infravermelho realçada abrangendo o seguinte período temporal (da esquerda para a direita), todos do dia 14/08/2020: 16:40, 17:20, 18:00, 18:20, 18:50, 19:30, 20:20 e 20:30 (hora UTC).

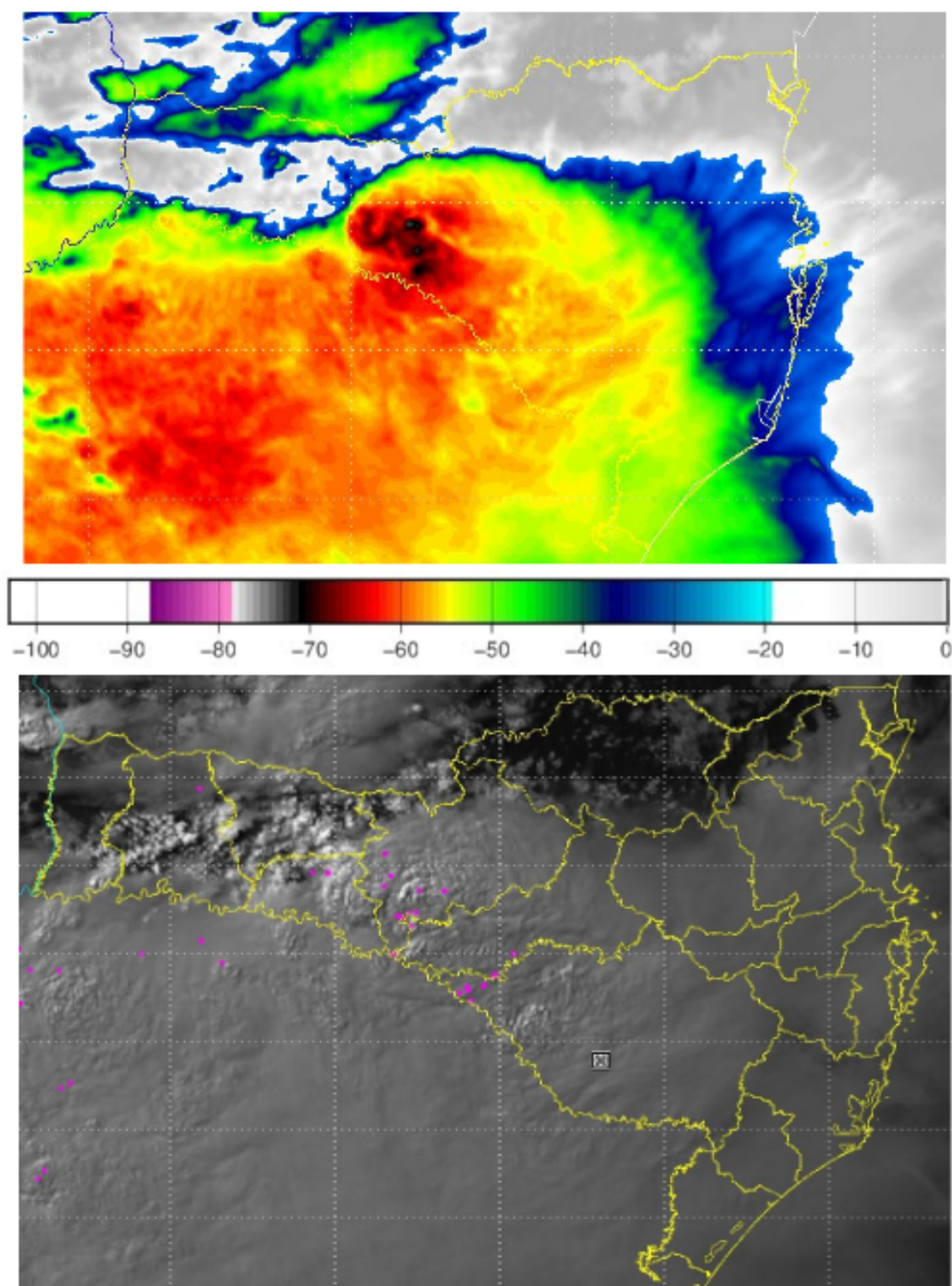


Fonte: o autor (2024) com imagens providas pelo CPTEC.

¹ Doravante no texto será usada a sigla PBL para se referir a esquemas de parametrização de CLP, em consonância com a documentação do WRF.

A Figura 19 contém duas imagens, ambas do satélite GOES-16, no horário das 18h30min UTC, conforme obtidas da fonte de Santa Catarina (2020). A imagem superior é do canal do infravermelho termal com destaque para as colorações mais escuras indicando topos associados a nebulosidade convectiva intensa. A imagem abaixo, para o mesmo horário, foi obtida do canal do visível, com camada de registro de atividade elétrica (pontos em cor de rosa). Conforme consta na análise de radar e das imagens realizadas pela Defesa Civil de Santa Catarina confirmaram que houve formação de supercélula com características tornádicas na região do município de Água Doce.

Figura 19 – Imagens de satélite nos canais do infravermelho termal e visível para o horário das 18:30 UTC. A imagem acima é do canal IR termal com realce de cor enquanto a imagem abaixo é do canal visível com destaque para atividade elétrica em cor rosa.



Fonte: Adaptado de Santa Catarina (2020).

A Figura 20 destaca em vermelho localidades com registros de eventos extremos devidos aos seguintes fenômenos: tornados, ventos intensos e granizo. Os registros dos eventos e das perdas constam em sítios de mídia quanto oficiais^{2,3,4,5,6}. A correspondência dos designativos e das cidades é a seguinte: VAG (Vargem Bonita), AGD (Água Doce), CAT (Catanduvas), TAN (Tangará) e IRI (Irineópolis). Outras cidades com eventos meteorológicos que causaram danos foram Ibicaré (IBI) e Campos Novos (CAN). Na mesma imagem estão plotadas as estações de observação automáticas do INMET que dispunham de dados meteorológicos no dia do evento, as quais estão representadas com duas letras, em cor preta, e estão caracterizadas de forma completa no Quadro 3. São as seguintes: Chapecó (CH); Xanxerê (XA); Joaçaba (JO); Campos Novos (CN); Curitibanos (CR); e, Caçador (CA). As indicações de localização são aproximadas e têm o objetivo de contextualizar a região geográfica de estudo e apontar cidades envolvidas.

² Disponível em: https://aguadoce.sc.gov.br/uploads/sites/280/2022/05/1927359_Nota_meteorologica_evento_140820_SC.pdf. Acesso em: 18 ago. 2025.

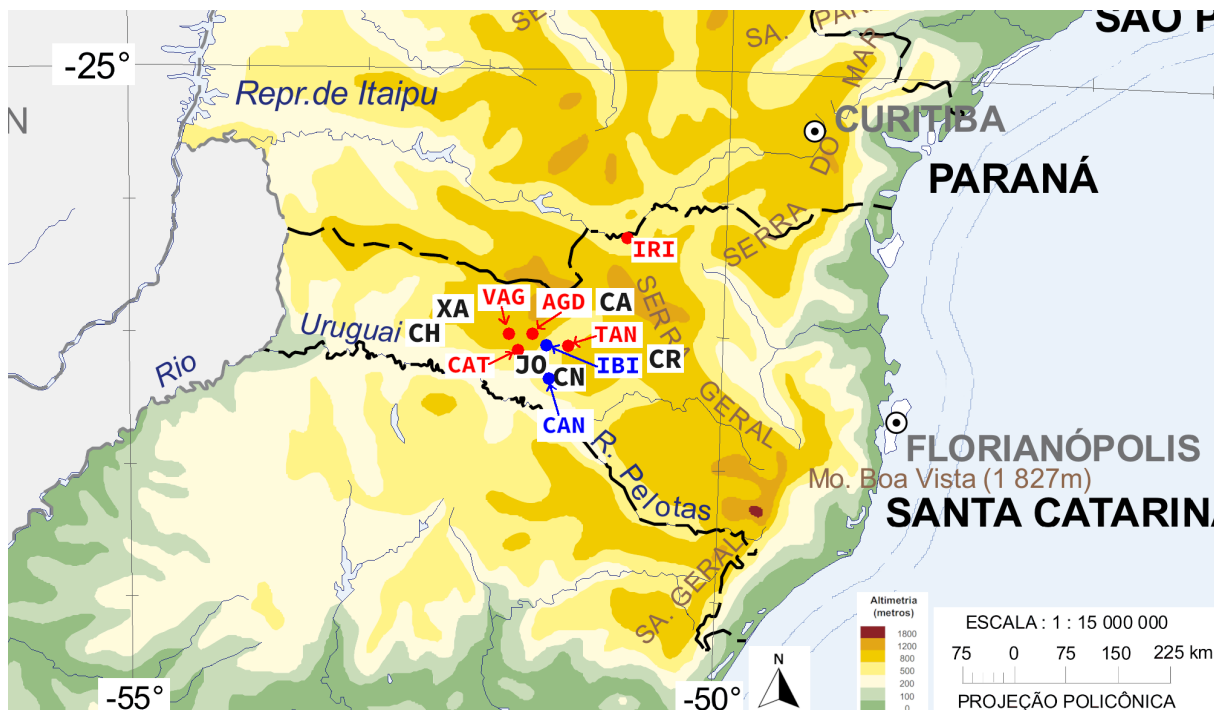
³ Disponível em: https://docweb.epagri.sc.gov.br/website_cepa/publicacoes/Perdas_provocadas_por_tempestades_Santa_catarina_2020.pdf. Acesso em: 18 ago. 2025.

⁴ Disponível em: <https://clicrdc.com.br/tempo/video-forte-temporal-com-vento-e-granizo-causa-destru>. Acesso em: 18 ago. 2025.

⁵ Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/noticia/2020/08/15/defesa-civil-confirma-tornados-em-sc-5222>. Acesso em: 18 ago. 2025.

⁶ Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-08/santa-catarina-tem-registro-de-tempestades-severas-e-tornados>. Acesso em: 18 ago. 2025.

Figura 20 – Área de estudo (estado de Santa Catarina) conforme eventos extremos ocorridos em 14/08/2020. Siglas e respectivas cidades com reporte de eventos: VAG (Vargem Bonita), AGD (Água Doce), CAT (Catanduvas), TAN (Tangará), IRI (Irineópolis), Ibicaré (IBI) e Campos Novos (CAN). Os retângulos com indicativos CH, XA, JO, CN, CR, e CA se referem a estações automáticas do INMET.



Fonte: o autor (2025) a partir de mapa topográfico disponibilizado pelo IBGE⁷.

As localidades destacadas na Figura 20 contemplam a região que tiveram registros de estragos e que foi de interesse desta pesquisa. Apesar do sistema ter-se orientado na direção do litoral, o objetivo é analisar a assertividade do modelo WRF em detectar as condições para a formação destes tipos de eventos.

4.2 Definição da experimentação com uso do modelo WRF

A definição do projeto de experimentos deveria atender à hipótese de pesquisa apresentada em termos gerais no Capítulo 1. Os Capítulos 2 (Fundamentação Teórica) e 3 (Trabalhos Relacionados) apresentaram os fundamentos e algumas das pesquisas sobre a influência dos parâmetros de microfísica (MP), de cumulus e de camada limite planetária (PBL) sobre a acurácia do modelo WRF em prever intensidade e distribuição de precipitação. Contudo, muitos outros fatores podem impactar nos resultados, como as resoluções espaciais horizontais e verticais, o intervalo e a resolução dos dados globais de inicialização e contorno, os dados estáticos de relevo e superfícies de água, além das diversas parametrizações de física disponíveis no modelo. A técnica de experimentação permite testar alguns parâmetros enquanto as demais configurações seguem constantes. Os artigos e trabalhos que constam do

Capítulo 3 têm resultados que informam que a previsão do modelo WRF é sensível às parametrizações de cumulus, MP e PBL e, mais importante, que há uma dependência do espaço geográfico. Por isso, a necessidade de testar esse conjunto de parametrizações para a Região Sul do Brasil, especificamente, para o Estado de Santa Catarina. Como a resolução de grade mais interna foi de dois quilômetros, a parametrização de cumulus não foi testada, restando somente os fatores MP e PBL.

4.2.1 Delimitação e especificação dos fatores

As parametrizações de camada limite planetária (PBL) e de microfísica (MP) foram definidas como fatores explanatórios para serem incluídos na experimentação, conforme descritos no Quadro 1. A documentação dos diversos esquemas pode ser encontrada na referência do modelo WRF (Skamarock et al., 2021). Vale ressaltar que todos os fatores explanatórios são categóricos, ou seja, são qualitativos. As parametrizações MP e PBL são definidas através dos seguintes parâmetros no arquivo de configuração do WRF: PBL (**bl_pbl_physics**) e *Microphysics* (**mp_physics**).

Quadro 1 – Relação de fatores categóricos (esquemas de PBL e de MP) definidos para experimentação usando o modelo WRF.

Parametrização (Fator)	Esquemas de parametrizações (Valores)
PBL	YSU, MYNN2.5, BOULAC, SHINH, MRF
MP	KESS, LIN, WSM3, WSM5, FER, WSM6, GOD, THO, MIL, MOR, CAM, SBU, WDM5, WDM6, NSSL2C, NSSL1-7, WSM7, WDM7, AEROT, MOR2, P3_1, P3_12, P3_2, P3_13, JISHMAEL, FERR, MADWRF, GODGCE

Fonte: Elaboração própria (2025).

A atmosfera terrestre é caracterizada por um conjunto de variáveis básicas, que devem ser resolvidas pelos modelos numéricos para obter seus valores futuros. Existem as variáveis atmosféricas básicas, como temperatura, vento, conteúdo de vapor de água e há aquelas que são derivadas. A precipitação é um tipo de hidrometeoro que é derivado, basicamente, dos esquemas de parametrização física. O modelo WRF gera saídas de precipitação acumulada usando três variáveis, para poder diferenciar entre precipitação convectiva e não convectiva. Essa é uma variável contínua e que será definida como **variável de resposta** nos experimentos.

Foram previstas 140 configurações de execução com os valores de parâmetros de PBL e de MP, conforme constantes no Quadro 1. Os esquemas de parametrização ou as combinações PBL-MP que não puderam ser executadas foram por dois motivos: a) ou por exigências de hardware; b) ou por ajustes em parâmetros que iriam requerer alterações significativas na configuração global do modelo. As seguintes configurações não foram experimentadas: YSU-SBU, YSU-WSM7, MYNN2.5-NSSL1-6, MYNN2.5-AEROT, MYNN2.5-ISHMAEL, MYNN2.5-GODGCE, BOULAC-WSM5, BOULAC-WDM, BOULAC-NSSL1-6, SHINH-NSSL1-6, SHINH-WDM7, MRF-

NSSL1-6, MRF-MADWRF e MRF-GODGCE. Dessa forma, restaram 131 experimentos para execução.

As hipóteses do experimento se resumem a testar se há ausência de efeitos significativos na variável resposta, assim como a ausência de efeitos significativos de qualquer combinação dos tratamentos de PBL e MP. Definição das **hipóteses nulas**:

- Fator explanatório: **PBL**. H_0^{PBL} : não é significativa a diferença entre o valor previsto e o observado da variável precipitação para os diferentes esquemas de PBL.
- Fator explanatório: **MP**. H_0^{MP} : não é significativa a diferença entre o valor previsto e o valor observado observado da variável precipitação para os diferentes esquemas de MP.

Da mesma forma, foi declarada a seguinte hipótese nula para os efeitos das interações dos efeitos na variável resposta: não há efeitos significativos oriundos de interações de segunda e terceira ordem dos fatores ensaiados nos tratamentos.

4.3 Modelagem Numérica

Considerando que os trabalhos envolvem um sistema de previsão numérica de tempo (PNT), o qual possui uma complexidade inerente sob o ponto de vista das possibilidades de configuração, é importante seguir um roteiro de trabalho. O autor Warner (2011), em sua obra sobre predição numérica de tempo e clima, apontou um sumário prático contendo certas diretrizes para configurar um modelo de PNT:

- Baseado no objetivo da modelagem e na prevalência de fenômenos sobre determinada área, determinar os processos físicos que deverão ser simulados ou previstos.
- Escolher um incremento de grade horizontal que seja suficiente pequena para resolver todos os processos que devem ser representados em grade.
- Definir a distribuição vertical dos pontos de grade que adequadamente definam importantes estruturas verticais, como gradientes de camada limite, jatos de baixo nível, tropopausa. E, se possível, compatibilizar o incremento da grade vertical com o incremento da grade horizontal.
- Para modelos de área limitada, escolher uma projeção de mapa que for mais apropriável para a extensão latitudinal abrangida pelo domínio do modelo (questão de fator de escala do mapa).
- Comparar a solução do modelo com simulações e quantificar a destreza. Para uso em operação, as verificações devem ser executadas sobre vários casos, compreendendo todas as estações do ano.

- Para modelos de área limitada, realizar testes para definir sensibilidade da acurácia da solução às diferentes localizações da fronteira e diferentes tamanhos de domínios.
- Realizar testes para determinar sensibilidade da acurácia do modelo aos incrementos da resolução horizontal e vertical.

O sistema que será simulado numericamente é caracterizado como previsão de curto prazo, ou seja, com tempos de integração entre três horas e três dias e domínio horizontal abrangendo áreas regionais até continentes (Stull, 2017). As configurações de execução de um modelo regional que, em princípio, terão impacto sobre a assertividade das previsões de sistemas convectivos intensos são descritas a seguir. Essas observações terão em consideração os objetivos desta pesquisa.

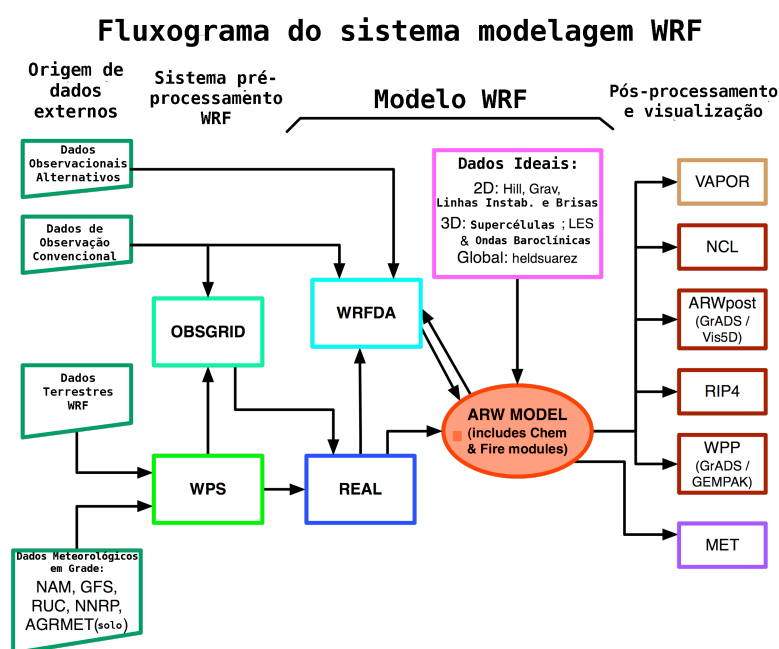
- Resoluções espaciais horizontal e vertical: os fenômenos extremos são normalmente eventos de pequena escala (sub-sinótica) e interessam que sejam modelados por grades de alta resolução. Além da questão de resolução, há o aspecto fundamental da área abrangida pela grade. Ela deve ser de tamanho suficiente para cobrir a escala espacial e/ou temporal dos fenômenos estudados e modelados. Considerando que um dos fenômenos mais intensos são linhas de instabilidade, é necessário e relativamente suficiente que a grade possa abranger os estados de SC e RS e partes da Argentina. Logo, o domínio requererá compromisso entre o tempo computacional para computar essas previsões e o uso efetivo das mesmas.
- Representação da física (processos físicos atmosféricos): considerando o curto lapso temporal de previsão, no caso, 24 ou 48 horas, certos parâmetros físicos exercem influência não significativa. Por exemplo, a temperatura da superfície do oceano (SST) pode ser considerada constante durante todo o tempo de previsão de um a dois dias. Para períodos mais longos, há necessidade de incorporar a respectiva variação como também outros parâmetros físicos e químicos.
- Dados globais de inicialização: modelos regionais e grades limitadas necessitam que a execução do modelo tenha dois tipos de dados de inicialização: a) dados meteorológicos (atmosféricos, superfície terrestre e oceânica, relevo, cobertura, etc) para iniciar o estado atual atmosférico, a partir do qual as extrapolações futuras serão equacionadas via formulações matemáticas da física e química; e, b) dados de borda da grade para todo o período de previsão, para contemplar a interação entre o movimento atmosférico global e o previsto dentro da grade do modelo.

As próximas seções irão apresentar algumas escolhas de configuração, incluindo o modelo WRF para execução dos experimentos.

4.3.1 Modelo WRF

O modelo WRF (*Weather Research and Forecasting Model*) é constituído por diversos módulos e cada qual com objetivo específico de forma que pode ser usado para simulações numéricas em tempo real e também para pesquisas com finalidades diversas. Demais características e propriedades do modelo ARW (*Advanced Research WRF*), versão 4, podem ser encontradas no documento técnico referido como “*A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4*” (Skamarock et al., 2021). A imagem da Figura 21 apresenta os blocos e o fluxo de dados dentro do modelo. Os componentes básicos e principais são apresentados a seguir.

Figura 21 – Esquema do sistema de modelagem WRF com os módulos e tipos de dados/informação processada.



Fonte: Adaptado do sítio do modelo WRF (*Modeling System Overview*)⁸.

- WPS: WRF *Preprocessing System* (WPS): composto por três componentes (geo-grid, ungrib e metgrid) que são responsáveis por preparar dados meteorológicos e de terreno para entrada do módulo REAL. Os dados terrestres incluem um vasto conjunto de dados, desde relevo, cobertura vegetal, até níveis de subsolo. Os dados meteorológicos em grade serão usados para inicializar o modelo e prover dados de contorno do domínio, pois o WRF foi designado como modelo regional. De forma geral, trata principalmente de interpolação de dados para a área geográfica de interesse (domínio do modelo).

- REAL: rotinas de inicialização; prepara arquivos de inicialização e de condições laterais em pontos de grade para o WRF. Esse módulo permite que o modelo possa ser usado para casos com dados reais (REAL). Dados simulados são criados pelo módulo IDEAL.
- ARW Model: a unidade de integração numérica (WRF-ARW *Solver*), que é o núcleo do modelo, o que contém os esquemas de física e as opções dinâmicas/-numéricas.
- Pós-processamento: ferramentas de análise e de visualização.
- WRFDA: pacote assimilação dados.

A versão usada neste projeto foi a “V4.4” mas cuja arquitetura é a mesma daquela constante na Figura 21. Os códigos que constituem os blocos do modelo foram desenvolvidos sob licença de código fonte aberto, em sua maior parte na linguagem Fortran 90. ARW consiste de código flexível, modular e portátil, que permite a execução em uma variedade de tipos diferentes de sistemas, desde notebooks com Linux até supercomputadores. Essa flexibilidade é obtida pelo código modular. O único impacto será no tempo de simulação, que é dependente da arquitetura dos processadores usados. Descrição do modelo e acesso aos dados de terreno além dos códigos fonte podem ser encontrados no sítio do projeto em <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>.

4.3.2 Configuração de execução do WRF

Uma das principais definições em um estudo de modelagem numérica é a questão da configuração das grades, em termos de aninhamento, resolução e número de pontos para representar uma determinada área geográfica. De forma geral, as resoluções espaciais dos domínios e o nível de aninhamento dependem de alguns fatores, sendo os principais:

- Tamanho de grade, resolução espacial e período de previsão: o objetivo de executar uma grade com grande extensão horizontal e vertical, com resoluções espaciais horizontais e verticais altas e gerando previsões por vários dias confronta com requisitos computacionais e lapso de tempo da disponibilidade da previsão.
- Área geográfica: a extensão geográfica deve evitar os problemas as soluções numéricas com relevo íngreme nas bordas das grades. Além disso, a extensão deve ser compatível com a escala dos fenômenos que serão modelados, conforme tratado na Seção 2.1.

- O período de previsão, quando possível, deve considerar também a escala dos fenômenos.
- A resolução espacial dos dados das condições iniciais e de contorno deve ter relação de escala com a grade do domínio.
- Ainda, existe uma dependência entre a escala espacial horizontal da grade do domínio e os passos no tempo das soluções numéricas de forma a evitar instabilidades.

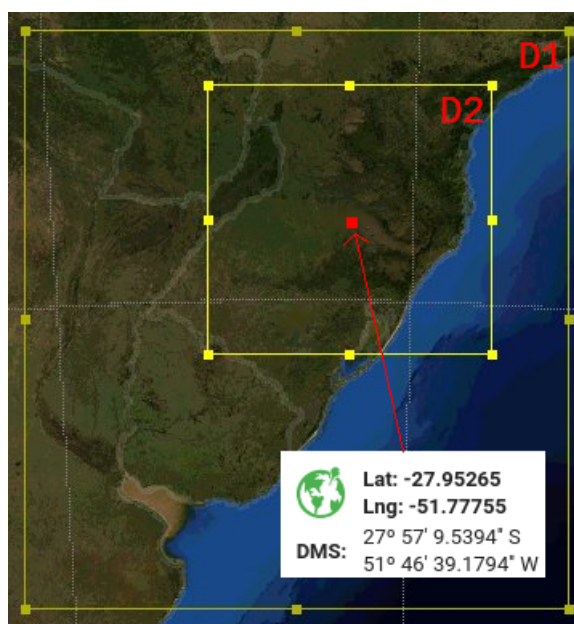
Ao final, essas restrições podem levar a uma especificação de configuração com dois ou três domínios aninhados e cobrindo uma área extensa, o que impacta nos recursos computacionais requeridos para execução. Do ponto de vista operacional, os resultados da modelagem devem estar disponíveis o mais rapidamente possível, para poderem ser usados para o propósito fim e também para permitir validar o restante do período de previsão com base na evolução das condições de tempo reais.

No caso da pesquisa sendo apresentada, o fenômeno teve uma duração média de seis horas e se formou e se deslocou por boa parte do Estado de Santa Catarina. Definida a área, segue-se para a questão de acomodar a resolução espacial, no caso, a maior possível. Em função das limitações de processamento disponíveis, foi definida uma grade com **dois quilômetros de resolução espacial horizontal** e com **41 níveis na vertical**. Grades de granularidade maior, ou seja, de maior resolução espacial, irão resultar em maior número de pontos além de requerer a diminuição dos passos de integração temporal⁹ para evitar instabilidade computacional¹⁰. O resultado é o aumento do tempo de execução pela maior quantidade de pontos e pela discretização temporal aumentada. O domínio externo da configuração, que está ajustado em 10 km de resolução espacial, dá uma relação 3:1 para os dados globais¹¹, cuja resolução é aproximadamente 28 km no Equador, conforme consta na Subseção 4.3.3. A relação de 5:1 entre as resoluções dos domínios externo e interno ainda satisfaz os requisitos de dinâmica do modelo, conforme constantes também na documentação e que será detalhada a seguir.

⁹ Existe um problema de instabilidade computacional que é parametrizado pelas resoluções temporais e espaciais horizontais, que definem o critério CFL (Courante-Friedrichs-Levy)

¹⁰ A instabilidade computacional devida à discretização é caracterizada pela produção de ondas de som e gravitacionais que geram ruídos, impactando os resultados da previsão.

¹¹ A relação dos dados globais e a resolução do domínio externo consta da documentação do WRF disponível em https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/running_wrf.html.

Figura 22 – Grades D1 (externa) e D2 (interna) da configuração B usada nos experimentos.

Fonte: o autor (2024).

A Figura 22 apresenta a configuração dos domínios externo e interno que foram definidos para a execução do modelo. Foi usada a configuração de domínio presente no sistema “model-wrf”¹², referida como “B” (“r_sul-RS-SC-2d”). O domínio interno cobre o Estado de Santa Catarina e parte dos estados do Rio Grande do Sul e Paraná. Para *downscaling* dos dados de inicialização globais, foi necessária uma grade de menor resolução (D1), externa à grade D2. A coordenada central do domínio externo D1 se encontra em $30,48^{\circ}$ S e $53,30^{\circ}$ W enquanto a coordenada central da grade mais interna é aproximadamente em: $27,95^{\circ}$ S e $51,78^{\circ}$ W. O Quadro 2 contém as configurações das grades D1 e D2 e relaciona as respectivas resoluções espaciais horizontal e número de pontos. Constam também dados de resolução espacial dos dados geográficos usados para criar os arquivos de inicialização de terreno. Essa configuração de domínio permitiu a execução dos experimentos em máquinas comuns. A grade externa tem resolução espacial de 10 km enquanto a interna, de dois quilômetros.

Quadro 2 – Parâmetros das grades da configuração “B” usada nos experimentos.

Domínio	Número pontos <i>ixj</i> da grade	Número total pontos	Resol. espacial (m)	Resol. dados geográficos
D1	150x160	24.000	10.000	2m
D2	391x371	145.061	2.000	30s

Fonte: o autor (2024).

Excetuando as configurações de domínio e aquelas sujeitas à experimenta-

¹² Código e instruções de execução se encontram disponíveis em <https://github.com/glcamillo/model-wrf>.

ção, as demais foram deixadas em seus valores padrão ou foram alteradas em atenção à orientação dos seguintes documentos e informações:

- Módulo WRF: “***namelist.input: Best Practices***”: para as principais configurações do modelo, como física e também de domínio: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/namelist_best_prac_wrf.html
- Módulo WPS: “***namelist.wps: Best Practices***”: para as configurações de domínio: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/namelist_best_prac_wps.html
- O CPTEC estava executando um modelo regional baseado no WRF na data em que este projeto estava iniciando (2020). Foi feita consulta sobre algumas configurações do modelo, principalmente, quanto aos esquemas de física, os quais foram os seguintes:
 - Física radiação onda longa: RRTMG;
 - Física radiação onda curta: RRTMG;
 - Física de camada superficial: Revised MM5;
 - Física de superfície: NOAH;
 - Física de cumulus: New Tiedke.

Tendo por base as sugestões e diretrizes das *Best Practices* e também da configuração operacionalizada no CPTEC, seguem algumas configurações adotadas para a experimentação:

1. **Números de grades e aninhamento** (*nesting*): o nome da variável do parâmetro é “parent_grid_ratio” e é configurada tanto para WPS quanto para WRF. Os valores ideais para *nesting* são três ou cinco conforme as boas práticas. A configuração de razão de grades (D1/D2) foi de cinco para atingir dois objetivos: a) compatibilizar a resolução dos dados globais (aproximadamente 28 km com a grade externa) e; b) a grade de interesse, a interna ser a de maior resolução espacial possível, no caso, de 2 km. Com essa resolução, o modelo resolve a física de nuvens cumulus diretamente. Além disso, a quantidade total de pontos, mesmo englobando geograficamente a área de estudo, permite a execução em sistemas desktop.
2. **Two-way nesting**: o parâmetro do namelist “feedback” determina como ocorre a comunicação entre as diversas grades durante a integração no tempo. Foi usado o valor padrão 1 que ativa a comunicação bidirecional (*two-way*). O padrão dos modelos de grades multiníveis é a comunicação de resultados da grade externa (mãe) para a grade interna. O que pode ser configurado é se os valores das

variáveis meteorológicas da grade interna (filha) são sumarizados em média e copiados para os respectivos pontos da grade mãe.

3. O **passo no tempo** ajustado para todas as configurações de grade e de execuções foi de 60 segundos (*“time_step”* = 60). O valor é obtido a partir da definição dos domínios e após por experimentação, pois o valor sugerido pode, em determinados casos, produzir erro CFL.
4. **Parametrizações de física: nuvens cumulus**: para todas as configurações foi usado o esquema New Tiedtke (número de parâmetro igual a 16) para o domínio externo de menor resolução. Essa escolha foi em consequência do CPTEC rodar o modelo WRF e usar tal esquema para parametrização de cumulus. Para o domínio interno de maior resolução, a parametrização de cumulus foi desligada¹³, em consideração ao que foi tratado na Seção 2.4.2.
5. **Parametrizações de física: demais**: a descrição e referência das parametrizações de física se encontram na referência técnica do modelo (Skamarock et al., 2021) e também online, conforme referido no item anterior. Seguem as principais:
 - Física radiação onda longa: RRTMG;
 - Física radiação onda curta: RRTMG;
 - Física de camada superficial: Revised MM5;
 - Física de superfície: NOAH;
 - Física de cumulus: New Tiedke
6. Dados de uso de terreno: “MODIFIED_IGBP_MODIS_NOAH” e que tem 41 categorias. A camada superficial, que é a porção da CLP em contato com a superfície terrestre é referida pela variável **Surface Layer** e a configuração padrão é pelo uso da teoria de similaridade (*Similarity theory*).

Conforme pode-se visualizar na Figura 21, o modelo WRF é uma composição de blocos que são executados numa sequência e os dados são canalizados entre as respectivas entradas e saídas. Com o objetivo de automatizar o processamento e execução do WRF, ou seja, o movimento dos dados entre os módulos e a especificação das configurações para cada um, há necessidade de usar alguma linguagem de *scripting*, como Shell Bash, Python, dentre as mais importantes. Esses programas auxiliares também são importantes para executar a quantidade grande de experimentos com um mínimo de sobrecarga de configuração manual. Algumas funções são: obter

¹³ O guia do modelo WRF esclarece os tipos de parametrizações e informa sobre os respectivos esquemas. Disponível em: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/physics.html.

parâmetros e configurar o modelo, como a escolha da data de inicialização ou a grade; configurar os módulos quanto a algum parâmetro da modelagem, como escolha da física ou da dinâmica; mover os dados entre os módulos; e, executar programas externos para algum processamento. O Autor desenvolveu um conjunto de *scripts* em Bash para executar um modelo WRF previamente instalado em máquinas Linux. A execução desse *script*¹⁴ é parametrizada com diversas opções, tanto em linha de comando quanto em alteração dos próprios arquivos de configuração. A página do GitHub contém explicação detalhada das opções de execução e, doravante, a referência a este sistema será “model-wrf”.

4.3.3 Condições iniciais e de contorno

Os dados (variáveis meteorológicas) são produzidos por modelos globais e podem estar disponíveis em tempo real (com o atraso da própria execução) ou, na forma de dados históricos, ou ainda, como reanálises. Cada qual possui um nível melhor de tratamento da assimilação (dados atmosféricos mais completos). Logo, a escolha pode impactar nos resultados finais dos modelos de área limitada. Além disso, alguns oferecem níveis diferentes de resolução espacial (horizontal e vertical), o que também pode afetar os índices de previsão.

A configuração de inicialização foi escolhida considerando o tempo da ocorrência do fenômeno objeto da pesquisa e da questão do modelo requerer um período (lapso temporal) para que os campos sejam dinamicamente consistentes. Conforme Warner (2011), esse período pode se estender por seis a doze horas, de modo que foi escolhida a inicialização a partir das 00 UTC do dia 14 de agosto de 2020.

As condições iniciais e de contorno foram obtidas dos dados GFS (*Global Forecast System*) providos pelo National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce, 2015). Esses dados são disponibilizados pela instituição americana University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) através de um registro gratuito em seu sítio. A resolução espacial é de 0,25 graus de latitude e longitude o que dá aproximadamente 28 km sobre a linha do Equador. O formato do dados é Grib2 e são disponibilizados como arquivos individuais por data de previsão, como: gfs.t00z.pgrb2.0p25.f000. As análises e as previsões usadas na inicialização foram definidas em intervalos de tempo de três horas de forma que foram necessários nove arquivos de dados globais para todo o período de previsão de 24 horas. A relação dos arquivos segue na sequência:

Dados de Entrada:

¹⁴ Os scripts estão disponibilizados de forma aberta na plataforma GitHub sob o seguinte endereço: <https://github.com/glcamillo/model-wrf>.

```
gfs.t00z.pgrb2.0p25.f000
gfs.t00z.pgrb2.0p25.f003
gfs.t00z.pgrb2.0p25.f006
gfs.t00z.pgrb2.0p25.f009
gfs.t00z.pgrb2.0p25.f012
gfs.t00z.pgrb2.0p25.f015
gfs.t00z.pgrb2.0p25.f018
gfs.t00z.pgrb2.0p25.f021
gfs.t00z.pgrb2.0p25.f024
9 files: 2,8GiB (3.022.327.579 Bytes)
```

4.3.4 Execução dos experimentos com o WRF

Os dados de inicialização e de contorno para a execução do modelo WRF foram obtidos do sítio da UCAR conforme detalhamento à Seção 4.3.3. Foram usadas três máquinas para execução dos experimentos. Num primeiro momento, foi usado computador provido pelo laboratório de Meteorologia do IFSC, que tinha configuração de RAM de 16 GB mas era limitado em espaço de disco. A maior parte dos experimentos foi executada em dois notebooks de uso pessoal, sendo que ficou alocada uma máquina Acer com processador AMD e com 8 GB de memória RAM.

Os softwares usados foram os seguintes: sistema operacional Linux; bibliotecas para NetCDF e MPI; programas para pós-processamento e extração de dados, no caso GrADS e R; programas para leitura e tratamento de dados em formato GRIB; programas e linguagens para tratamentos estatísticos, como Python e R. Todas as categorias de programas citados possuem versões livres e de código aberto. O código do modelo WRF foi baixado do sítio de referência conforme apresentado na Seção 4.3.1 e instalado em computadores e notebooks seguindo as informações constantes do tutorial do sítio em <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/>. Para permitir automatizar o fluxo de processamento dos módulos do WRF e parametrizar alguns parâmetros de execução, foram definidos *scripts* em linguagem Bash (<https://www.gnu.org/software/bash/manual/bash.html>) que está disponível por padrão nas plataformas Linux. No sítio <https://github.com/glcamillo/model-wrf> está o repositório dos *scripts* e a descrição de funcionamento dos mesmos junto com os parâmetros de linha de comando. As simulações consistiram em previsões 24 horas iniciando às 00 horas UTC do dia 14/08/2020 através do comando listado a seguir. As opções dos esquemas de parametrização MP e de PBL foram feitas no próprio *script* “runwrf-projeto.sh”.

```
/bin/bash ./runwrf-projeto.sh
-conf B
-ts 2020-08-14-00
-ti 24
-gti 3
```

```
-np 1  
--use-static-geogrid
```

O significado dos parâmetros é a seguinte:

- **-conf B**: informa que é a configuração de grades B;
- **-ts 2020-08-14-00**: indica a data-hora de inicialização;
- **-ti 24**: informa o tempo de integração;
- **-gti 3**: indica que dados globais estão disponíveis em intervalos de três horas;
- **-np 1**: o *script* irá despachar um único processo, e;
- **-use-static-geogrid**: informa que na execução o módulo WPS deve usar arquivos pré-configurados com os dados geográficos de terreno.

As execuções ocorreram em três máquinas distintas, mas uma delas ficou alocada para execução sequencial dos experimentos, devido a problemas de disponibilidade das outras duas. No caso, foi o notebook baseado em processador AMD com 8 GB de memória RAM. O programa “wrf.exe” executou somente em um único processo devido à limitação de memória. Em média, o modelo usou 100% de uma CPU e aproximadamente 5 GBytes de memória RAM. Os requisitos de memória são equivalentes ao número de processos (CPUs), logo, com dois processos e usando duas CPUs, o consumo de memória seria em torno de 9 a 10 GBytes. Então, apesar de ser possível executar a integração com múltiplos processos (até três nessa máquina) para diminuir o tempo de execução, a restrição da memória RAM disponível limitou essa opção. A média de tempo de execução do programa de integração “wrf.exe” para as execuções na máquina AMD foram aproximadamente de 45,45 horas, o que dá mais de dois dias em execução contínua. A adequação dos programas para execução operacional requer sistemas computacionais adequados além de implementação de técnicas de otimização dos módulos do WRF.

4.4 Verificação das Previsões

Conforme o autor Laurie Wilson (2015) referiu no material disponibilizado no sítio do Serviço de Meteorologia do Canadá, a verificação trata do processo de obter a verdade e a acurácia das previsões numéricas, com o fim de determinar a qualidade das mesmas (Stull, 2017). Compara-se uma previsão com uma verdade (observação ou análise) para inferir o quão boa (consistência, qualidade e valor) foi um resultado de modelo numérico (qualitativamente ou quantitativamente). O autor Fundel, em “*An Introduction to Forecast Verification*” (Felix Fundel, 2016), aponta razões

para verificação de NWP (*Numerical Weather Prediction*): comparação de diferentes modelos/experimentos. E, considera que previsões de modelos numéricos podem conter erros por: deficiências do próprio modelo; resoluções insuficientes horizontais e/ou verticais; insuficiente resolução temporal; parametrizações dos processos físicos; aproximações numéricas; erros de codificação; e, erros advindos dos modelos globais.

Uma questão importante sobre a verificação de previsões numéricas é sobre a escolha das variáveis que serão medidas. Considerando os fenômenos atmosféricos que geram ocorrências de danos, como tornados, precipitação intensa, granizo, ventos fortes com ou sem rajadas, duas questões podem dificultar a verificação da assertividade dos modelos. Primeiro, é sobre a obtenção das medidas dos valores observados, o que pela natureza eventual, no tempo e espaço, desses fenômenos, limita o tipo e forma de dado observacional disponível. Outro ponto, é sobre o tipo de variável de saída dos modelos. Por exemplo, o fenômeno de rajadas não é normalmente uma variável de saída do WRF, por exemplo. Para acomodar esse tipo de fenômeno e outros também intensos, foi proposto um módulo que deve ser habilitado no WRF, referido pelo nome de “*AFWA Diagnostics in WRF*”¹⁵. Ele permite produzir saídas específicas para condições meteorológicas extremas, como previsão de vento em tornados. Mas esse módulo tem limitações quanto ao tempo de processamento requerido, à respectiva configuração dentro do WRF e a determinados problemas de incompatibilidades com determinados esquemas de parametrização. Por isso, apesar de estar na proposta de pesquisa, não foi possível executar os experimentos com o módulo habilitado para todos os casos.

Chegou-se, então, na variável de quantidade de precipitação. Ela é obtida da saída direta do modelo e também havia disponibilidade nos registros das estações meteorológicas de superfície. Os autores Ruiz et al. (2010) realizaram uma pesquisa de sensibilidade do WRF para a América do Sul e, em sua discussão, alertaram para o fato que diferentes variáveis são influenciadas por diferentes processos físicos e estes são dependentes da localidade. Logo, para esta pesquisa foi definida somente a variável de precipitação.

4.4.1 Dados observacionais

A verificação das previsões do modelo WRF quanto à variável atmosférica de precipitação acumulada foi baseada em dados observacionais obtidos de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para o dia 14 de agosto de 2020, foram considerados todas as estações na área em que houve registro de eventos atmosféricos intensos, como tornados e precipitação e ventos intensos. Foram encontradas seis estações de superfície com dados observacionais. São todas estações automáticas e

¹⁵ Mais informações em http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/AFWA_Diagnostics_in_WRF.pdf

cujos dados horários podem ser consultados no Banco de Dados Meteorológicos do INMET (BDMET), cujo endereço de acesso fora o seguinte: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Cada arquivo de estação continha todas as variáveis meteorológicas coletadas durante determinado ano o que demandou extração das mesmas.

O Quadro 3 contém as estações e os respectivos códigos WMO além de códigos de duas letras (código projeto) para facilitar a identificação e processamento. Essas letras de identificação não estão necessariamente associadas a indicativos oficiais das estações. Os códigos WMO são os indicativos internacionais da Organização Meteorológica Mundial (OMM). As coordenadas *i* e *j* da grade WRF se referem ao domínio de maior resolução, o D2, conforme a imagem da Figura 22.

Quadro 3 – Estações automáticas do INMET que forneceram dados pluviométricos para a área de estudo.

Estação	Cód WMO	Cód projeto	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Coord. WRF i	Coord. WRF j
Chapecó	A895	CH	-27,0853111	-52,6357111	679	236	155
Xanxerê	A858	XA	-26,938666	-52,39809	878,74	167	243
Joaçaba	A841	JO	-27,16916666	-51,55888888	767,63	209	231
Campos Novos	A898	CN	-27,3886111	-51,21583333	963	226	218
Curitibanos	A860	CR	-27,288624	-50,604283	978,1	257	227
Caçador	A859	CA	-26,819156	-50,98552	944,26	250	238

Fonte: o autor (2024), a partir do banco BDMET (INMET).

4.4.2 Método de extração e cálculo de estatísticas

Antes de indicar o método de extração, serão apresentadas algumas definições sobre as estatísticas. A verificação quantitativa/objetiva dos resultados foi realizada com parâmetros estatísticos clássicos (WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research, 2017; Stull, 2017), conforme listados a seguir. Dora-vante serão usadas as abreviações da língua inglesa, pela consagração destes termos na literatura.

- Erro Sistemático ou Erro Médio (Bias ou Viés): representa o erro em cada termo e a média indica a tendência do modelo em subestimar ou superestimar determinada variável atmosférica prevista. Como erros individuais podem ser cancelados, o viés não pode ser usado como medida de acurácia de um modelo numérico.
- Erro Médio Absoluto (*Mean Absolute Error* - MAE): o cálculo informa a média da magnitude dos erros de previsão e todas as diferenças são incluídas com mesmo peso na média. Valores seguem de zero ao infinito e um escore perfeito é quando o valor for igual a zero. Diferente da medida do viés, o MAE é menos suscetível aos erros (extremos) individuais, logo, essa medida é um forte indicador da habilidade do modelo em reproduzir a realidade. A desvantagem desta medida é que não aponta a direção dos desvios.

- Raiz do Erro Quadrático Médio (*Root Mean Squared Error* - RMSE): calcula a média da magnitude do erro e é um forte indicador de acurácia.

O processo da extração dos dados dos arquivos NetCDF, as sumarizações estatística e os respectivos testes de significância estatística foram executadas conforme as seguintes técnicas e passos, algumas das quais serão pormenorizadas na sequência da análise dos resultados:

1. Todas as estatísticas e conclusões foram sobre os resultados da modelagem na grade interna (D2), de maior resolução.
2. Através da localização da estação meteorológica automática do INMET se aproximou o ponto de grade e a partir daí foram extraídos 25 pontos de dados do arquivo NetCDF da saída do WRF. Como a resolução desta grade é de 2 km, foi estabelecido uma média dos dados numa área de $10 \times 10 \text{ km}^2$. Essa aproximação média já fora usada no trabalho de Costa (2022), que aproximou nove pontos em uma grade de 2,5 km de resolução espacial.
3. Usando *scripts* em linguagem R, foram extraídos os valores horários de precipitação dos arquivos de saída NetCDF do modelo WRF. Para cada ponto aproximado à estação meteorológica do INMET, foi adotado o método da média de área conforme item anterior.
4. Foram salvos e plotadas diferenças individuais para cada estação fins de obter uma estimativa visual do comportamento horário da precipitação observada e prevista. Também é possível identificar o desenvolvimento e o deslocamento do sistema meteorológico.
5. As estatísticas de sumarização, referidas pelas siglas BIAS, MAE e RMSE, consideraram todas as seis estações de observação e as 24 horas de previsão de forma que as funções R operaram sobre vetores de 144 elementos. Esses valores representam a estatística de cada configuração de execução relativa a uma determinada parametrização de PBL e de MP.
6. Ao todo, foram previstas 140 configurações de execução, contudo, algumas combinações não puderam ser executadas por problemas de exigências de hardware ou por ajustes em parâmetros que iriam requerer alterações significativas na configuração global do modelo. Um ajuste importante é a interação do esquema de PBL com a parametrização da camada superficial, conforme consta na documentação do WRF¹⁶. Em consequência, foram executados 131 experimentos com configurações envolvendo a combinação de esquemas PBL e de MP.

¹⁶ Mais informações em https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/physics.html#planetary-boundary-layer-physics.

7. A partir dos dados de RMSE de cada configuração de PBL e de MP, foi executado teste estatístico ANOVA para encontrar uma decisão a respeito de rejeitar ou aceitar a hipótese desta pesquisa de experimentação. Ela diz que parametrizações de PBL e de MP e suas interações não têm influência estatisticamente significativa na previsão de precipitação.

Foi usada a linguagem R para extrair os pontos de grade com a previsão de precipitação para cada hora e considerando cada estação que continha valores observacionais. Para cada ponto de grade foi extraído o total de precipitação (convectiva e não-convectiva). As médias horárias dos pontos compuseram o vetor de valores preditos e os dados horários de precipitação (dados INMET) compuseram o vetor de observação. Os cálculos foram realizados usando o pacote Hamner & Frasco (2018) da linguagem R e as três medidas de Bias, MAE e RMSE têm a seguinte definição, conforme encontrado na documentação em <https://cran.r-project.org/web/packages/Metrics/Metrics.pdf>. Nas funções *mae()*, *bias()* e *rmse()*, o vetor *actual* corresponde aos valores da verdade (observações) enquanto que o vetor *predicted* informa se tratar de valores previstos.

- MAE: a instrução *mae(actual, predicted)* computa a diferença média absoluta entre dois vetores numéricos.
- BIAS: a função *bias(actual, predicted)* calcula o valor médio pelo qual *actual* é maior que o *predicted*. Ou seja, é a média entre os valores observados e os preditos pelo modelo. Se o modelo não é enviesado, o resultado é próximo a zero. Valores maiores que zero ou menores que zero são indicadores de que o modelo subestimou ou superestimou precipitação em relação ao observado.
- RMSE: a função *rmse(actual, predicted)* calcula a raiz da média dos erros entre os dois vetores. Inclui as contribuições individuais das médias no tempo e/ou de pontos e também qualquer erro sistemático médio (bias).

As funções estatísticas em R que foram usadas na extração de dados foram alteradas quanto à ordem de seus parâmetros, ou seja, as funções *mae*, *bias* e *rmse* foram configuradas com esta sistemática de chamada: ***funcao(predicted, actual)***. O objetivo é atender ao padrão da bibliografia no qual as estatísticas são calculadas considerando o desvio ou discrepância como valor previsto menos valor observado (Aravéquia & Quadro, 2003; Koh et al., 2012; Stull, 2017). Os valores de RMSE, BIAS e de MAE estão consolidados nos quadros constantes dos Apêndices A, B e C. Constam também as configurações de MP-PBL que foram sujeitas a experimentação. O próximo capítulo de resultados detalhará o teste estatístico sobre os dados obtidos das sumarizações estatísticas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão discutidos a situação sinótica reinante na área no dia 14 de agosto de 2020, os resultados dos dados de simulação e a estatística do teste de significância do impacto das parametrizações de PBL e MP sobre a previsão de precipitação.

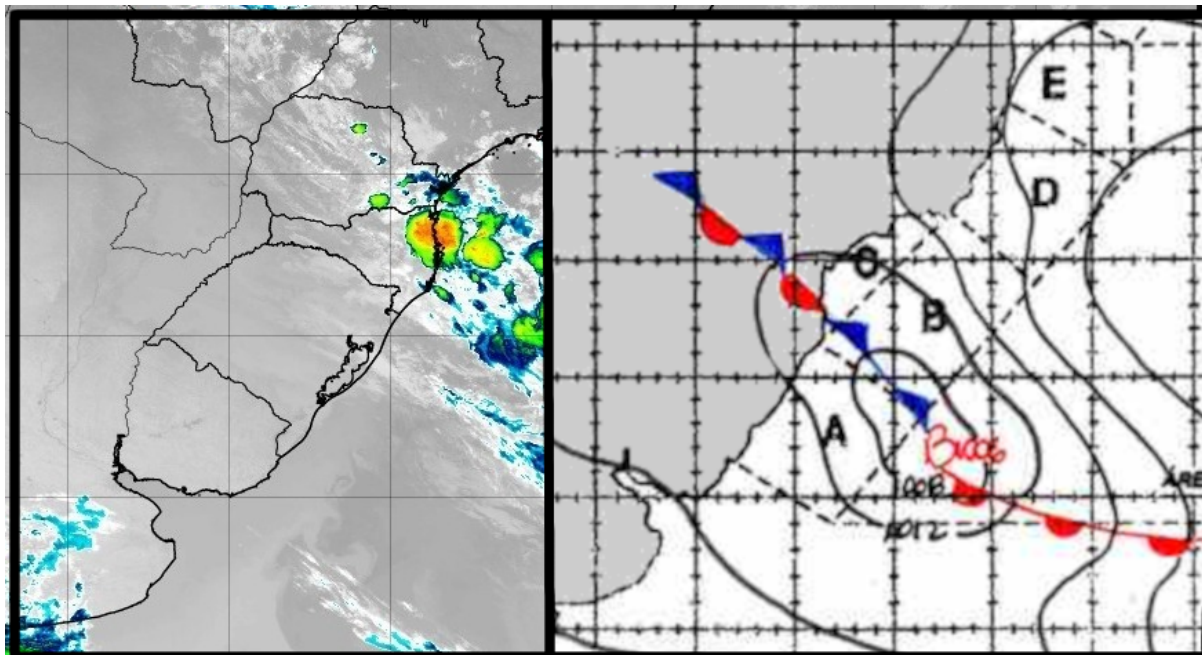
5.1 Análise sinótica e de mesoescala

O evento de tempestades que teve ocorrência ao final do período da tarde do dia 14 de agosto de 2020 esteve associado ao rápido desenvolvimento de um sistema convectivo intenso cujo movimento na direção aproximada de nordeste ativou áreas de tempestades na região Centro e Oeste de Santa Catarina. O sistema sinótico que estava atuando em Santa Catarina e Paraná era um sistema frontal com baixo contraste de temperatura, de forma que foi analisado como uma frente semi-estacionária pela análise da carta de superfície provida pela Marinha do Brasil. As Figuras 18 e 24 apresentam imagens satélite do canal de infravermelho (janela de 10,35 μm) ao lado das respectivas cartas de superfície analisadas pelo Centro de Hidrografia da Marinha Marinha do Brasil¹.

A Figura 18 apresenta, lado a lado, uma imagem de satélite das 00 UTC do dia 14 de agosto de 2020 e uma imagem de carta sinótica de superfície, com validade para a mesma data/hora. Conforme consta na imagem satélite e identificado na carta sinótica, havia um sistema semi-estacionário alongado sobre os estados de Santa Catarina e Paraná. A Figura 24 apresenta os mesmos tipos de dados para às 12 UTC e no qual o sistema aparece enfraquecido sobre o continente. Mas por outro lado, um sistema começa a desenvolver-se no sul do Paraguai associado a uma baixa pressão em superfície como pode ser visualizado na imagem satélite constante da Figura 24.

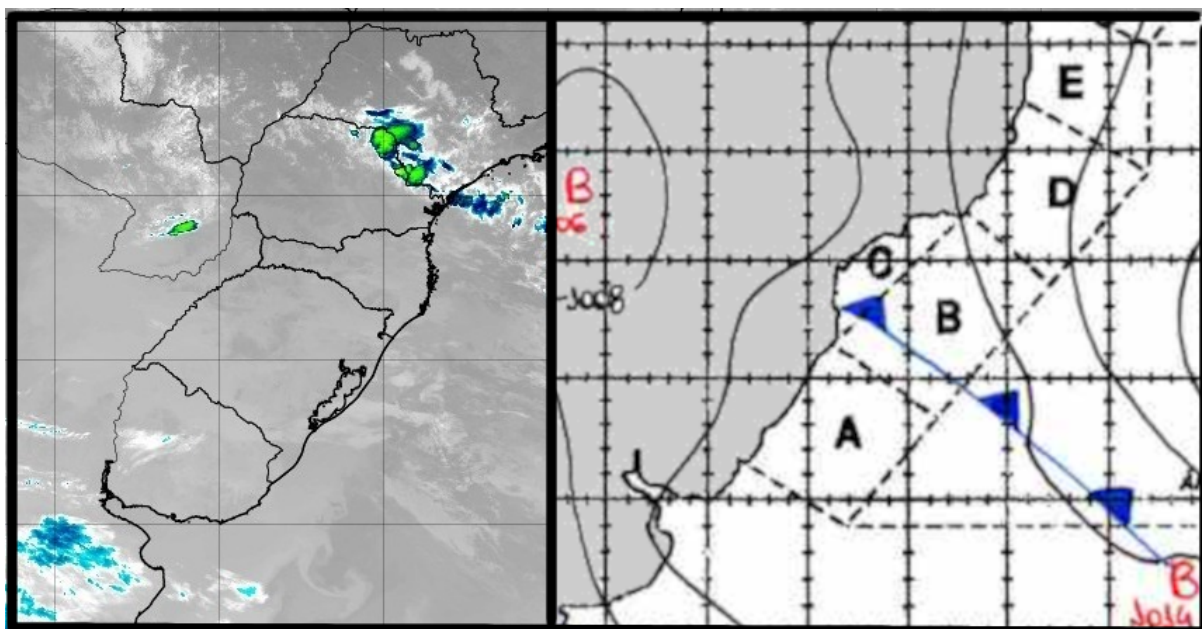
¹ Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>.

Figura 23 – Situação sinótica da data de 14/08/2020, às 00 UTC, representado por uma imagem do canal IR (à esquerda) e por um recorte da análise de superfície (à direita).



Fonte: o autor (2024) a partir de imagem satélite fornecida pelo CPTEC e análise de superfície provida pela Marinha do Brasil.

Figura 24 – Situação sinótica da data de 14/08/2020, às 12 UTC, representado por uma imagem do canal IR (à esquerda) e por um recorte da análise de superfície (à direita).

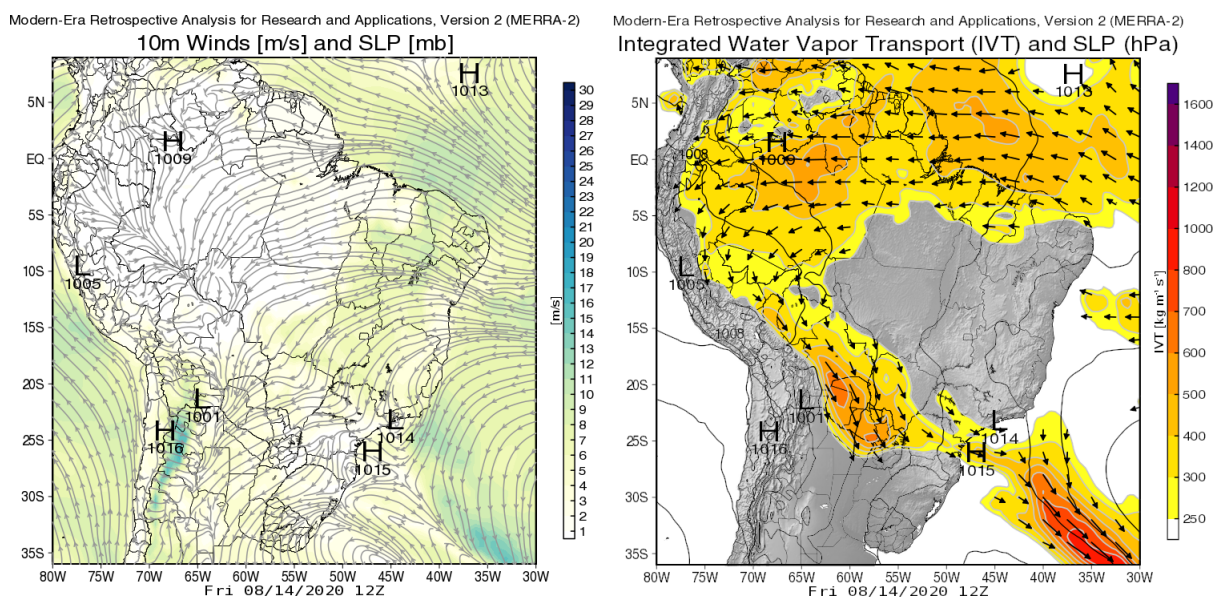


Fonte: o autor (2024) a partir de imagem satélite fornecida pelo CPTEC e análise de superfície provida pela Marinha do Brasil.

De forma a caracterizar o ambiente das condições atmosféricas anteriores ao disparo e maturação da convecção associada a um sistema convectivo de me-

soscala, serão apresentadas imagens relativas aos dados de reanálise *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2* (MERRA-2), disponibilizadas pelo *Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO) da Nasa (Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), 2015). O objetivo é apresentar o ambiente sinótico e de mesoscala no qual se desenvolveu a convecção e que resultou nas perdas ocorridas no Estado de SC. Todos os gráficos a seguir destacados foram obtidos da reanálise MERRA-2 e são válidos para às 12 UTC do dia 14 de agosto de 2020. A Figura 25 contém duas imagens: à esquerda, fluxo de vento em 10 metros com as cores indicando a velocidade em m/s; à direita, linhas de pressão à superfície em hPa, e o fluxo de transporte de vapor de água integrado (IVT). Os dados das duas imagens reportam que não havia um sistema de pressão claramente definido atuando na região Sul e na área do Norte da Argentina e Paraguai. O fluxo integrado de umidade irá caracterizar o suprimento de umidade que proporcionará o desenvolvimento do sistema convectivo no período da tarde do mesmo dia.

Figura 25 – Dados de reanálise MERRA-2 válidos para 14/08/2020, às 12UTC. À esquerda, vento em 10m e linhas de pressão à superfície. À direita, transporte de vapor de água integrado em conjunto a linhas de pressão à superfície.

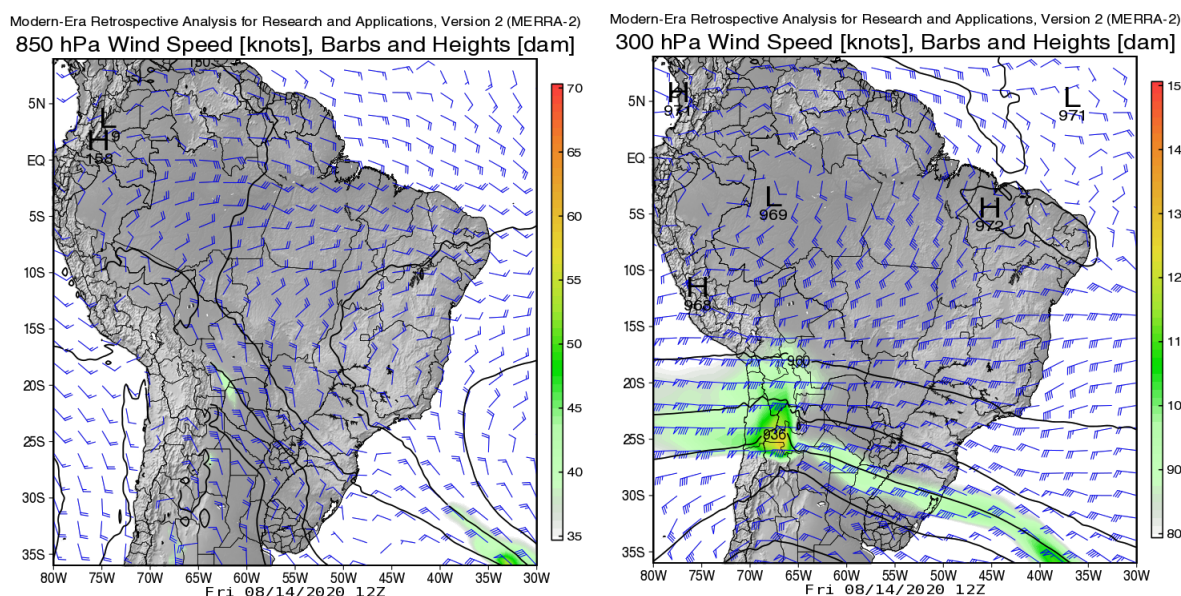


Fonte: Adaptado de Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015).

A Figura 26 contém dados de vento para o nível de 850 hPa e para o de 300 hPa. No caso do nível de 850 hPa, está claro que há um fluxo que segue na direção sudeste vindo da Bacia Amazônica, intensificando-se no Norte da Argentina, onde valores de velocidade estão entre 35 e 45 kt (aproximadamente entre 18 e 23 m/s). O gráfico à direita apresenta os ventos em 300 hPa, com destaque na cor verde para uma zona de ventos em torno de 90 kt. Conforme apontado no trabalho dos autores Salio et al. (2007), as configurações da circulação atmosférica presentes nos dados

apresentados configuram situação propícia para iniciar e maturar convecção associada a um sistema convectivo de mesoscala. O desenvolvimento do sistema convectivo a partir do início da tarde confirma que a configuração da dinâmica da atmosfera estava propícia a este tipo de formação.

Figura 26 – Dados de reanálise MERRA-2 válidos para 14/08/2020, às 12UTC. À esquerda, vento em 850 hPa e à direita o vento em 300 hPa.



Fonte: Adaptado de Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015).

5.2 Análise e discussão dos resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações numéricas usando o WRF, considerando todas as 131 execuções, de forma a contemplar todas as combinações de esquemas de parametrização de camada limite planetária (PBL) e de microfísica de nuvens (MP). Além das estatísticas sobre as diferenças entre a precipitação prevista e observada, foi possível executar testes estatísticos para identificar as significâncias das diferenças encontradas entre os diversos resultados.

5.2.1 Extração de dados de previsão do modelo WRF

O modelo WRF gera arquivos de saída em formato NetCDF, os quais contêm as variáveis do modelo associadas à informação de coordenadas de grade e de data e hora. As coordenadas geográficas das estações meteorológicas, que foram definidas na experimentação, conforme constante na Seção 4.4.1, contêm os dados observacionais. Ainda, seguindo a metodologia de extração de dados previstos pelo modelo, conforme consta na Seção 4.4.2, foi definido que os pontos de grade no WRF abrangessem as coordenadas geográficas das estações meteorológicas. Assim, para cada estação de observação constante do Quadro 3, foram extraídos 25 pontos de dados dos arquivos

Tabela 1 – Médias dos resultados das sumarizações estatísticas considerando todos os experimentos (execuções), para todas as localidades e para todo o período de previsão.

Parâmetro Estatístico	Média	Mediana	Mínimo	Máximo
BIAS	-0,5750	-0,6014	-0,7366	-0,2991
MAE	1,0392	1,0006	0,8970	1,4282
RMSE	3,387	3,347	3,147	3,973

Fonte: Elaboração própria (2025).

NetCDF gerados pelo WRF através do uso de *script* em linguagem R (R Core Team, 2024) e usando o pacote “ncdf4” (Pierce, 2021). Esses 25 pontos de dados previstos foram sumarizados em uma média e cada qual corresponde à média prevista para as seguintes localidades: Chapecó; Xanxerê; Joaçaba; Campos Novos; Curitiba; e, Caçador.

As diferenças entre a precipitação média prevista e aquela observada para cada localidade foram sumarizadas estatisticamente através das medidas de RMSE, MAE e BIAS, conforme descritas na Seção 4.4. Foi criado um arquivo CSV² com três colunas: PBL, MP e RMSE. Na sequência, dois tipos de análises foram feitas e que serão apresentadas nas seções seguintes: a) análise descritiva dos resultados das sumarizações estatísticas; e, b) testes de significância estatística para avaliar a hipótese de influência das parametrizações PBL e MP sobre a previsão de precipitação.

5.2.2 Análise descritiva dos dados

A partir das médias de precipitação prevista para cada localidade, e sobre todo o período de previsão (24 horas), foram feitas diferenças em relação aos respectivos dados observacionais. Considerando todas as diferenças entre observado e previsto, foram obtidas sumarizações estatísticas para o erro sistemático (BIAS), erro médio absoluto (MAE) e para a raiz do erro quadrático médio (RMSE) que seguem listadas na Tabela 1.

Os resultados das médias de todas as configurações, conforme valores constantes na Tabela 1, indicam que o modelo subestimou os valores de precipitação. Essa conclusão se baseia nos valores de média de erro sistemático (Bias), que foi calculada para todas as localidades e sobre todos os horários. Ainda, ela é independente dos esquemas de parametrização de PBL e de MP, conforme será detalhado a seguir.

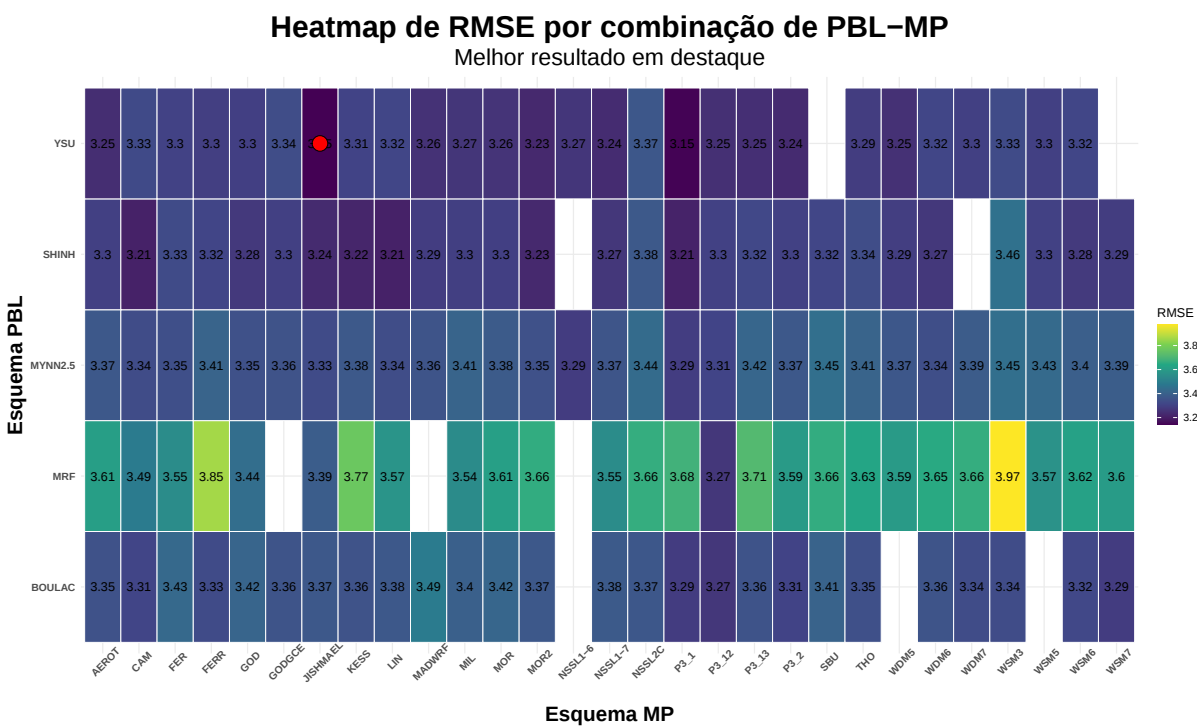
5.2.3 Análise do desempenho para configurações PBL-MP

Nesta seção serão apresentadas e discutidas as estatísticas de RMSE considerando o desempenho do modelo WRF para a combinação dos esquemas das

² Formato CSV (*Comma-Separated Values*) é um arquivo texto no qual valores são separados por vírgulas.

parametrizações de camada limite planetária e de microfísica de nuvens (PBL-MP). O gráfico constante da Figura 27 apresenta o contexto geral dos valores de RMSE para cada execução do experimento considerando a respectiva configuração PBL-MP. O eixo horizontal contém os esquemas de parametrização MP e o eixo vertical, os esquemas de PBL. A gradação de cores indica os valores de erro RMSE, sendo as mais escuras, com erro menor, e as mais claras com erro maior.

Figura 27 – Plotagem (Boxplot) dos dados de RMSE em relação aos esquemas de parametrização PBL.



Fonte: Elaboração própria (2025).

O gráfico de mapa de calor apresenta os valores de RMSE para todas as configurações de PBL-MP que foram executadas. Visualmente, é possível identificar que o esquema PBL YSU possui o menor erro RMSE, independente de esquemas de MP. Na sequência, o esquema SHINH registrou o menor erro para a maioria das combinações de esquemas de MP. O esquema de PBL MRF foi o que apresentou os maiores erros, para a maior parte das combinações de parametrização PBL-MP. As diferenças entre esquemas MP já não é tão significativa, como pode ser identificado na imagem. Os esquemas de MP P3_1 e P3_12 são os que apresentaram os menores erros RMSE para a maior parte das configurações de PBL-MP. O ponto em vermelho identifica a configuração que teve o menor erro de RMSE, no caso, YSU-JISHMAEL.

Considerando o gráfico da Figura 27, são apresentados os resultados de RMSE que obtiveram valores abaixo de 3,25. Assim, a Tabela 2 apresenta os resultados individuais de RMSE considerando as configurações de camada limite planetária e de

microfísica de nuvens (PBL-MP). As duas configurações que obtiveram os menores erros tinham como configuração de PBL o esquema YSU e os esquemas de MP JISHMAEL e P3_1. Na sequência, as configurações que usaram os esquema de PBL SHINH, associado aos esquemas LIN, CAM, P3_1, KESS e MOR2.

Tabela 2 – Configurações de MP e de PBL cujos valores de RMSE ficaram abaixo de 3,25.

PBL	MP	Valor de RMSE (aproximado para casa centesimal)
YSU	JISHMAEL	3,14
YSU	P3_1	3,15
SHINH	LIN	3,21
SHINH	CAM	3,21
SHINH	P3_1	3,21
SHINH	KESS	3,22
SHINH	MOR2	3,23
YSU	MOR2	3,23
SHINH	JISHMAEL	3,24
YSU	P3_2	3,24
YSU	NSSL1-7	3,24
YSU	AEROT	3,25
YSU	P3_13	3.25

Fonte: Elaboração própria (2025).

5.2.4 Análise das estatísticas de Bias, MAE e de RMSE

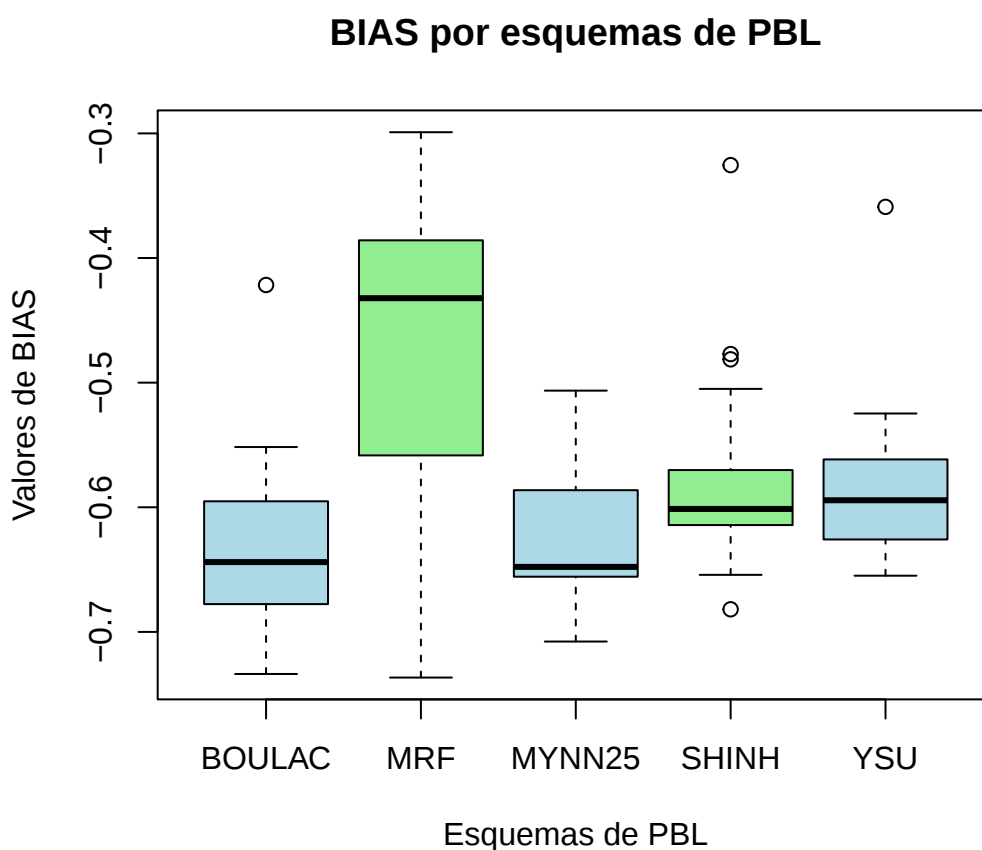
Nesta seção serão descritos os resultados associadas às sumarizações estatísticas de Bias, MAE e RMSE considerando as análises dos esquemas para cada tipo de parametrização (PBL e MP). Serão usadas plotagens Boxplot para apresentar visualmente os dados. Esse tipo de gráfico discrimina os dados ordenados por quartis, no qual se destacam os valores de mediana³ através de uma linha horizontal no meio do retângulo. Os valores plotados como círculos representam valores discrepantes (*outliers*).

A plotagem constante na Figura 28 apresenta os valores médios de BIAS por esquema de parametrização de PBL. Como pode ser visualizado na imagem, todas as parametrizações de PBL subestimaram valores de precipitação. Também pode ser evidenciado pela imagem que o desempenho global do esquema MRF teve um desvio médio menor que os demais esquemas, apesar de apresentar maior variabilidade entre as diferentes configurações de PBL. Também é destaque no gráfico que os valores mínimos de desvio do esquema MRF condizem com valores de *outliers* mínimos para os esquemas de PBL, SHINH e YSU. Essa última caracterização pode indicar que os três esquemas de PBL desempenham melhor sob determinadas configurações contendo

³ A mediana é uma medida robusta de localização que não é influenciada por valores extremos (*outliers*).

esquemas determinados de MP. Os outros esquemas de PBL, no caso, BOULAC, MYNN2.5, SHINH e YSU apresentaram valores mais altos de desvios e demonstraram pouca variância quanto aos diferentes tipos de esquemas de MP. Também está claro que os esquemas referidos tiveram um desempenho de desvio baixo (como valor de *outlier*) para uma determinada configuração de PBL-MP. Os valores de desvio menores e que consistem nos valores discrepantes serão avaliados em testes estatísticos para verificar a hipótese de influência dos parâmetros e também na interação entre parametrizações PBL e MP.

Figura 28 – Plotagem (Boxplot) dos dados de BIAS em relação aos esquemas de parametrização PBL.

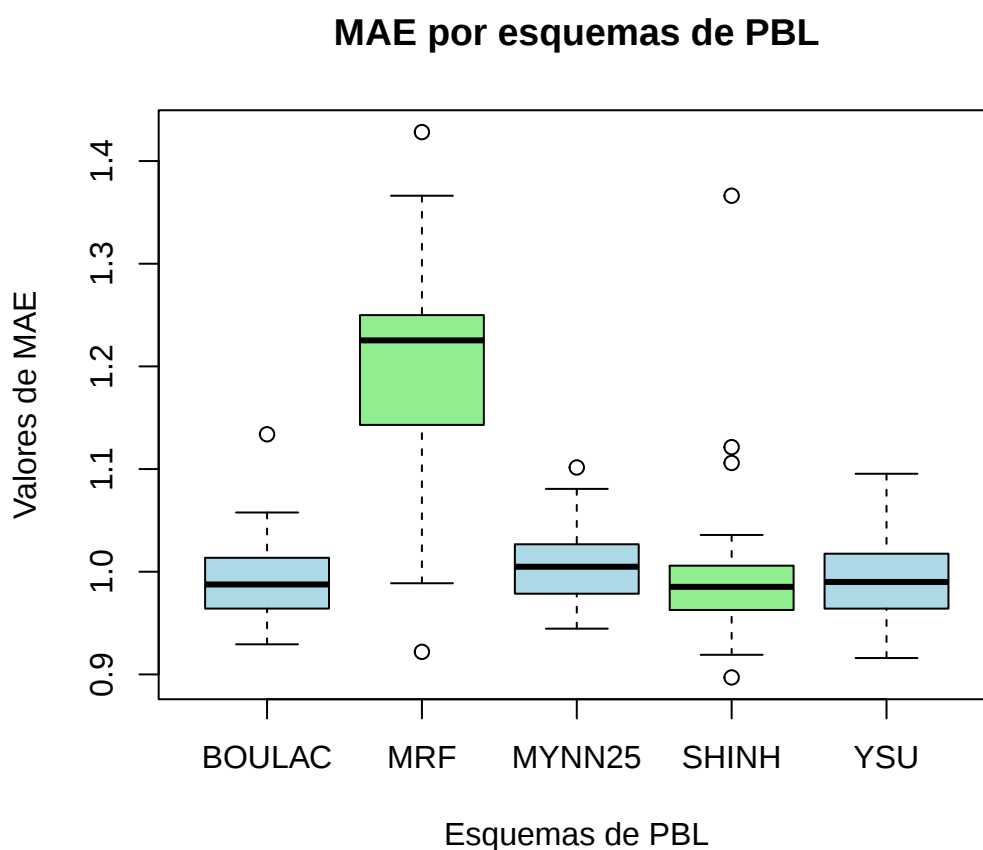


Fonte: Elaboração própria (2025).

Os gráficos constantes nas Figuras 29 e 30 apresentam, respectivamente, plotagens boxplot de valores de MAE e de RMSE em relação aos esquemas de PBL. O esquema MRF de parametrização PBL se diferencia dos demais nos seguintes aspectos: a) maior variabilidade entre as diferentes configurações de MP; e, b) valores mais altos de MAE e de RMSE, indicando uma menor acurácia do modelo para este esquema de PBL. Os esquemas BOULAC, MYNN2.5, SHINH e YSU apresentaram variabilidade baixa e valores baixos de MAE e RMSE, indicando níveis de acurácia

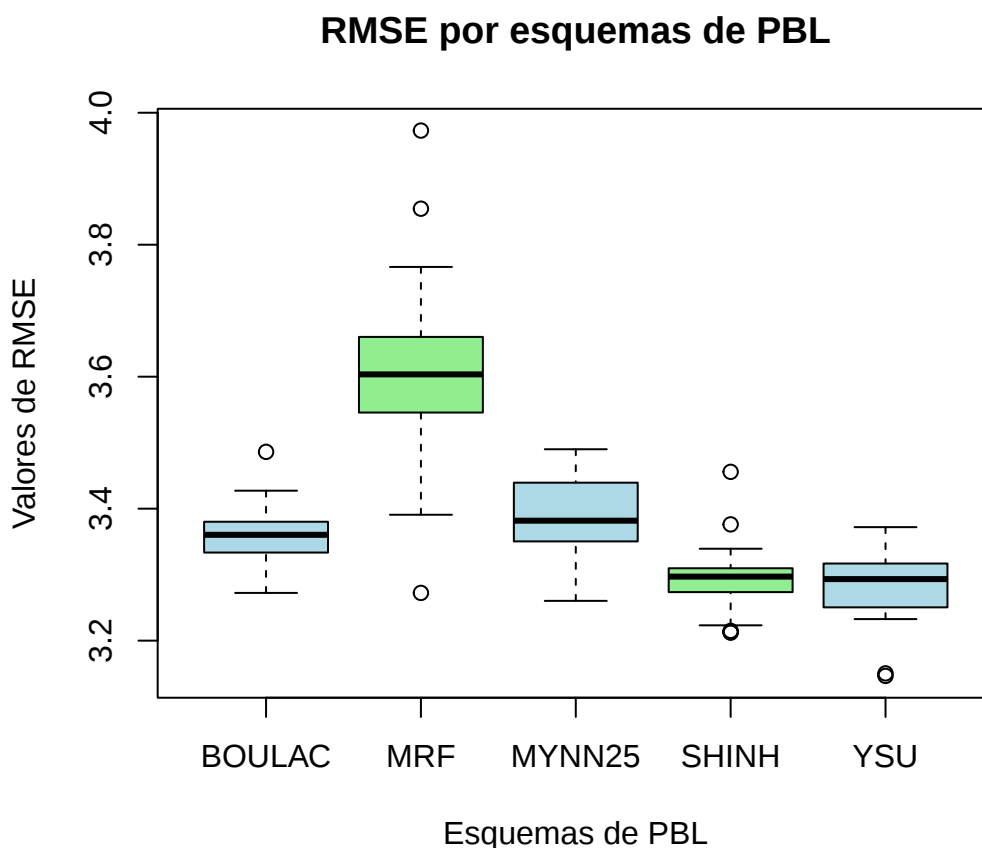
melhores que o MRF. Especificamente, o **esquema YSU possui um valor baixo de RMSE discrepante** e que pode indicar uma configuração de PBL e MP que permite ao WRF obter a melhor habilidade na previsão de precipitação.

Figura 29 – Plotagem (Boxplot) dos dados de MAE em relação aos esquemas de parametrização PBL.



Fonte: Elaboração própria (2025).

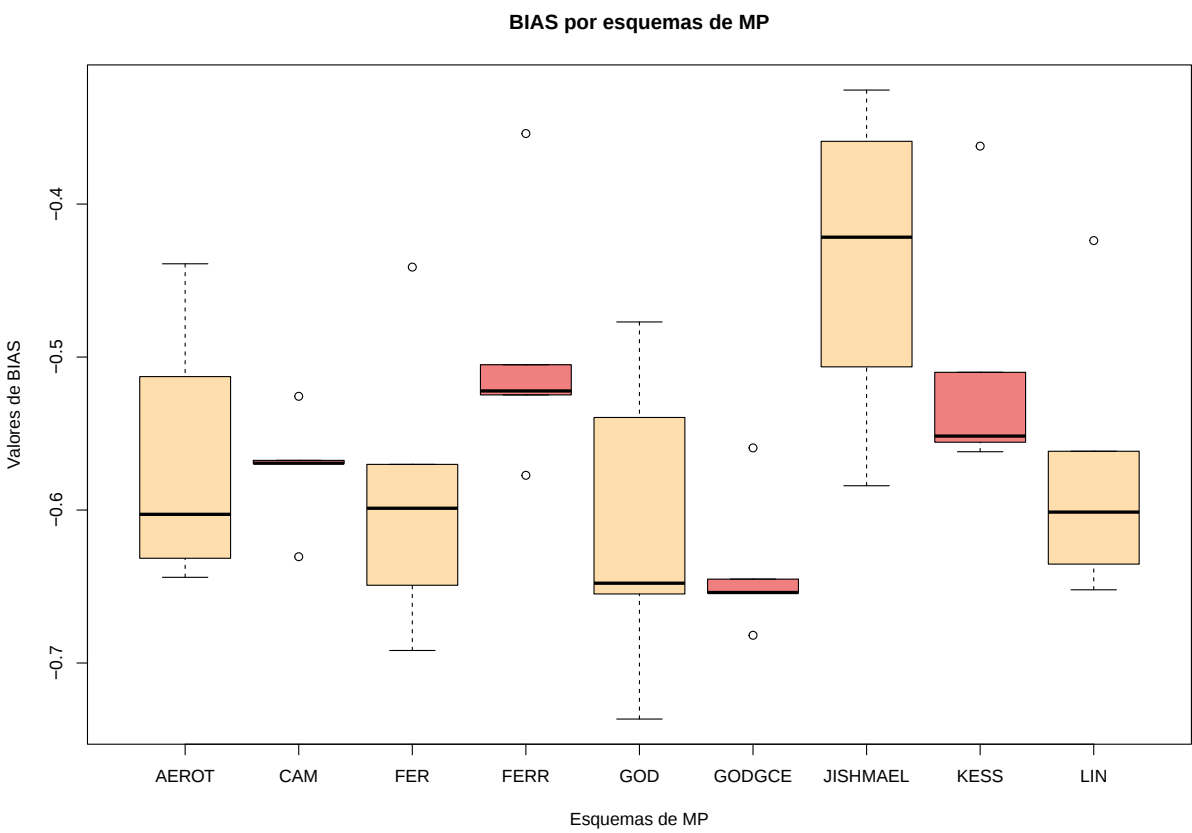
Figura 30 – Plotagem (Boxplot) dos dados de RMSE em relação aos esquemas de parametrização PBL.



Fonte: Elaboração própria (2025).

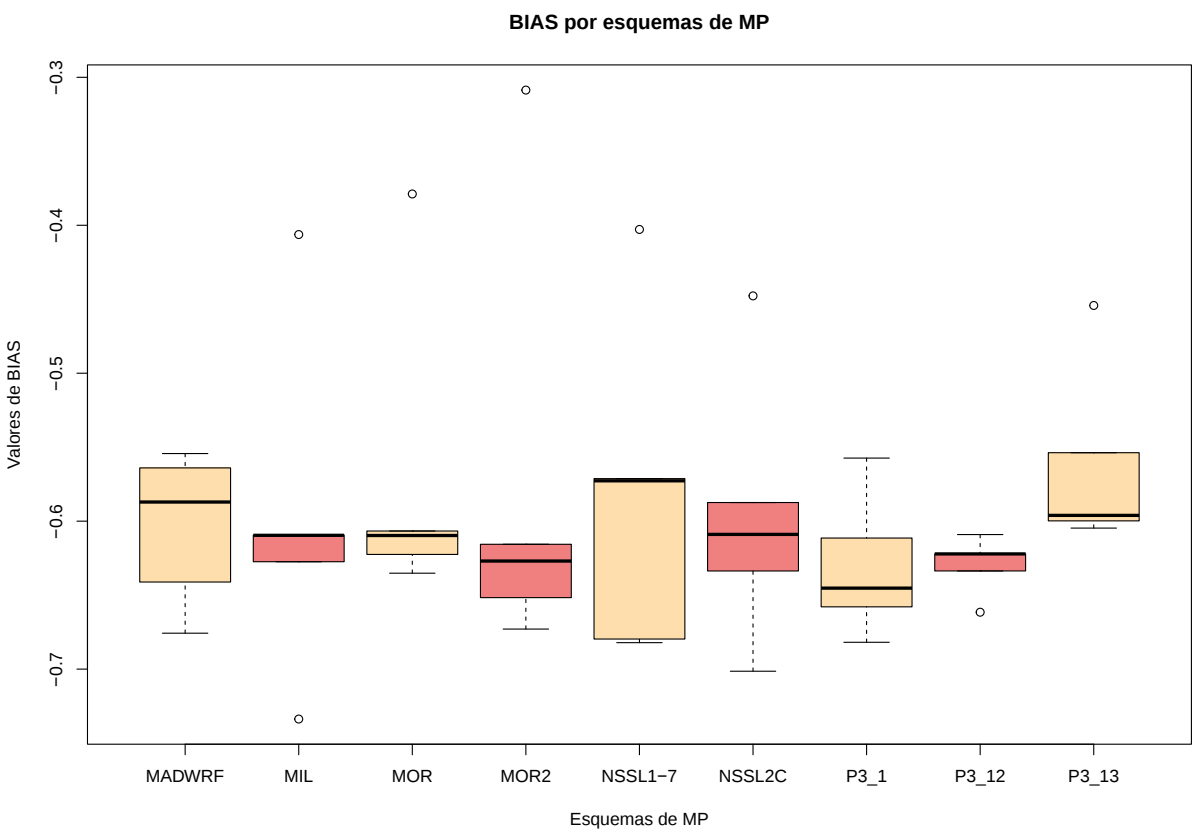
As Figuras 31, 32 e 33 apresentam os gráficos dos valores de BIAS por MP. De forma geral, todos os esquemas de MP estão associados a subestimativa de quantidade de precipitação prevista pelo modelo WRF. O esquema JISHMAEL (parâmetro de MP) foi o que apresentou os valores menores de desvio, de forma que foi o que teve melhor performance neste indicador estatístico. Os esquemas FERR, KESS, MOR3 e WSM3 apresentaram valores discrepantes baixos, ao lado do esquema JISHMAEL. Os valores discrepantes estão associados a configurações específicas de MP e PBL.

Figura 31 – Plotagem (Boxplot) dos dados de BIAS em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 1/3).



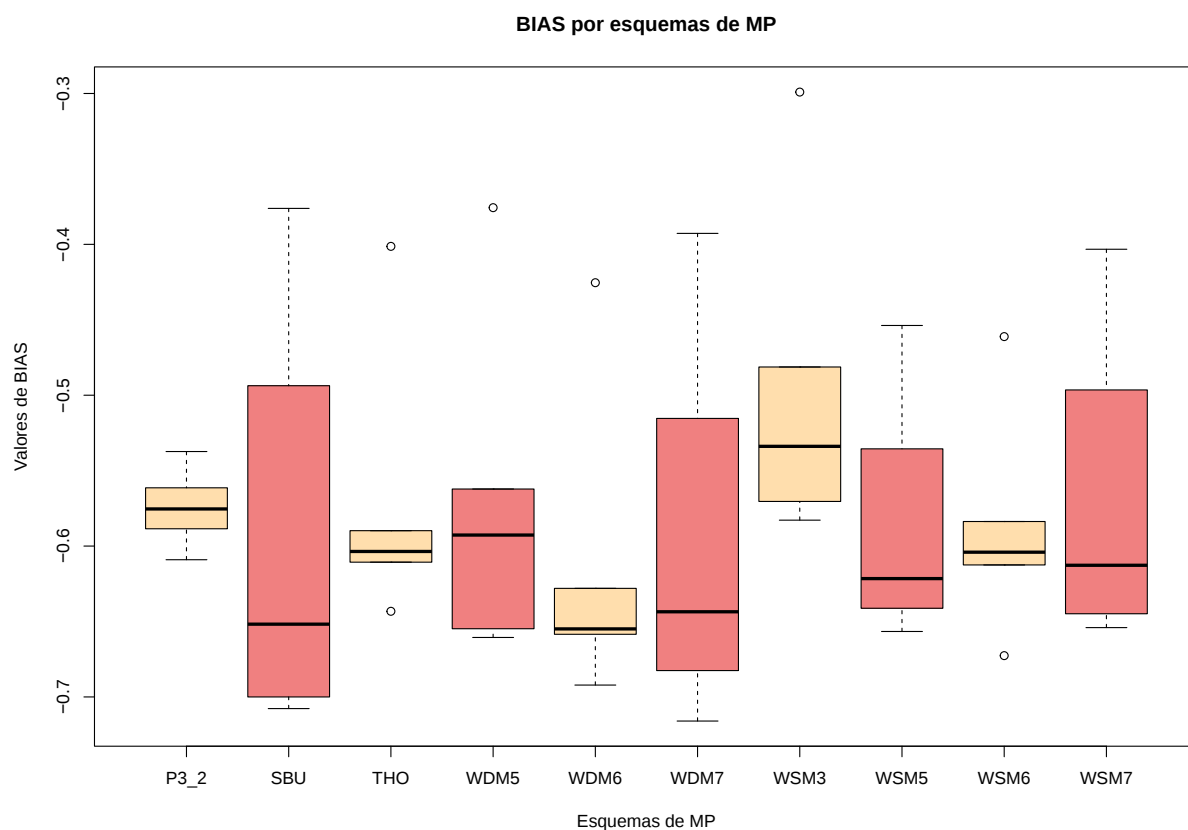
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 32 – Plotagem (Boxplot) dos dados de BIAS em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 2/3).



Fonte: Elaboração própria (2025).

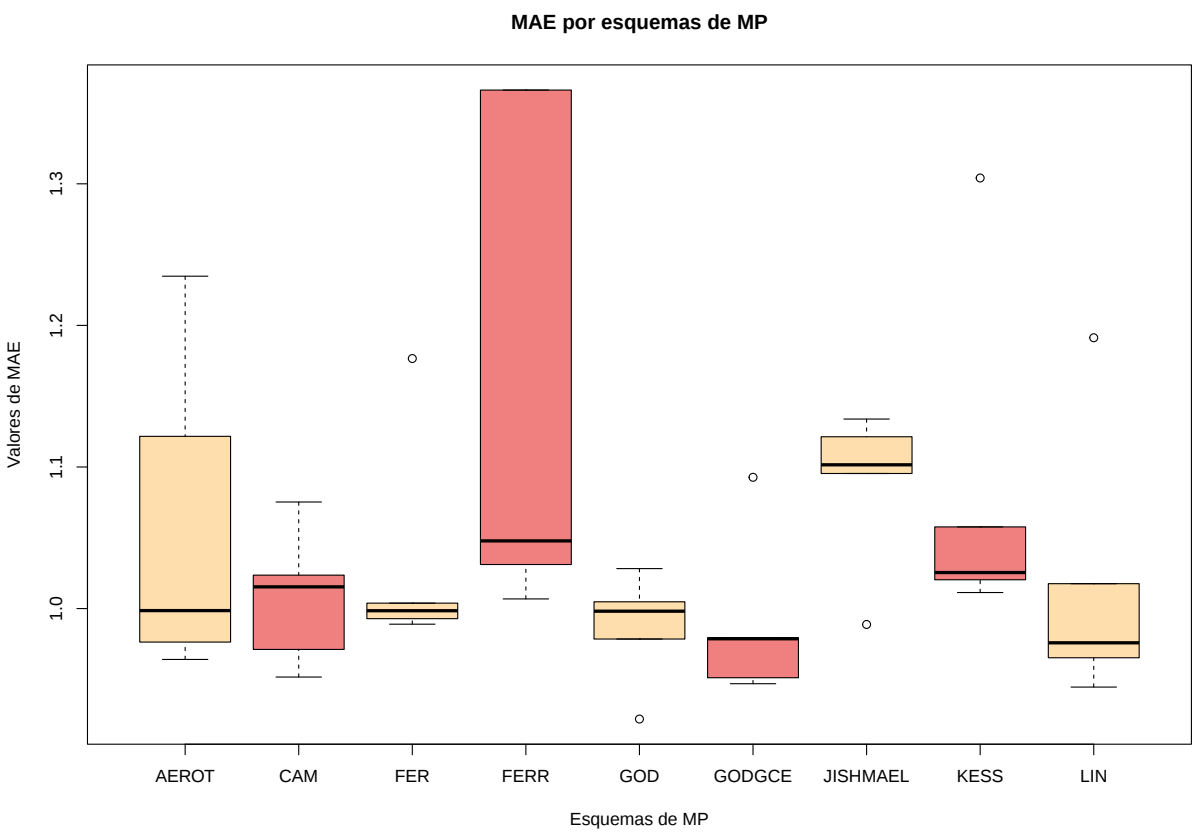
Figura 33 – Plotagem (Boxplot) dos dados de BIAS em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 3/3).



Fonte: Elaboração própria (2025).

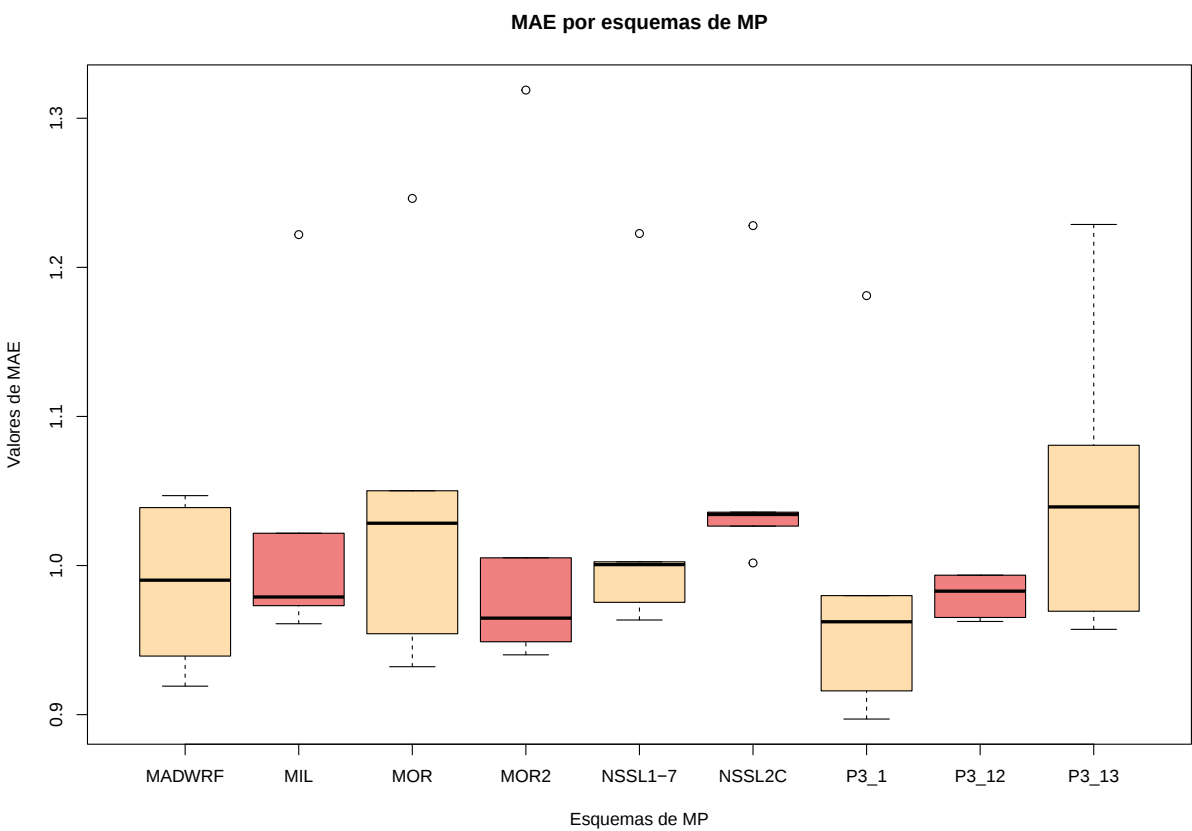
As Figuras 34, 35 e 36 apresentam os gráficos dos valores de MAE por MP. De forma geral, os seguintes esquemas de MP estavam associados a configurações de execução cuja métrica estatística de MAE ficou em torno do valor de 1,0 (valor de mediana): AEROT, CAM, FER, GOD, KESS, LIN, MADWRF, MIL, MOR, NSSL1-7, NSSL2C, P3_12, P3_2, SBU, THO, WDM5, WDM7, WSM5, WSM6 e WSM7. Já os esquemas de MP GODGCE, LIN, MOR2, P3_1 e WDM6 apresentaram valores de mediana abaixo do valor de 1,0 aliado à baixa variabilidade entre as configurações de PBL. Alguns dos esquemas listados anteriormente também se caracterizam por estarem associados a configurações com valor discrepantes altos de MAE, especificamente, os seguintes: KESS, LIN, MIL, MOR, MOR2, NSSL1-7, NSSL2C, P3_13, SBU e WSM3. A Figura 34 contém a plotagem do esquema FERR que se destaca pela alta variabilidade e por valores altos de erros absolutos.

Figura 34 – Plotagem (Boxplot) dos dados de MAE em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 1/3).



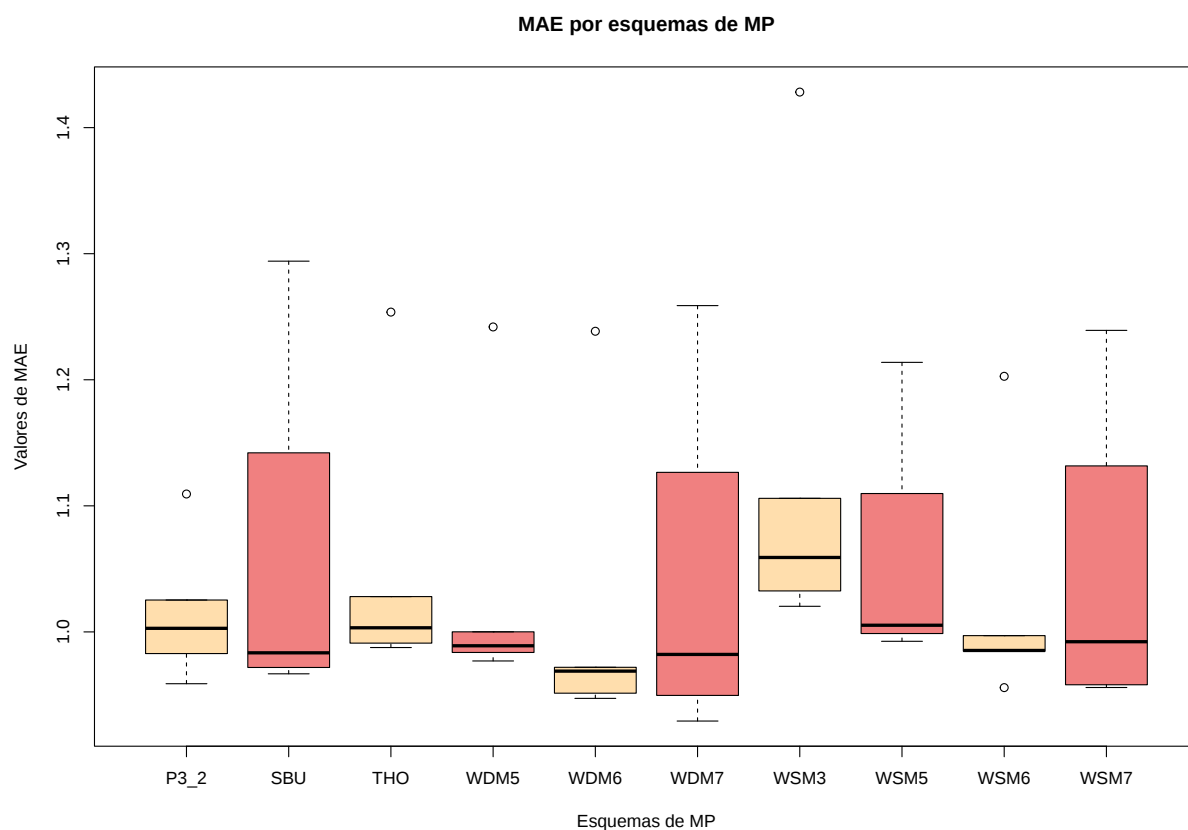
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 35 – Plotagem (Boxplot) dos dados de MAE em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 2/3).



Fonte: Elaboração própria (2025).

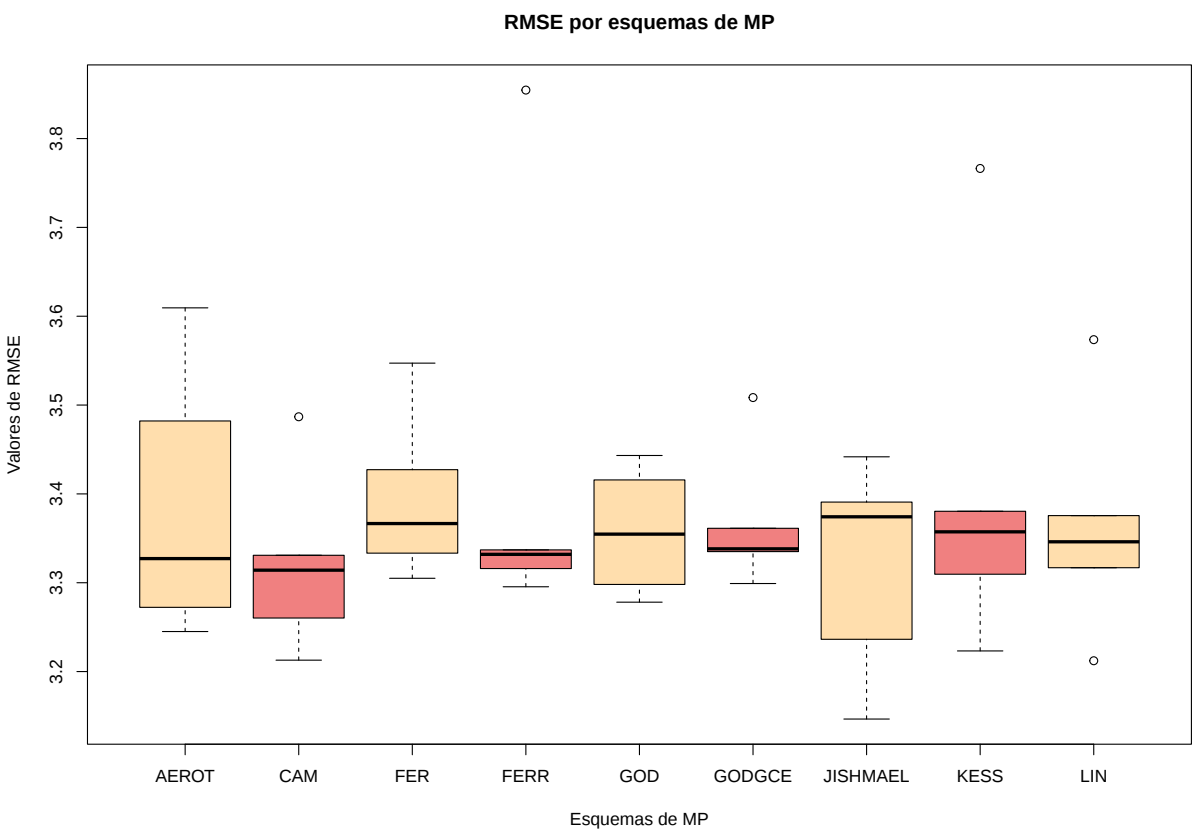
Figura 36 – Plotagem (Boxplot) dos dados de MAE em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 3/3).



Fonte: Elaboração própria (2025).

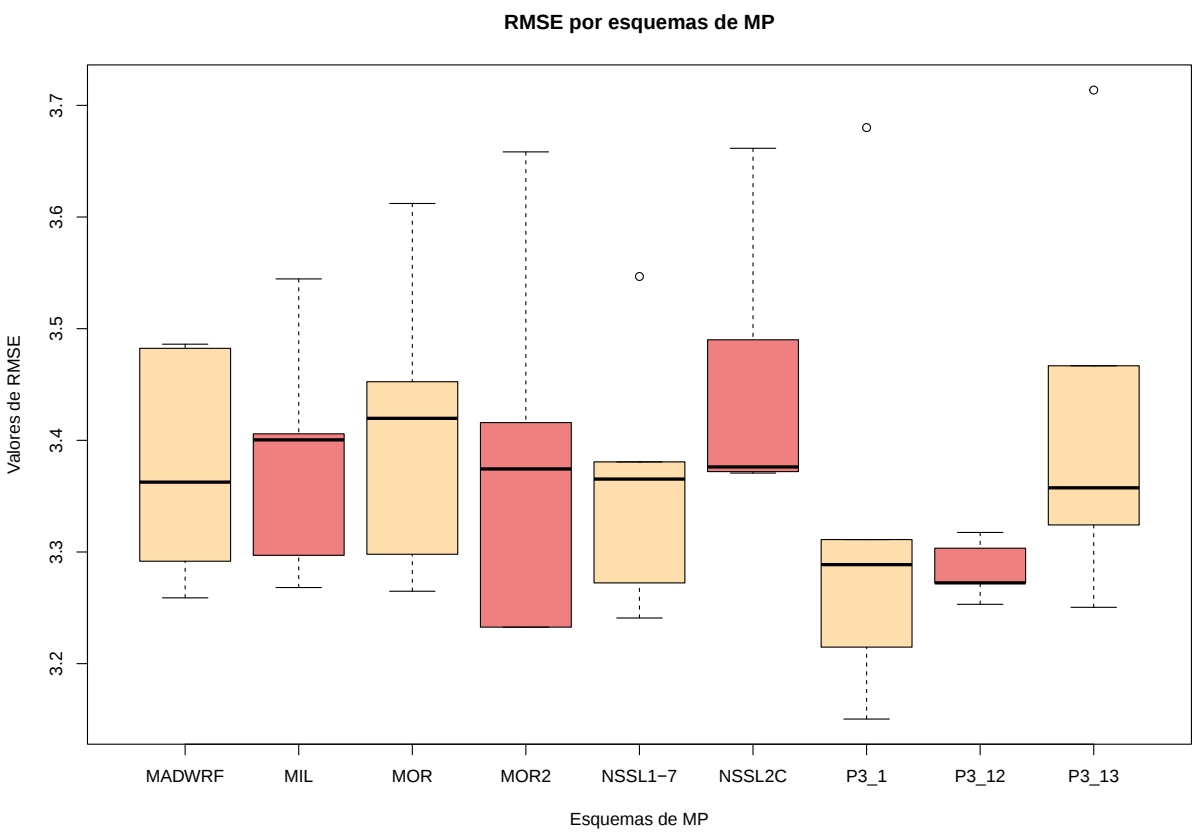
As Figuras 37, 38 e 39 apresentam os gráficos dos valores de RMSE por MP. Essa medida é mais sensível a valores extremos e, de forma geral, a tendência dos esquemas seguiu o padrão da medida de MAE. Algumas configurações de MP apresentaram valores de erro RMSE bastante altos (*outliers*), contudo, os esquemas JISHMAEL e P3_1 obtiveram valores abaixo de 3,2. Os seguintes esquemas de MP obtiveram valores de RMSE acima de 3,2 e abaixo de 3,25: LIN, CAM, KESS, MOR2, P3_2, NSSL1-7, AEROT e P3_13. Os testes estatísticos têm a função de indicar se essas diferenças são significativas e/ou se há significância estatística na combinação de determinados esquemas de PBL e MP.

Figura 37 – Plotagem (Boxplot) dos dados de RMSE em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 1/3).



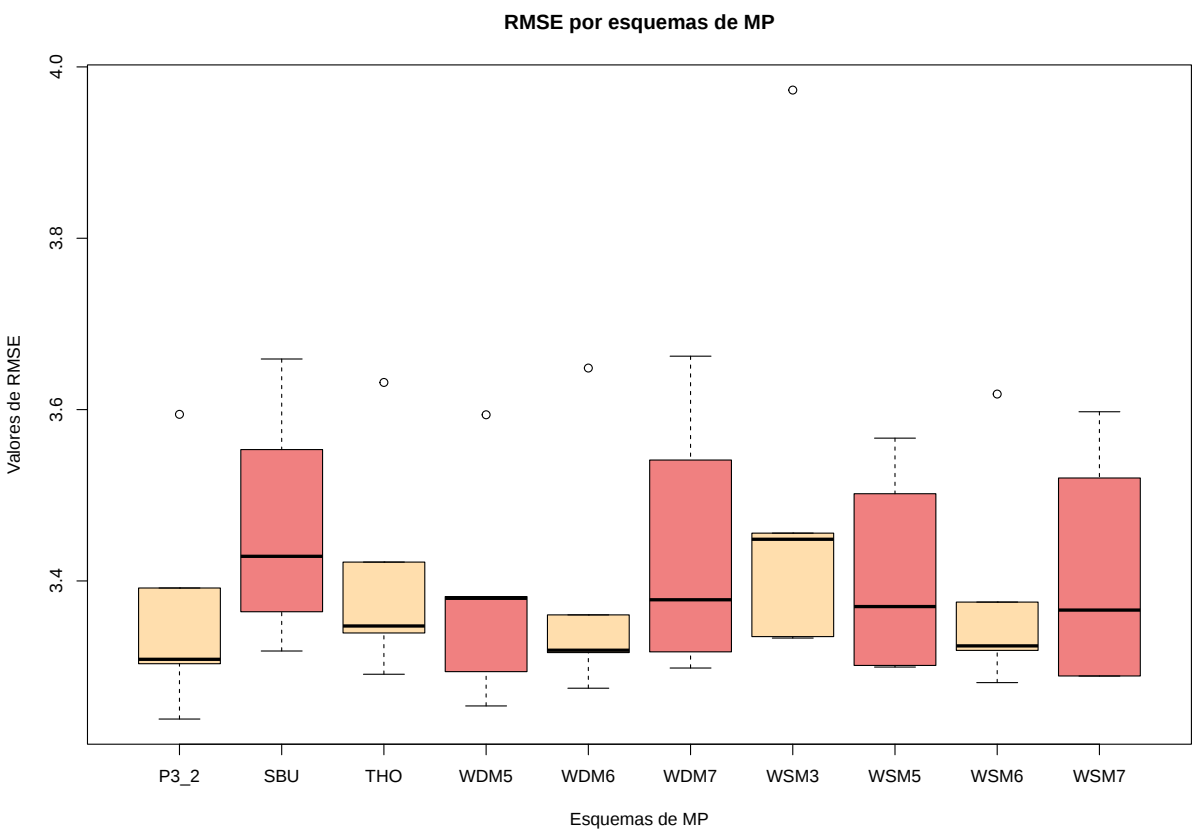
Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 38 – Plotagem (Boxplot) dos dados de RMSE em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 2/3).



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 39 – Plotagem (Boxplot) dos dados de RMSE em relação aos esquemas de parametrização MP (parte 3/3).



Fonte: Elaboração própria (2025).

Foram calculadas as médias dos valores de RMSE para esquemas de PBL e para esquemas de MP, de forma a complementar com um valor numéricos os gráficos boxplot de RMSE por PBL (Figura 30) e por MP (Figuras 37, 38 e 37). Os valores médios de RMSE dos esquemas de PBL, considerando todas as configurações de execução são encontrados na Tabela 3. Os valores médios indicam que os esquemas de PBL YSU e SHINH possuem os menores erros para qualquer configuração.

Tabela 3 – Valores médios de RMSE para cada esquema de PBL considerando todas as configurações de PBL-MP.

PBL	Valor médio de RMSE (aproximado para casa centesimal)
YSU	3,28
SHINH	3,29
BOULAC	3,36
MYNN2.5	3,39
MRF	3,61

Fonte: Elaboração própria (2025).

Tabela 4 – Valores médios de RMSE para cada esquema de MP considerando todas as configurações de PBL-MP.

MP	Valor médio de RMSE (aproximado para casa centesimal)
P3_12	3,28
JISHMAEL	3,29
CAM	3,32
P3_1	3,33
GODGCE	3,33
MADWRF	3,35
GOD	3,36
NSSL1-7	3,36
LIN	3,36
P3_2	3,37
AEROT	3,38
WDM5	3,38
MOR2	3,38
MIL	3,38
WSM6	3,38
WDM6	3,38
FER	3,40
WSM5	3,40
WSM7	3,40
THO	3,41
KESS	3,41
MOR	3,41
P3_13	3,42
FERR	3,43
WDM7	3,43
NSSL2C	3,45
SBU	3,46
WSM3	3,51
NSSL1-6	-

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os valores médios de RMSE dos esquemas de MP, considerando todas as configurações de execução PBL-MP são encontrados na Tabela 4. Os valores de erro quadrático RMSE estão entre os valores médios de 3,28 e 3,51, ou seja, do que se pode deduzir que a parametrização de microfísica não apresenta influência significativa nos resultados de todas as configurações. O esquema de MP P3_12 foi o que apresentou a menor média de erro RMSE para todas as configurações de PBL-MP, seguido do esquema JISHMAEL. Um teste estatístico pode reportar a significância das diferenças e também indicar a configuração com melhor desempenho global.

5.2.5 Análise de Variância RMSE - ANOVA

Os experimentos trataram de executar configurações do modelo onde haviam dois fatores: parametrização de PBL e parametrização de MP. Esses dois fatores estão relacionados aos respectivos esquemas de física. Conforme os diversos trabalhos anteriores na área, sumarizados no Capítulo 3 (Trabalhos Relacionados), os resultados da previsão do modelo WRF são influenciados em certa medida pelos esquemas de física usados. A variabilidade e os valores obtidos das estatísticas clássicas apresentadas na Seção 5.2.2 demonstram que determinados esquemas de PBL e de MP geram diferenças nos resultados de previsão de precipitação. A técnica da estatística inferencial referida pelo nome ANOVA (Análise de Variância)⁴ permite avaliar a hipótese de influência de determinados fatores categóricos (MP e PBL) sobre uma determinada variável quantitativa (precipitação). Ela se baseia na comparação entre as médias de diferentes amostras. Assim, com um nível de confiança de 95%, espera-se poder identificar se há diferença significativa nos resultados de RMSE entre esquemas de PBL, entre esquemas de MP e na interação (combinação) de esquemas PBL-MP. Logo, com o teste estatístico de significância, deve-se decidir pelos:

- Efeitos principais do PBL;
- Efeitos principais do MP; e
- Efeitos da interação PBL e MP.

A realização dos testes de ANOVA foi executada através do uso da linguagem R (R Core Team, 2024). Foram obtidas três medidas de sumarização estatística a partir da extração dos dados, conforme os valores constantes nos Apêndices A, B e C. Contudo, a medida RMSE é mais adequada para obter a acurácia do modelo pois é sensível a valores discrepantes (*outliers*).

Num primeiro momento, foi realizado teste ANOVA *Two-Way* considerando os fatores categóricos PBL e MP. Devido a erro na execução da respectiva função, tanto no R quanto em Python, foi adotado o teste ANOVA *One-Way*. Conforme os resultados dos testes constantes no Apêndice D, os seguintes valores para valor-p (*p-value* ou *Pr*, conforme consta nos resultados) foram obtidos:

- Parametrização de MP (microfísica): valor-p = 0,988, logo, não é possível rejeitar a hipótese nula. Então, esquemas de MP não tem efeito estatístico significativo sobre a medida RMSE.

⁴ Definições básicas em ANOVA podem ser encontradas em https://en.wikipedia.org/wiki/Analysis_of_variance.

- Parametrização de PBL (camada limite planetária): valor- $p < 2^{-16}$, logo, a hipótese nula é rejeitada. Esquemas de PBL têm efeito significativo na medida RMSE.

Como os esquemas de PBL têm influência significativa nos valores de RMSE, deve-se buscar aqueles esquemas que são estatisticamente diferentes no valor de RMSE quando comparado com os outros. Foi usado o teste Tukey HSD (*Honestly Significant Difference*) que compara pares de esquemas de PBL para determinar se são significativamente diferentes quanto aos valores de RMSE. O gráfico Boxplot da Figura 30 apresenta a expressão visual das diferenças entre valores de RMSE e o teste de significância permitiu obter as seguintes conclusões:

- Os pares de esquemas BOULAC-MYNN2.5 e SHINH-YSU não são significativamente diferentes;
- O esquema MRF é diferente significativamente de todos os outros esquemas de PBL. A Figura 30 confirma esse achado, pois foi o esquema de PBL com pior desempenho entre os demais.
- Os esquemas de PBL BOULAC e MYNN2.5 são significativamente diferentes dos esquemas SHINH e YSU.

Os achados do teste Tukey ao lado da plotagem de RMSE por PBL usando Boxplot evidenciam que os esquemas de PBL SHINH e YSU são os que tiveram os menores erros de RMSE. E, os respectivos valores são significativamente menores que os demais esquemas de PBL testados.

5.3 Resultados e produtos

Serão apresentados resultados da pesquisa e do trabalho de experimentação com o modelo WRF. O projeto de pesquisa com o delineamento da metodologia foi publicado em revista (Camillo & Herdies, 2021). Ainda há a possibilidade de publicação dos resultados obtidos da pesquisa, considerando o potencial que a modelagem regional tem para auxiliar nos sistemas de alerta de emergência.

Considerando o contexto da redução do risco de desastres naturais, há duas contribuições. A primeira, que foi resultado da pesquisa no qual foram encontrados esquemas de parametrização que obtiveram o menor erro para o caso que fora experimentado. A validação dessa configuração deverá considerar ainda verificações em modo operacional do modelo para pelo menos um ano de acompanhamento, fins de acomodar a variabilidade das estações do ano.

Em segundo lugar, foram desenvolvidos programas em linguagem de *shell script* Bash para automatizar a execução do modelo WRF. Com algumas alterações é

possível acomodar o programa para variadas configurações de instalação. Ainda, foram disponibilizados *scripts* em linguagem R para extração e cálculo de estatísticas a partir de dados de saída do modelo em formato NetCDF.

O produto desenvolvido como resultado do trabalho se encontra especificado no Apêndice E. O respectivo PTT se trata de um roteiro de metodologia com especificação dos passos e técnicas usados para desenvolver a experimentação. Incluem ainda programas em forma de *scripts* para extrair dados e para execução do modelo WRF.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por enfoque compreender o impacto de determinados esquemas de parametrização na previsão de fenômenos atmosféricos intensos originados por nuvens de desenvolvimento profundo através de experimentação com modelagem numérica. Para efeitos de sensibilidade da previsão de um modelo numérico, algumas parametrizações possuem impacto maior e mais direto na acurácia. A bibliografia tem avaliado o impacto das parametrizações de camada limite planetária (PBL) e de microfísica (MP), isoladamente, ou em conjunto, na acurácia de modelos numéricos em simular eventos associados à convecção profunda. Nesta pesquisa, foram feitas experimentações com configurações de PBL e MP para avaliar a assertividade do modelo WRF em simular precipitação de um caso envolvendo convecção severa sobre o centro e o Oeste de Santa Catarina.

As análises estatísticas considerando as diferenças entre a previsão de precipitação pelo modelo WRF e as respectivas observações de superfície levaram às seguintes conclusões. O modelo WRF subestimou a previsão de quantidade de precipitação, independentemente da configuração de esquemas de parametrização PBL e de MP. Foram verificados os valores de erro médio RMSE entre o previsto e o observado e foram encontradas diferenças de valores entre esquemas de PBL. Para esquemas de parametrização de MP não foram encontradas diferenças significativas. Os esquemas de PBL **YSU e SHINH** foram os que apresentaram os menores erros de RMSE, significativamente menores que os demais esquemas de PBL. Os cinco esquemas de MP que obtiveram os menores erros de RMSE foram os seguintes: P3_12, JISHMAEL, CAM, P3_1 e GODGCE. Todos com valores de RMSE iguais ou abaixo de 3,33. Para avaliar a significância estatística das diferenças nos valores RMSE, foram feitos testes estatísticos. Os resultados indicaram que esquemas de PBL impactaram significativamente nos resultados enquanto que esquemas de MP não reportam essa significância. Ou seja, os testes estatísticos indicaram que não há diferença estatística significativa entre os diferentes esquemas de MP quanto aos valores de erro médio RMSE. Contudo, foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre os diferentes esquemas de PBL, de forma que os esquemas PBL **YSU e SHINH** tiveram o melhor resultado e o esquema PBL **MRF** o pior desempenho.

Os resultados de RMSE considerando as configurações de PBL-MP reportaram que os esquemas **YSU-JISHMAEL e SHINH-LIN** foram os de melhor desempenho. O resultado de PBL está em consonância com o esquema YSU usado na configuração do WRF executado pelo CPTEC, conforme consta na Seção 4.3.2. O achado desta pesquisa, quanto ao esquema de PBL YSU, confirma também os resultados encontrados pelas simulações dos autores Comin et al. (2021) no Nordeste Brasileiro. Esse esquema de parametrização também foi encontrado na pesquisa de Efstathiou et al.

(2013). Dessa forma, considerando a grade proposta nesta pesquisa para o Região Sul e Santa Catarina, a configuração de parametrização para o modelo WRF deveria considerar o esquema YSU para a camada limite planetária e o esquema JISHMAEL para microfísica de nuvens. Ainda, conforme os presentes resultados, a escolha do esquema de MP não deve ser considerada de forma absoluta, pois outros esquemas obtiveram desempenho semelhante.

7 TRABALHOS FUTUROS

A presente pesquisa tratou de avaliar parametrizações de PBL e MP para um determinado estudo de caso. Há oportunidade para várias abordagens de pesquisa que possam aperfeiçoar o escopo da presente pesquisa. Elas seguem em duas direções: incluir mais casos; e, estender a análise dos resultados.

A primeira possibilidade de trabalhos futuros é executar a mesma configuração para outros casos de tempestades severas na mesma região, considerando os efeitos da sazonalidade ou do período do ano. Essa abordagem permite a realização de testes estatísticos com maior robustez. Ainda, existe a possibilidade de, com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, executar simulações de casos de tempestades para confirmar os achados. Neste caso, os experimentos seriam limitados pelas parametrizações que melhor performance obtiveram na presente pesquisa.

A outra abordagem de trabalhos é incluir e expandir as análises dos resultados. A mais importante seria a análise de distribuição da precipitação, em consonância com trabalhos já publicados na área, conforme consta no Capítulo 3. Para esta pesquisa não foi possível realizar devido à limitação temporal e de recursos computacionais.

Uma outra possibilidade de trabalho é incluir a análise de indicadores e parâmetros de desenvolvimento convectivo e de tempestades severas, incluindo tornados. Há duas abordagens: a) a primeira, especificamente, relacionada ao modelo WRF, é a incorporação e ativação do módulo “AFWA *diagnostics*”¹ que gera diversas variáveis relacionadas a tempo severo (nevoeiro, precipitação congelada, granizo, rajadas, ventos em tornados, índices de instabilidade, para citar alguns) e que são calculadas durante os cálculos do módulo *solver* do WRF; b) a segunda, extrair e avaliar as saídas do WRF quanto aos índices que são compostos por uma formulação que procura incluir vários parâmetros de significância no desenvolvimento de tempestades intensas como SCP (*Supercell Composite Parameter*) e STP (*Significant Tornado Parameter*)². A pesquisa poderia seguir os achados das parametrizações que melhor responderam ou ainda seguir para uma pesquisa com um conjunto maior de esquemas de PBL e de MP.

¹ Mais informações em https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/AFWA_Diagnostics_in_WRF.pdf

² Discussão sobre esses parâmetros e aplicabilidade na previsão da NOAA para os EUA se encontra em <https://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/help/begin.html>.

REFERÊNCIAS

- Ahrens, C. D. (2013). *Meteorology Today* (tenth ed.). Cengage Learning. 19, 20, 23, 24, 25, 27, 28
- Aravéquia, J. A. & Quadro, M. F. d. (2003). *Aspectos gerais da previsão numérica de tempo e clima*. 69
- Avolio, E., Federico, S., Miglietta, M., Feudo, T. L., Calidonna, C., & Sempreviva, A. M. (2017). Sensitivity analysis of wrf model pbl schemes in simulating boundary-layer variables in southern italy: An experimental campaign. *Atmospheric Research*, 192, 58–71. 44
- Balicki, M., Andrade, A. R. d., & Hornes, K. L. (2021). GÊnese e impacto de tempestades severas no estado do paranÁ (brasil). 26. <https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.71335> 15
- Barry, R. G. & Chorley, R. J. (2013). *Atmosfera, Tempo e Clima* (9. ed. ed.). Bookman. 15, 28
- Bauer, P., Thorpe, A., & Brunet, G. (2015). The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 525(7567), 47–55. <https://doi.org/10.1038/nature14956> 16, 41
- Biswasharma, R., Umakanth, N., Pongener, I., Longkumer, I., Rao, K. M. M., Pawar, S. D., Gopalkrishnan, V., & Sharma, S. (2024). Sensitivity analysis of cumulus and microphysics schemes in the WRF model in simulating Extreme Rainfall Events over the hilly terrain of Nagaland. *Atmospheric Research*, 304, 107393. 16, 48
- Brooks, H. E., Lee, J. W., & Craven, J. P. (2003). The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmospheric Research*, 67, 73–94. 24, 30
- Bryan, G. H., Wyngaard, J. C., & Fritsch, J. M. (2003). Resolution requirements for the simulation of deep moist convection. *Monthly Weather Review*, 131(10), 2394–2416. 39
- Camillo, G. & Herdies, D. (2021). Impacto das parametrizações de microfísica e de camada limite planetária na simulação de eventos meteorológicos intensos em Santa Catarina usando o modelo WRF. *Estrabão*, 2, 200–204. 91
- Chawla, I., Osuri, K. K., Mujumdar, P. P., & Niyogi, D. (2018). Assessment of the Weather Research and Forecasting (WRF) model for simulation of extreme rainfall events in

- the upper Ganga Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), 1095–1117. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1095-2018> 46, 47
- Comin, A. N., Justino, F., Pezzi, L., de Sousa Gurjão, C. D., Shumacher, V., Fernández, A., & Sutil, U. A. (2021). Extreme rainfall event in the Northeast coast of Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133(2), 141–162. 16, 46, 48, 93
- Costa, S. B. (2022). *Extreme Precipitation Events on the East Coast of Brazil's Northeast*. Tese (Doutorado em Meteorologia). 68
- de Campos, B. (2022). *Sensibilidade de parametrizações de convecção cúmulus e microfísica de nuvens em eventos extremos de precipitação na bacia do rio paraíba do sul*. Dissertação (Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos). 16
- De Lange, A., Naidoo, M., Garland, R. M., & Dyson, L. L. (2021). Sensitivity of Meteorological variables on Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes in the WRF-ARW Model. *Atmospheric Research*, 247, 105214. 16
- de Santa Catarina, G. (2020). *TEMPESTADES SEVERAS EM SANTA CATARINA NO DIA 14/08/2020*. Disponível em: https://aguadoce.sc.gov.br/uploads/sites/280/2022/05/1927359_Nota_meteorologica_evento_140820_SC.pdf. Acesso em: 18 ago. 2025. 50, 51
- Efstathiou, G., Zoumakis, N., Melas, D., Lolis, C., & Kassomenos, P. (2013). Sensitivity of WRF to boundary layer parameterizations in simulating a heavy rainfall event using different microphysical schemes. *Atmospheric research*, 132, 125–143. 46, 93
- Felix Fundel ([2016]). An Introduction to Forecast Verification. Technical report, Deutscher Wetterdienst, Alemanha. https://www.hereon.de/imperia/md/assets/clm/neu3_t14.pdf 65
- Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015). *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2*. Disponível em: <https://fluid.nccs.nasa.gov/reanalysis/>. Acesso em: 20 ago. 2025. 72, 73
- Hakim, G. J. & Patoux, J. (2021). *Weather*. Cambridge University Press. 19
- Hamner, B. & Frasco, M. (2018). *Metrics: Evaluation Metrics for Machine Learning*. <https://CRAN.R-project.org/package=Metrics>. R package version 0.1.4 69
- Hoeppe, P. (2016). Trends in weather related disasters—consequences for insurers and society. *Weather and climate extremes*, 11, 70–79. 21
- John M. Alen (2013). *Advisory Circular*. https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac%2000-24c.pdf. Disponível

- em: https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac%2000-24c.pdf
15
- Johns, R. H. & Doswell III, C. A. (1992). Severe local storms forecasting. *Weather and Forecasting*, 7(4), 588–612. 24
- Khain, A., Pinsky, M., Eytan, E., Koren, I., Altaratz, O., Arieli, Y., & Gavze, E. (2024). Dynamics and microphysics in small developing cumulus clouds. *Atmospheric Research*, 307, 107454. 45
- Koh, T.-Y., Wang, S., & Bhatt, B. C. (2012). A diagnostic suite to assess NWP performance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D13). <https://doi.org/10.1029/2011JD017103> 69
- Kumar, M., Kosović, B., Nayak, H. P., Porter, W. C., Randerson, J. T., & Banerjee, T. (2024). Evaluating the performance of wrf in simulating winds and surface meteorology during a southern california wildfire event. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1305124. 16
- Laurie Wilson (2015). *Is there a difference between "verification" and "validation"?* Disponível em: <https://www.cawcr.gov.au/projects/verification/VerificationValidation.html>. Acesso em: 11 abr. 2024. 65
- Liang, X.-Z., Li, Q., Mei, H., & Zeng, M. (2019). Multi-Grid Nesting Ability to Represent Convections Across the Gray Zone. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(12), 4352–4376. 39, 42
- Liu, Y. (2024). *Advanced extreme rainfall simulation using a numerical weather prediction model*. Dissertation (Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering). 16
- Liu, Y., Chen, X., Li, Q., Yang, J., Li, L., & Wang, T. (2020). Impact of different microphysics and cumulus parameterizations in wrf for heavy rainfall simulations in the central segment of the tianshan mountains, china. *Atmospheric Research*, 244, 105052. 16
- Lopes, M. M. & de Lima Nascimento, E. (2025). Climatology of tornado occurrences in southern brazil. *Ciência e Natura*, 47(esp. 3), e84051–e84051. <https://doi.org/https://doi.org/10.5902/2179460X84051> 15
- Luiz, E. W. & Fiedler, S. (2024). Global Climatology of Low-Level-Jets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(9), e2023JD040262. 33
- Lutgens, F., Tarbuck, E., & Herman, R. (2018). *The Atmosphere* (14 ed.). Pearson. 19
- Macatangay, R., Bagtasa, G., & Sonkaew, T. (2016). Finding the Optimum Resolution, and Microphysics and Cumulus Parameterization Scheme Combinations for Numerical

- Weather Prediction Models in Northern Thailand. *Proceedings of the International Symposium on Grids and Clouds (ISGC) 2016. 13-18 March 2016. Academia Sinica*, 6. 16, 39
- Madhulatha, A., Dudhia, J., Park, R.-S., Bhan, S. C., & Mohapatra, M. (2023). Effect of Single and Double Moment Microphysics Schemes and Change in Cloud Condensation Nuclei, Latent Heating Rate Structure Associated with Severe Convective System over Korean Peninsula. *Atmosphere*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/atmos14111680> 48
- Mantovani, J., Alcântara, E., Pampuch, L. A., Praga Baião, C. F., Park, E., Souza Custódio, M., Gozzo, L. F., & Bortolozo, C. A. (2024). Assessing flood risks in the taquari-antas basin (southeast brazil) during the september 2023 extreme rainfall surge. *Npj natural hazards*, 1(1), 9. 15
- Markowski, P. & Richardson, Y. (2010). *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. John Wiley & Sons. 20, 22, 25, 26, 27
- McIlveen, R. (2010). *Fundamentals of Weather and Climate* (2nd ed.). Oxford University Press. 19
- Merino, A., García-Ortega, E., Navarro, A., Sánchez, J. L., & Tapiador, F. J. (2022). WRF hourly evaluation for extreme precipitation events. *Atmospheric Research*, 274, 106215. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106215> 48
- Meroni, A. N., Oundo, K. A., Muita, R., Bopape, M.-J., Maisha, T. R., Lagasio, M., Parodi, A., & Venuti, G. (2021). Sensitivity of some African heavy rainfall events to microphysics and planetary boundary layer schemes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(737), 2448–2468. 39, 46
- MIDR (2023). *Atlas Digital de Desastres no Brasil*. BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. 15, 30, 31
- Mohr, S., Wilhelm, J., Wandel, J., Kunz, M., Portmann, R., Punge, H. J., Schmidberger, M., Quinting, J. F., & Grams, C. M. (2020). The role of large-scale dynamics in an exceptional sequence of severe thunderstorms in europe may–june 2018. *Weather and Climate Dynamics*, 1(2), 325–348. 21
- Moya-Álvarez, A. S., Estevan, R., Kumar, S., Rojas, J. L. F., Ticse, J. J., Martínez-Castro, D., & Silva, Y. (2020). Influence of PBL parameterization schemes in WRF_ARW

- model on short-range precipitation's forecasts in the complex orography of Peruvian Central Andes. *Atmospheric Research*, 233, 104708. 16, 46, 47
- Nascimento, E. d. L. (2005). Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20(1), 121–140. 15, 24, 25
- National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce (2015). *NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5065/D65D8PWK> 63
- Otero, R., Suarez, M., Pierobon, E., Maturano, L., Montamat, I., Sanchez, J. E., Sandalio, L., Rodriguez, A., & Poffo, D. (2025). Assessing the impact of physical configuration and lead time on wrf forecasting of an extreme wind event. *Journal of Meteorological Research*, 39(1), 154–171. 16
- Palenzuela, Y. G. (2017). *Previsão de um evento de chuva intensa ocorrido no município de Pelotas, RS, em janeiro de 2009*. 16, 46
- Patel, P., Ghosh, S., Kaginalkar, A., Islam, S., & Karmakar, S. (2019). Performance evaluation of WRF for extreme flood forecasts in a coastal urban environment. *Atmospheric Research*, 223, 39–48. 15
- Pierce, D. (2021). *ncdf4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files*. <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4>. R package version 1.19 74
- Potvin, C. K. & Flora, M. L. (2015). Sensitivity of Idealized Supercell Simulations to Horizontal Grid Spacing. *Monthly Weather Review*, 143(8), 2998–3024. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00416.1> 39
- Pu, Z. & Kalnay, E. (2018). Numerical Weather Prediction Basics. *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*, 67–97. 16, 38, 41
- R Core Team (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> 74, 90
- Reboita, M. S., Krusche, N., Ambrizzi, T., & da Rocha, R. P. (2012). Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. *Terræ didática*, 8(1), 34–50. 28
- Ruiz, J. J., Saulo, C., & Nogués-Paegle, J. (2010). WRF Model Sensitivity to Choice of Parameterization over South America: Validation against Surface Variables. *Monthly Weather Review*, 138(8), 3342–3355. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3358.1> 16, 66

- Salio, P., Nicolini, M., & Zipser, E. J. (2007). Mesoscale Convective Systems over Southeastern South America and Their Relationship with the South American Low-Level Jet. *Monthly Weather Review*, 135(4), 1290–1309. <https://doi.org/10.1175/MWR3305.1> 29, 72
- Schumacher, R. S. & Rasmussen, K. L. (2020). The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(6), 300–314. 27
- Schwitalla, T., Branch, O., & Wulfmeyer, V. (2019). Sensitivity study of the planetary boundary layer and microphysical schemes to the initialization of convection over the Arabian Peninsula. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(727), 846–869. <https://doi.org/10.1002/qj.3711> 16, 46, 47
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskander, I., Kossin, J., Lewis, S., et al. (2021). *2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate (Chapter 11)*, (Chapter 11, 1513–1766). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013> 15
- Shin, H. H. & Hong, S.-Y. (2011). Intercomparison of Planetary Boundary-Layer Parametrizations in the WRF Model for a Single Day from CASES-99. *Boundary-Layer Meteorology*, 139, 261–281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10546-010-9583-z> 46
- Silva Dias, M. A. (2011). An increase in the number of tornado reports in brazil. *Weather, Climate, and Society*, 3(3), 209–217. 15, 27, 30
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., & Huang, X.-Y. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3. Technical report, NCAR. <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97> 15, 42, 46, 54, 57, 62, 112, 127
- Stensrud, D. J. (2009). *Parameterization Schemes*. Cambridge University Press. 32, 41, 42, 43
- Stull, R. B. (2017). *Practical Meteorology*. Department of Earth, Ocean & Atmospheric Sciences, University of British Columbia. 19, 21, 23, 24, 25, 26, 28, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 44, 56, 65, 67, 69
- Trapp, R. J., Tessendorf, S. A., Godfrey, E. S., & Brooks, H. E. (2005). Tornadoes from Squall Lines and Bow Echoes. *Weather and forecasting*, 20(1), 23–34. 27
- Warner, T. T. (2011). *Numerical Weather and Climate Prediction*. Cambridge University Press. 16, 40, 46, 47, 55, 63

- Werner, K. (2021). *WRF Users Guide*. Disponível em: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/physics.html. Acesso em: 15 ago. 2025. 43, 45
- WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research (2017). Forecast Verification methods Across Time and Space Scales. Technical report, Australian Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia. <https://www.cawcr.gov.au/projects/verification/> 67
- Zipser, E. J., Cecil, D. J., Liu, C., Nesbitt, S. W., & Yorty, D. P. (2006). Where are the most intense thunderstorms on earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(8), 1057–1072. 21

APÊNDICES

APÊNDICE A – DADOS SUMARIZAÇÃO ESTATÍSTICA: RMSE

Tabela 5 – Dados de RMSE obtidas das extrações de dados de precipitação prevista e observada.

Fonte: Elaboração própria (2025).

MP/PBL	YSU	MYNN2.5	BOULAC	SHINH	MRF
KESS	3,30956487622728	3,3804365332161	3,35729057894945	3,22322183334545	3,76633579583209
LIN	3,3168979195037	3,3460787515294	3,375561766808	3,21217680949083	3,57362731376637
WSM3	3,33335182159755	3,4486491944976	3,33504173704776	3,45581341659511	3,97296603123001
WSM5	3,29948780263496	3,4369749403362		3,30324951206842	3,56668488039047
FER	3,30499427186432	3,3666107513304	3,42725903323647	3,33329925188139	3,54719793605347
WSM6	3,31894843138136	3,3753353679423	3,32419780866827	3,28133102750147	3,61814372717577
GOD	3,29807004685094	3,3547006822852	3,41573059208542	3,27811394647445	3,44323605301877
THO	3,29110690488474	3,4220200030068	3,34742491665719	3,33926848141697	3,63169708682736
MIL	3,26814989200651	3,4058290538038	3,40041183477279	3,29704173570707	3,54456659712608
MOR	3,26485877729139	3,4524792928307	3,41969747129443	3,29796994648939	3,6121228111294
CAM	3,33089311411827	3,2602762905442	3,31413007460791	3,21283245527933	3,48681988996929
SBU		3,4476200119706	3,40987425819474	3,31823513679921	3,65905757109987
WDM5	3,25411487804006	3,3817805392288	3,37973376959873	3,29414541884886	3,59397264140247
WDM6	3,31913801835136	3,316402295939	3,36038883594639	3,2747972475438	3,64849315430504
NSSL2C	3,37198523238236	3,4900537331798	3,37068701130444	3,37618076434278	3,66154188548679
NSSL1-7	3,24088887202313	3,3653057398232	3,38068411088971	3,27230107500662	3,54674807219547
WSM7		3,442843140227	3,28900192040848	3,28915820040943	3,59748681859928
WDM7	3,29836314709704	3,41992942506	3,33612563706399		3,66234873188983
AEROT	3,24505563379299		3,35477989022599	3,29954878827872	3,60943446356411
MOR2	3,23268810822392	3,4158939354398	3,37438015344655	3,23262966803321	3,65832300299383
P3_1	3,15037879671061	3,3111236891459	3,28867041928224	3,21478909186188	3,68009698371891
P3_12	3,25313577017078	3,317494713639	3,2723497500659	3,30340381884117	3,2723497500659
P3_2	3,23880670198844	3,3917624310605	3,30854166411107	3,30340381884117	3,59445767750939
P3_13	3,25044542732355	3,4667501935201	3,35747570552018	3,3242325889181	3,71369646292089
JISHMAEL	3,14654458272012	3,4417547883423	3,37422549343588	3,23632303239816	3,39080020240328
FERR	3,29545540119176	3,336979173407	3,33195681009099	3,31597408078912	3,85459186063236
MADWRF	3,25891605930296	3,3625788013372	3,48611481478636	3,29172931354773	3,4823953745224
GODGCE	3,33816678855154	3,3350413728722	3,36128286848555	3,29909859821151	3,50843996460054

APÊNDICE B – DADOS SUMARIZAÇÃO ESTATÍSTICA: MAE

Tabela 6 – Dados de MAE obtidas das extrações de dados de precipitação prevista e observada.

Fonte: Elaboração própria (2025).

MP/PBL	YSU	MYNN2.5	BOULAC	SHINH	MRF
KESS	1,02035241750122	1,02545304945798	1,05768903840219	1,0113311299908	1,30410880452738
LIN	1,01757596832345	0,944559965062647	0,97582757372886	0,965252430746059	1,19128572279162
WSM3	1,05904210364571	1,03250518273681	1,02030679218238	1,1059423276067	1,42820337692414
WSM5	1,00570968261282	1,00485620665085	-	0,992541701018775	1,21380598567168
FER	1,00383539604324	0,998492363928746	0,992871371791293	0,988981533274979	1,17660542373743
WSM6	0,997037741599982	0,955802299295714	0,984663643512985	0,985277554571287	1,20274382953459
GOD	0,998152606783012	0,978485885379429	1,00478139303851	1,02823423092435	0,92197687964236
THO	0,991092509191971	1,02801407282141	0,987597799815621	1,00326615529804	1,25367680023917
MIL	0,973074332248512	1,02166949567485	0,960963784559339	0,978905681739982	1,22194802157375
MOR	0,954261633870786	1,05015615550198	1,02837920876449	0,932149286373717	1,24622553158783
CAM	1,02361968266499	1,01534564124511	0,971157405904694	0,951640695600157	1,07527753273303
SBU	-	0,966750791717171	0,976806619033481	0,990011435441176	1,29407612669528
WDM5	0,989002204515167	0,98369052073807	0,976950702918682	1,00006404983092	1,24189143810422
WDM6	0,968886106014268	0,951375181977544	0,947274617191727	0,971924299454057	1,2384692862106
NSSL2C	1,03425259842873	1,00172310012522	1,02644861810499	1,0357953563931	1,22798665333689
NSSL1-7	1,00062100311677	0,975321941279498	0,963478932810427	1,00251013186265	1,22270948614874
WSM7	-	1,02419263036421	0,955891088187006	0,96022558596978	1,23916991152645
WDM7	0,969962514520267	0,994305064885965	0,929285887205717	-	1,25881715882625
AEROT	0,964077346144261	-	0,98858954246088	1,00855398284178	1,23474624145978
MOR2	0,940115555655778	1,00517839425926	0,964721892886546	0,948870633434017	1,31890011104149
P3_1	0,91593746613731	0,979832390598424	0,962293058555583	0,897042834340124	1,1810359943591
P3_12	0,965173818231065	0,962493114702841	0,993528206161281	0,982818599713464	0,993528206161281
P3_2	0,958901806183146	1,02528126491882	1,0028304782305	0,982818599713464	1,10938158851784
P3_13	0,957204854900805	1,08067267205791	1,03932513770739	0,969353653672248	1,2287623251631
JISHMAEL	1,09540663003565	1,10154650011176	1,13385984359286	1,12135363871806	0,988777591679476
FERR	1,0311170053003	1,04780162941164	1,00682413155339	1,36621158543292	1,36621158543292
MADWRF	0,939287460405815	1,0468830995309	1,03886291829944	0,919098837592182	0,990184870423917
GODGCE	0,979422844714718	0,978678147413415	0,951148635344679	0,946938079734222	1,09272024988495

APÊNDICE C – DADOS SUMARIZAÇÃO ESTATÍSTICA: BIAS

Tabela 7 – Dados de BIAS obtidas das extrações de dados de precipitação prevista e observada.

Fonte: Elaboração própria (2025).

MP/PBL	YSU	MYNN2.5	BOULAC	SHINH	MRF
KESS	-0,561876185606098	-0,555681925629522	-0,551650551325507	-0,509962043771908	-0,362116751137888
LIN	-0,561579203945574	-0,652148740371577	-0,635351626572494	-0,601350549172596	-0,423843785791674
WSM3	-0,533894395484778	-0,582819049230812	-0,570418183448601	-0,481289982185566	-0,299059890481116
WSM5	-0,625820253018609	-0,656618079318987	-	-0,617310749866635	-0,453773069106597
FER	-0,570155376098389	-0,649173985386813	-0,691820453583596	-0,598831889241574	-0,441193386128856
WSM6	-0,612503715038023	-0,672621554040235	-0,583716490161079	-0,604055163827925	-0,46114863541773
GOD	-0,53949215782062	-0,647825390678688	-0,654864509494379	-0,477049597986473	-0,736633460529976
THO	-0,603575250170523	-0,610679825437233	-0,643227135358395	-0,589799495806561	-0,40133179565418
MIL	-0,62742311837281	-0,609475502827101	-0,73375054727593	-0,609573691031482	-0,406273023888417
MOR	-0,622494651994462	-0,609693073914544	-0,606658640001297	-0,635171627407028	-0,378850816550483
CAM	-0,525660572337608	-0,569555961837371	-0,630506367956599	-0,567531902214719	-0,56940770694779
SBU	-	-0,707727408699036	-0,692291775404625	-0,611248610053074	-0,376170412738716
WDM5	-0,592692817179745	-0,65479692721892	-0,660581446300343	-0,562179667245531	-0,375687495449214
WDM6	-0,654900182235721	-0,658485377936966	-0,692131975668933	-0,628027790267749	-0,425425562515213
NSSL2C	-0,58740287032195	-0,701423323911642	-0,633670430207939	-0,608943426838588	-0,4477291920569
NSSL1-7	-0,571253841833936	-0,682121384676175	-0,679664187121719	-0,572727459393298	-0,402827300856729
WSM7	-	-0,589766860953705	-0,654044406678594	-0,635683061587888	-0,403245697163429
WDM7	-0,638031412005011	-0,649070423598322	-0,715984858308649	-	-0,392739727581959
AEROT	-0,619088170841872	-	-0,64398311766556	-0,586521402113971	-0,439025217474619
MOR2	-0,615623881982602	-0,651687731514551	-0,672935265324299	-0,626953075595355	-0,308621784619625
P3_1	-0,6452609653357	-0,61140090301219	-0,657903933632705	-0,681866355192744	-0,557361510855456
P3_12	-0,633655008280443	-0,661536529419116	-0,622140810387209	-0,60905102146479	-0,622140810387209
P3_2	-0,561374295415978	-0,537334333169791	-0,575388989345067	-0,60905102146479	-0,588532512585322
P3_13	-0,596090394566094	-0,604683598440865	-0,55372844208614	-0,599799711350804	-0,45421287096002
JISHMAEL	-0,358957820981741	-0,506395757098993	-0,421642942494816	-0,325464188141955	-0,58412169986301
FERR	-0,524743863942743	-0,522143872763604	-0,577298396844762	-0,505015461903238	-0,353878259609073
MADWRF	-0,564001983337932	-0,554297605794337	-0,675715865029229	-0,587066211038166	-0,641139084961679
GODGCE	-0,645160625370983	-0,653907056187494	-0,681872743549248	-0,654220328102356	-0,559383628686815

APÊNDICE D – COMANDOS R PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS RMSE

Dados de RMSE sendo lidos no ambiente do R. Na sequência, comandos de verificação de tipos de dados e comando de sumarização estatística.

```
> dados.rmse <- read.csv("dados-wrf-estatisticas-dataframe-RMSE-
                        sumarizacao-RETIFICADA.csv")

> str(dados.rmse)
'data.frame': 135 obs. of 3 variables:
 $ MP : chr  "KESS" "LIN" "WSM3" "WSM5" ...
 $ PBL : chr  "YSU" "YSU" "YSU" "YSU" ...
 $ RMSE: num  3.31 3.32 3.33 3.3 3.3 ...

> summary(dados.rmse)
MP                PBL                RMSE
Length:135        Length:135        Min.   :3.147
Class :character   Class :character  1st Qu.:3.298
Mode  :character   Mode  :character  Median :3.347
Mean   :3.387
3rd Qu.:3.442
Max.   :3.973
```

Teste ANOVA *Two-Way* usando a função `aov()` do R. Foi usado a análise *two-way* pois há duas variáveis categóricas (PBL e MP) cujo efeito isolado e combinado sobre o RMSE se quer testar.

```
> result_aovf <- aov(RMSE ~ PBL * MP, data=dados.rmse)
> summary(result_aovf)
Df Sum Sq Mean Sq
PBL      4 1.8830  0.4708
MP      27 0.2585  0.0096
PBL:MP   103 0.5132  0.0050
```

A execução do teste ANOVA com os dois fatores resultou em falha, que pode ter origem em: a) singularidades ou esquemas de PBL e MP que nunca aparecem numa mesma configuração; b) muitos esquemas (também referidos como níveis) versus a quantidade de observações; e, c) escala ou erros de precisão. Exceto por este último fator, os dois primeiros podem ter dado causa ao erro no teste. Desta forma, foi executado teste ANOVA *One-Way* sobre cada fator categórico isolado, conforme os resultados a seguir apresentados.

```
> result_aovm <- aov(RMSE ~ MP, data=dados.rmse)
> summary(result_aovm)
Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
```

```

MP                27 0.2789 0.01033    0.465  0.988
Residuals        107 2.3759 0.02220

> result_aovp <- aov(RMSE ~ PBL, data=dados.rmse)
> summary(result_aovp)
Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
PBL          4 1.8830  0.4708    79.3 <2e-16 ***
Residuals    130 0.7718  0.0059
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Na sequência, foi executado teste para encontrar esquemas de PBL que obtiveram valores de RMSE significativamente diferentes de outros esquemas. Foi usado o teste Tukey HSD através de função da linguagem Python. Apesar da linguagem possuir o mesmo tipo de teste, os resultados da função em Python foram mais completos, como pode ser visualizado a seguir.

```

>>> from statsmodels.stats.multicomp import pairwise_tukeyhsd
>>> tukey_results = pairwise_tukeyhsd(df["RMSE"], df["PBL"], alpha=0.05)
>>> print(tukey_results)
Multiple Comparison of Means - Tukey HSD, FWER=0.05
=====
group1 group2 meandiff p-adj    lower    upper  reject
-----
BOULAC    MRF    0.2423     0.0   0.1848   0.2998    True
BOULAC MYNN25    0.0274  0.6877  -0.0306   0.0854   False
BOULAC  SHINH   -0.0694  0.0105  -0.1274  -0.0113    True
BOULAC   YSU   -0.0831  0.0013  -0.1417  -0.0246    True
MRF MYNN25   -0.2149     0.0  -0.2724  -0.1574    True
MRF  SHINH   -0.3116     0.0  -0.3691  -0.2541    True
MRF   YSU   -0.3254     0.0  -0.3834  -0.2673    True
MYNN25  SHINH   -0.0968  0.0001  -0.1548  -0.0387    True
MYNN25   YSU   -0.1105     0.0  -0.1691  -0.052    True
SHINH   YSU   -0.0138  0.9663  -0.0723   0.0448   False
-----

```

APÊNDICE E – PRODUTO DESENVOLVIDO

Este trabalho resultou num **roteiro da metodologia** usado para alcançar o objetivo de pesquisa. Num primeiro momento são apresentadas definições básicas e após as técnicas e ferramentas usadas. Alguns programas foram desenvolvidos usando linguagens de script, como Bash e R, os quais se encontram disponibilizados em repositório público (GitHub). Os demais programas estão disponíveis nas distribuições Linux e procurou-se usar aqueles distribuídos sob licenças de código aberto. As principais seções são as seguintes: Seção E.1 (Sobre o WRF e seus Módulos), E.2 (Automatizando execução WRF via “model-wrf”), E.3 (Executando o WRF via “model-wrf”), E.4 (Obtenção e Extração de Dados Observacionais) e E.5 (Extração de Dados de Precipitação da Saída do WRF).

E.1 Sobre Modelo WRF e seus Componentes

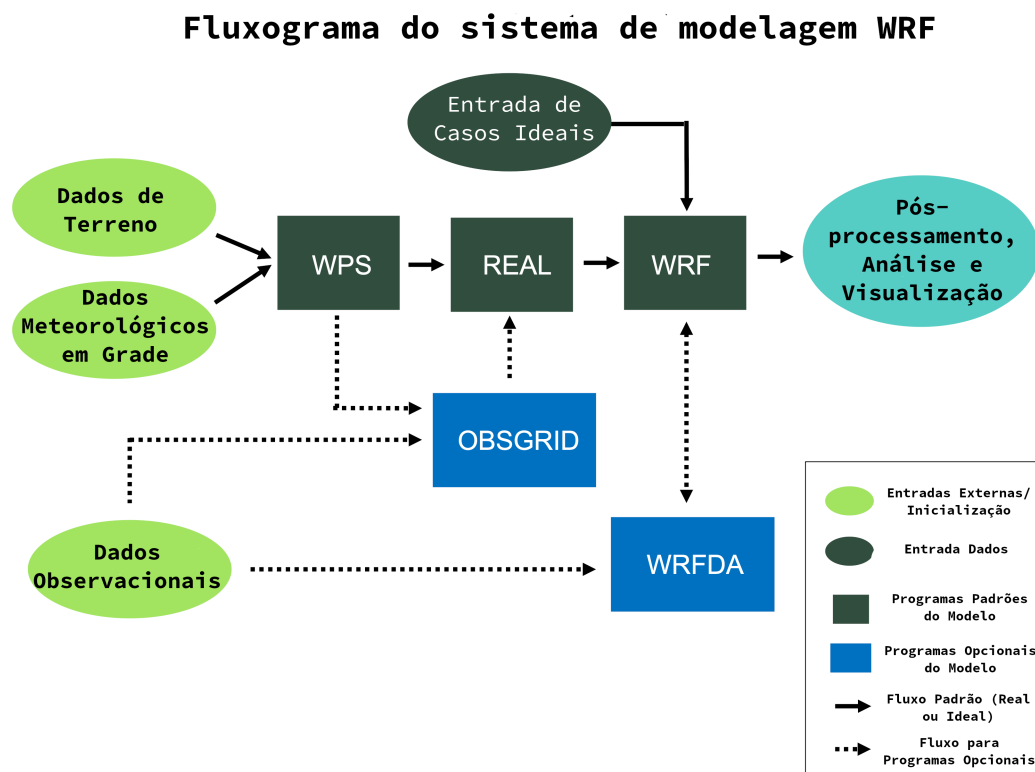
O modelo *Weather Research and Forecasting Model* (WRF)¹ é composto por vários módulos que permitem executar aplicações de pesquisa ou funcionais relacionadas a simulação numérica de tempo (Previsão Numérica de Tempo - PNT²) para diversas escalas de tempo e espaço. As seguintes referências contêm informações sobre os elementos do modelos WRF: Skamarock et al. (2021), https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/model_overview.html e https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/index.html.

A Figura 40 apresenta os principais módulos para executar simulações numéricas e também para aplicações de previsão numérica em tempo real. As linhas cheias da imagem indicam o fluxo de dados para a maior parte das aplicações que usam o modelo WRF. Serão descritos brevemente esses elementos na sequência.

¹ Sítio principal do modelo ARW-WRF (*Advanced Research WRF*): <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users>.

² Em inglês, PNT é referido como NWP (*Numerical Weather Prediction*).

Figura 40 – Esquema do fluxo de dados pelos módulos do sistema de modelagem WRF (versão 4.7).



Fonte: Adaptado do sítio do modelo WRF (WRF Overview)³.

O sistema WPS (*Preprocessing System* - WPS) trata do processo de inicialização de forma que prepara e ajusta diversos tipos de dados que serão interpolados para a grade do modelo. São dois conjuntos de dados básicos: dados de terreno e dados meteorológicos em grade. Conforme a documentação, o WPS realiza as seguintes funções:

- Definir os domínios da simulação em termos de número de grades e suas características, como resolução e posição dentro do esquema de aninhamento.
- Interpolare dados terrestres (terreno, uso de terra, tipos de solo, limites das águas interiores, dentre os principais) para o domínio da simulação. Os dados são independentes do tempo. O programa responsável por realizar essa tarefa é o “**geogrid.exe**” e é executado para cada grade configurada no aninhamento (*nesting*).
- Extrair dados meteorológicos em formato GRIB disponibilizados pelos modelos globais. Os dados desses modelos constituirão os dados de inicialização e de condição lateral para a execução do WRF. Esses dados são dependentes do tempo, logo, devem ser obtidos continuamente para as simulações de tempo real ou para aquelas com diferentes data-horas de inicialização. O programa

“**ungrib.exe**” é responsável por extrair dados de formatos GRIB (GRIB1 e GRIB2) e converter para um formato intermediário⁴. Ele é executado uma única vez para qualquer número de grades (aninhamento).

- Interpolar os dados meteorológicos do domínio dos dados globais para o domínio do modelo. O programa “**metgrid.exe**” é o responsável por ler os dados em formato intermediário gerados pelo “ungrib” e interpolar para todas as grades do domínio. São gerados arquivos para todas as grades e, para cada qual, um para cada intervalo temporal dos dados das condições laterais.

O módulo REAL recebe os dados gerados pelo programa “**metgrid.exe**” (módulo WPS) e realiza as seguintes tarefas: a) interpola verticalmente os dados constantes nos arquivos “met_em*” para a grade do modelo WRF; b) cria o arquivo de inicialização. Considerando uma configuração de dois domínios em aninhamento, serão produzidos os arquivos “wrfinput_d01”, “wrfinput_d02” e “wrfbdy_d01”. Os arquivos “wrfinput_d0x” contêm as condições iniciais para todos os domínios (D1 e D2) enquanto que o arquivo “wrfbdy_d01” contêm as condições de fronteira para o domínio externo (D01).

O módulo WRF-ARW *Solver* é o núcleo do modelo WRF e que contém a unidade de integração numérica em conjunto com os componentes para os esquemas de física além de diversas opções de dinâmica e física.

O pós-processamento contém ferramentas e programas para analisar e visualizar os dados de saída do modelo. Conforme a documentação do modelo WRF⁵, segue descrição de alguns programas.

- ARWpost: programa que converte os arquivos de saída em formato NetCDF para que possam ser lidos pelo GrADS (*Grid Analysis and Display System*)⁶. A geração de saídas gráficas usando programas GrADS permite que possam ser realizados de forma automatizada por meio de *scripts*.
- wrf-python (wrf-python): coleção de rotinas em linguagem de script Python para extração e visualização de dados meteorológicos.
- NCL (NCAR *Command Language*)⁷: é uma linguagem de *scripting* (interpretada) desenvolvida especificamente para ler dados em vários formatos de dados científicos e meteorológicos, incluindo o NetCDF (padrão dos arquivos de saída

⁴ Mais informações sobre o formato (*Intermediate File Format*) se encontram em https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Basics/IM_files/index.php.

⁵ Disponível em https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/post_processing.html.

⁶ Disponível em <http://cola.gmu.edu/grads/grads.php>.

⁷ Mais informações em <https://www.ncl.ucar.edu/>.

do WRF). Gera saídas gráficas e como é uma linguagem, podem ser gerados *scripts* para automatizar o processamento. O projeto está sendo portado para a linguagem Python.

- VAPOR (*Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers*)⁸: é um sistema de visualização em três dimensões que pode ser executado em diversas plataformas. Possui integração com a linguagem de *scripting* Python.
- MET (*Model Evaluation Tools*)⁹: conjunto de ferramentas cujo propósito principal é a verificação das previsões numéricas.

Sobre os programas de pós-processamento, o sítio de referência informa que os programas NCL, wrf-python, RIP, ARWpost e VAPOR não são mais atualizados, principalmente, quanto à integração ao sistema WRF. Sobre os demais módulos, no caso o WRFDA (WRF *Data Assimilation*) e o OBSGRID, não serão tratados, por não fazerem parte da implementação.

E.2 Automatizando Execução do Modelo WRF via Pacote “model-wrf”

Conforme visto na seção anterior e na descrição do WRF na Seção E.1, a execução do modelo para produzir previsões numéricas de tempo exige configuração de diversos módulos e o controle do fluxo de dados entre os mesmos. Visando automatizar esse processo e com vistas ao uso operacional e de pesquisa, foi desenvolvido um pacote com *scripts*¹⁰ em linguagem Bash Shell¹¹. As instruções da linguagem Bash e os respectivos programas auxiliares podem ser executadas na maioria das distribuições Linux. O conjunto desses arquivos de *scripts* constituem o pacote referido pelo nome de “**model-wrf**” e que está disponível no repositório do autor na plataforma Github, no seguinte endereço: <https://github.com/glcamillo/model-wrf>. O repositório com os *scripts* e arquivos de configuração é distribuído de forma livre sob a licença de código aberto MIT (permissiva).

Os *scripts* foram desenvolvidos para automatizar os passos para executar o sistema do modelo WRF e permitir parametrizar algumas configurações dos módulos WPS e do WRF. As principais características do pacote “model-wrf” são:

⁸ Mais informações em <https://visualizations.ucar.edu/vapor/>.

⁹ Mais informações em <https://dtcenter.org/community-code/model-evaluation-tools-met>.

¹⁰ *Scripts* são arquivos (em modo texto) com instruções em alguma linguagem de *scripting* e que são executadas por um interpretador daquela linguagem. Não exige compilação para uma determinada arquitetura. Mais informações em https://en.wikipedia.org/wiki/Scripting_language.

¹¹ O Bash é tanto um shell (interpretador de comandos) para sistemas operacionais GNU como também uma linguagem de programação que usa construções semânticas e sintáticas para combinar combinar instruções e utilitários do sistema. Mais informações em <https://www.gnu.org/software/bash/>.

- Automatização do fluxo de dados desde o WPS até a geração dos gráficos de saída.
- Execução em modo de tempo real no qual o programa principal é ativado através de mecanismos de agendamento de tarefas baseado em tempo.
- Execução em modo de pesquisa, que abre as possibilidades de configurar as opções do modelo.
- A execução controla as fases de execução de forma que é possível reiniciar o modelo e continuar a partir da fase que não foi completada.
- Algumas opções podem ser passadas ao programa principal através da própria linha de comando de execução.
- A alteração de parâmetros mais específicos é executada no próprio *script* do programa ou nos arquivos de configuração do pacote, evitando a alteração nos arquivos da instalação de execução dos programas do WRF e de seus componentes.
- Os *scripts* do “model-wrf” contém suporte para execução das opções referidas como “AFWA Diagnostics in WRF” que permite obter vários parâmetros e variáveis para tempo severo, como: precipitação, granizo, radar, formação de gelo, visibilidade e turbulência, para citar os mais importantes.

Na página inicial do repositório “model-wrf” há uma descrição (em inglês) do processo de configuração e execução dos respectivos programas. Contudo, o modelo WRF e seus respectivos módulos devem estar instalados na máquina onde será executado. O sítio do projeto WRF disponibilizado pelo laboratório *Mesoscale and Microscale Meteorology Laboratory* (MMM) da Universidade UCAR já contempla um tutorial de instalação e também de execução do modelo. O endereço da página se encontra em <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/>. O pacote de programas pode ser baixado de duas formas: acesso direto para download do arquivo zip através do endereço <https://github.com/glcamillo/model-wrf/archive/refs/heads/main.zip> ou, quando disponível, usar o seguinte comando:

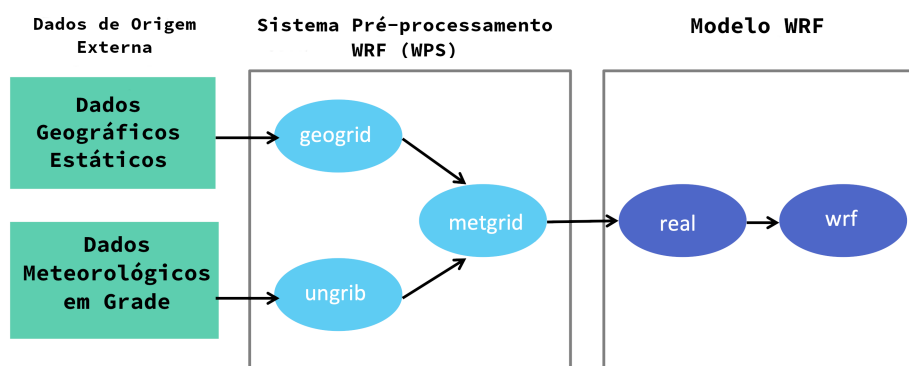
```
1 git clone https://github.com/glcamillo/model-wrf.git
```

Após trazidos os *scripts* para a máquina local, configurar esses arquivos em acordo com a instalação do modelo WRF. No arquivo “Readme.md”, na primeira seção, são detalhadas as configurações necessárias. Vale observar que o modelo WRF já deve estar instalado antes de executar os *scripts* do pacote “model-wrf”.

E.3 Executando o Modelo WRF através do uso do Pacote “model-wrf”

O pacote “model-wrf” contém o programa principal (*script* em Bash Shell) referido pelo nome “**runwrf.sh**”. Ele é a unidade de execução que coordena os seguintes pontos: a) coletar e configurar as opções e parâmetros com o fim de preparar o ambiente operacional para execução do modelo; b) disparar a execução dos diversos programas contidos no modelo do WRF, conforme esquema contido na Figura 41; c) transferir dados entre os programas; d) coletar *logs* de execução para identificar problemas na execução e persistir o ponto onde houve falha.

Figura 41 – Esquema padrão do fluxo de dados e respectivos programas num sistema WRF para previsão numérica de tempo.



Fonte: Adaptado do sítio do modelo WRF (*WRF Preprocessing*)¹².

E.3.1 Sobre opções para execução do programa “model-wrf”

O modelo WRF é extremamente configurável através de parâmetros. As configurações são ajustadas em arquivos próprios de cada módulo, ou seja, existem arquivos de configuração para cada programa constante do gráfico da Figura 41. Os arquivos de configuração dos programas são localizados no diretório do pacote “model-wrf”, em subdiretórios. Especificamente, para os módulos WPS e WRF, os arquivos são referidos, respectivamente, como “namelist.wps” e “namelist.input”. Eles se encontram, respectivamente, nos diretórios “model-wrf/wps” e “model-wrf/wrf”. O arquivo “namelist.wps” serve as configurações para os três programas do WPS, que são: geogrid.exe, ungrid.exe e metgrid.exe. O arquivo “namelist.input” contém as opções que serão lidas pelos programas real.exe e wrf.exe.

O processo de execução se baseia na especificação de variáveis com as opções para configurar o modelo. E, essas variáveis determinam a configuração dos arquivos de namelist finais, que serão transferidos para o diretório de execução do modelo. Tomando por base o conteúdo do arquivo “Readme.md”¹³, segue o detalhamento do processo de execução do *script* principal e a descrição das opções e parâmetros.

¹³ Disponível no repositório em <https://github.com/glcamillo/model-wrf/blob/main/README.md>.

1. O sítio do modelo WRF apresenta o **detalhamento para construir o modelo e executar os diversos módulos**. Além disso, contém explicações para alguns parâmetros mais importantes. Há ainda dois links na sequência que tratam das melhores boas práticas para as configurações WPS e WRF do modelo.

```
https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/wps.html
https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/running_wrf.html
WPS namelist.wps (Best Practices): https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/namelist_best_prac_wps.html
WRF namelist.input (Best Practices): https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/namelist_best_prac_wrf.html
```

2. Para obter ajuda sobre o comando e principais opções executar o comando seguinte. Após baixar o pacote, entrar no diretório e ajustar o *script* com o bit de execução.

```
2 cd ~/model-wrf
3 chmod u+x runwrf.sh
4 ./runwrf.sh --help
```

3. Algumas opções específicas de física e de dinâmica do modelo podem ser alteradas diretamente nos seguintes arquivos dentro do pacote “model-wrf”.

```
5 nano wrf-model/runwrf.sh
6 nano wrf-model/wrf/namelist.input.wrf.sh
```

4. Descrição da linha de comando do programa “runwrf.sh”. Os parâmetros e opções irão determinar a execução do modelo WRF.

```
7 ./runwrf.sh parameters options
```

A linha de comando consiste em parâmetros e em opções. Ainda, existem aqueles que são **mandatórios** e aqueles **opcionais**. Segue a descrição dos **parâmetros mandatórios**:

- **-conf A | B | ... Z** Define a configuração de domínio. Foram definidos vários domínios com as respectivas configurações no diretório “model-wrf/config-domains”¹⁴.

¹⁴ Os domínios disponíveis podem ser consultados em <https://github.com/glcamillo/model-wrf/tree/main/config-domains>.

Constam também imagens das grades dos domínios. O pacote no GitHub não contém os arquivos binários de inicialização produzidos pelo geogrid (referidos como “geo_em.d0x”) devido ao seu tamanho. Por padrão, a execução do modelo irá gerar esses arquivos a cada execução, desde que os dados estáticos estejam presentes no sistema de execução. Vide opção `[-use-static-geogrid]` a seguir.

- **-ts 2021-06-01-12** (yyyy-mm-dd-HH) data e hora do início da integração. Além disso, determina a busca dos dados globais a partir do NCEP (formato GFS).
- **-ti 24 | 48 | 72** É o período de previsão (ou o tempo da integração numérica).

Segue descrição de **parâmetros opcionais**. Apesar de não serem requisitos para execução, ajudam a determinar algumas configurações inerentes aos módulos WPS e WRF.

- **-tiout 3 | 6** Informa o intervalo de tempo das saídas do modelo WRF. Padrão: 3 horas. Esse valor é para o domínio externo (domínio 1). Os domínios internos serão por padrão em intervalos de uma hora.
- **-gd gfs1p00 | gfs0p50 | gfs0p25 | cptec_wrf_5km** Informa a resolução dos dados globais para inicialização e contorno e também a fonte. As siglas gfs indicam dados GFS oriundos do NCEP¹⁵. A sigla `cptec_wrf` busca trazer os dados de saída do modelo WRF que é provido pela instituição CPTEC (pertencente ao INPE). As resoluções espaciais são as seguintes: dados NCEP-GFS (1, 0,5 ou 0,25 graus, conforme dois últimos números); e dados CPTEC-WRF (5km). O padrão é o uso de dados GFS de um grau de resolução (`gfs1p00`). O período da previsão irá determinar a quantidade de arquivos que serão baixados, de forma a cobrir todo o tempo da integração. O *script* “`utils/fetch_global_data.sh`” faz o *download* e também incorpora detecção de falhas no processo, como *download* parcial dos dados.
- **[-gti 1 | 3 | 6]** Parâmetro opcional que indica o intervalo dos dados (resolução temporal) de entrada globais que serão baixados dos sítios do NCEP ou do CPTEC. O intervalo é dado em horas e devem ser consideradas as seguintes restrições: 1 hora para os dados CPTEC-WRF (`cptec_wrf_5km`) e 3 ou 6 horas para dados NCEP-GFS. Seguem os valores padrões de intervalo considerando as escolhas das origens dos dados: 1 hora para CPTEC-WRF e 3 horas para NCEP-GFS.
- **[-np 1]** Especifica o número de processos que serão disparados pelo módulo WRF (`wrf.exe`). A recomendação para aumentar a performance é usar um processo por

¹⁵ O endereço atual de busca desses dados é <https://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/>.

núcleo disponível, menos um. Ao menos um núcleo deverá ficar disponível para a execução do sistema operacional e demais aplicativos. A técnica de *multithreading* é a capacidade de um núcleo acomodar duas linhas de execução (*threads*). Embora permita aumento de desempenho, processos intensivos em CPU, como a integração numérica, podem ser impactados negativamente em performance pois há unidades operacionais dentro do núcleo que são compartilhadas entre as *threads* (processos).

- **[–wrf-time-step 20]** Especifica o valor em segundos para o passo no tempo da execução do programa de integração numérica WRF (wrf.exe). Existem uma dependência em relação à resolução espacial horizontal do domínio, de forma que se pode calcular esse valor antecipadamente. Contudo, durante a execução, o valor calculado pode levar a erro. Essa opção permite controlar esse valor em forma de parâmetro e realizar testes até chegar no valor atual. Mais usado durante a fase de definição de domínios.

Segue lista de **opções** que são de finalidade geral. Algumas estão relacionadas ao processo de execução dos módulos do WRF e não tem relação com os parâmetros a serem configurados nos namelists.

- **[–use-hwthread-cpus]** Especifica que sejam usados threads de hardware como CPUs independentes. O valor padrão é não usar, pois serviu somente para determinadas arquiteturas de hardware.
- **[–use-static-geogrid]** Essa opção informa que devem ser usados os arquivos binários com dados estáticos (WPS *Geographical Static Data*) referentes ao domínio e terreno que foram criados previamente, durante a definição do domínio. Esses arquivos, nomeados como “geo_em.d01,2,3”, e gerados pelo programa WPS geogrid.exe estão disponíveis nos diretórios de domínio no pacote “model-wrf”: “model-wrf/config-domains/NOME_DO_DOMINIO/”. Existe um arquivo para cada domínio, por exemplo, domínio 1: geo_em.d01, domínio 2: geo_em.d02 e domínio 3: geo_em.d03. Por padrão, o *script* define que o programa “WPS/geogrid.exe” gere o domínio para executar o modelo.
- **[–use-alternate-data]** Caso seja usada essa opção, vai abrir solicitação para especificar um diretório local para os dados de entrada globais (GFS ou WRF). Isso permite um controle sobre o uso de diferentes tipos de dados que já tenham sido baixados.
- **[–use-static-config]** Ao usar essa opção, o *script* de execução irá usar os arquivos de namelist já configurados e disponibilizados nos respectivos diretórios de execução do WPS e WRF. Como o padrão é usar geração dinâmica desses

arquivos de namelist, ao especificar essa opção, estará se desabilitando esse mecanismo.

5. Exemplo de uma linha de comando de execução. Serão apresentadas as descrições de cada campo informado na linha de comando.

```
8 ./runwrf.sh -conf G -ts 2022-01-01-12 -ti 24 -gti 3 -np 3 -gd gfs0p50 --use-generated-geogrid
```

- -conf G: será usado o domínio “r_sudeste-SP-MG-PR-MS-2d” que consistem no aninhamento de duas grades centradas sobre a região do estado de SP.
- -ts 2022-01-01-12: o início da simulação será à 12 horas UTC
- -ti 24: o tempo de previsão será de 24 horas.
- -gti 3: o intervalo de tempo dos dados globais GFS (especificado pelo -gd) será de três horas.
- -np 3: serão criados três processos que executarão em paralelo, cada qual em um *core* de CPU.
- -gd gfs0p50: serão usados dados globais GFS do NCEP cuja resolução é de 0,5 graus.
- --use-generated-geogrid: serão usados os dois arquivos com dados estáticos de domínio e de terreno referentes à configuração G.

Observações:

a) O comando “ulimit -s unlimited” pode ser executado antes de chamar o *script* “runwrf.sh”. O ulimit no Linux trata dos limites de sistema que podem ser configurados via modo de usuário ou a nível de sistema operacional (kernel). A opção -s indica tamanho máximo de pilha disponível ao programa. O padrão em sistemas Linux desktop é 8.192 KiB. Executando o comando anterior, o sistema não mais limita o tamanho de pilha.

b) Segue transcrita a configuração do domínio referida como B (região sul, centrada em Santa Catarina), conforme constante do arquivo de *script* principal do pacote (“runwrf.sh”):

```
9 [bB]) # *****  
10 CONFIG_NAME="r_sul-RS-SC-2d"  
11  
12 export _MAX_DOMAIN=2  
13
```

```

14 # Inclusion in this configuration, but can be modified.
15 export _WRF_TIME_STEP=60
16
17 # This is the parameter history_interval of namelist.input (MINUTES)
18 # Frequency at which to write data to the history (wrfout) file.
19 if [ -z ${_T_INTERVAL_OUTPUT_1} ]; then # Not set by the user
20     export _T_INTERVAL_OUTPUT_1=180 ## interval time: 3 h for DOMAIN 1
21 fi
22 export _T_INTERVAL_OUTPUT_2=60 ## interval time: 1 h for DOMAIN 2
23 export _T_INTERVAL_OUTPUT_3=60 ## interval time: 1 h for DOMAIN 3
24
25 export _PARENT_ID_2=1; export _PARENT_ID_3=""
26 export _I_PARENT_START_2=51 ; export _I_PARENT_START_3=""
27 export _J_PARENT_START_2=71 ; export _J_PARENT_START_3=""
28
29 export _GEODATA_RES_1=2m; export _GEODATA_RES_2=30s;
30 export _GEODATA_RES_3=""
31 export _MAP_PROJECTION=lambert
32 export _E_WE_1=150; export _E_WE_2=391; export _E_WE_3=""
33 export _E_SN_1=160; export _E_SN_2=371; export _E_SN_3=""
34
35 # Horizontal resolution of Domain 1
36 export _DX_1=10000; export _DY_1=10000
37
38 # Spatial resolutions of nests are calculated from parent_grid_ratio.
39 export _DX_2=2000; export _DX_3="";
40 export _DY_2=2000; export _DY_3=""
41
42 export _REF_LAT=-30.477; export _REF_LON=-53.302
43 export _TRUELAT1=-30.477; export _TRUELAT2=-30.477;
44 export _STAND_LON=-53.302
45
46 # Conf determines the choice of global data (source and/or resolution and interval)
47 GLOBAL_DATA_TIME_INTERVAL=3 # 3 hours
48 GLOBAL_DATA=gfs0p25 # GFS_0p50 GFS_0p25 NCEP_WRF_1km
49 GLOBAL_DATA_SOURCE="gfs"
50
51 # Included to considerer more ratio options
52 export _PARENT_RATIO_2=5 # Best values: 3 or 5
53 export _PARENT_RATIO_3="" # Best values: 3 or 5
54
55 export _FEEDBACK=1 # 0 one-way no feedback 1 two-way w/ feedback (default)
56 export _SMOOTH=2 # Default=2
57
58 export _MP_PHYSICS_1=3; export _MP_PHYSICS_2=3; export _MP_PHYSICS_3=3
59 export _BL_PBL_PHYSICS_1=1; export _BL_PBL_PHYSICS_2=1; export _BL_PBL_PHYSICS_3=1
60 export _CU_PHYSICS_1=1; _CU_PHYSICS_2=1; _CU_PHYSICS_3=0;
61
62 export _E_VERT=35 # Number o vertical levels. The levels are
63 # automatically calculated (auto_levels_opt=2)
64 # stretching in lower and in top of the atmosphere.
65
66 ;;

```

6. Organização dos diretórios na instalação padrão do pacote “model-wrf”. Para executar o modelo WRF na sequência de módulos conforme constante

na Figura 41 foram definidas quatro hierarquias de diretórios. Por padrão, todos são referidos em relação a um usuário do sistema operacional Linux. Para ilustração, será usado o nome de “usuario”. Considerando a hierarquia de diretórios do Linux, seria criada a seguinte pasta contendo os dados daquele usuário: “/home/usuario”.

Binários WRF - o local da instalação dos binários relativos aos diversos módulos do WPS/WRF. Por padrão, sugere-se a instalação no diretório “bin” localizado na pasta do usuário: “/home/usuario/bin”.

model-wrf - diretório a partir do qual serão executados os *scripts* do pacote “model-wrf”. Por padrão, sugere-se manter o diretório “model-wrf” na pasta do usuário: “/home/usuario/model-wrf”.

Dados Globais - diretório onde serão armazenados os dados globais de inicialização e de fronteira. Por padrão é o diretório referido pelo nome “model-data-input-global” que será criado na pasta home do usuário: “/home/usuario/model-data-input-global”.

Dados de Saída Modelo - diretório onde serão armazenados os dados de saída gerados pelo real.exe e pelo wrf.exe, além das figuras resultantes de operação de geração pelo GrADS. Por padrão é o diretório referido pelo nome “model-data-output” que será criado na pasta home do usuário: “/home/usuario/model-data-output”.

Segue o detalhamento da organização dos diretórios. No arquivo *script* “run-wrf.sh” há uma função (referida pelo nome “f_set_or_create_dir”)no qual são definidas variáveis de ambiente que irão conter as informações de diretório. Segue descrição sumária dos mais importantes:

CURRENT_DIR esta variável é importante e está definida no início do *script*. Recebe o caminho do pacote “model-wrf” através do seguinte comando: “/home/\$(id -un)/model-wrf”.

BIN_PATH variável que contém o diretório de instalação dos binários do WRF.

DIR_DATA_INPUT variável que contém o diretório de dados globais, baixados das respectivas fontes: GFS do NCEP e WRF do CPTEC. Por padrão, o valor dessa variável é o diretório “model-data-input-global”. São criados subdiretórios para cada data e hora e tipo de fonte, conforme o seguinte padrão: “yyyy-mm-dd-HH-gfs” (para NCEP-GFS); e “yyyy-mm-dd-HH-cptec-wrf” (para CPTEC-WRF).

DIR_DATA_OUTPUT variável que irá conter o diretório final dos arquivos de saída do WRF que é por padrão “model-data-output”. Durante a execução de uma

rodada, os dados são armazenados em diretórios específicos, gerados da seguinte forma: “model-data-output/DIR_DOMAIN_OUTPUT/wrf-[a-z]”. A variável “DIR_DOMAIN_OUTPUT” contém a composição da data e hora agregado ao identificador de domínio. **Os diretórios “wrf-[a-z]” (de a até z) contém diferentes execuções para o mesmo domínio e para a mesma data e hora de inicialização.** Por exemplo: “model-data-output/2021-12-31-12_dom_r_sul-RS-SC-2d/wrf-c” indica que é a terceira execução com a inicialização de 31 de dezembro de 2021, às 12 UTC, e para o mesmo domínio (configuração B). Qual a finalidade: caso se queira executar uma segunda rodada com esquema de física diferente e, a execução anterior terminou sem erros, então o *script* irá abrir uma nova simulação. Esses diretórios irão conter: os arquivos NetCDF gerados pelo real.exe e wrf.exe; todos os *logs* de todos os módulos; *log* de execução para indicar uma possível falha em algum módulo; os arquivos de namelist do WPS (namelist.wps) e do WRF (namelist.input); e, os arquivos de saída das figuras, geradas pelo GrADS.

E.4 Obtenção e Extração de Dados Observacionais de Estações de Superfície

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é um órgão dentro da estrutura do Ministério da Agricultura que, além de representar o Brasil junto à Organização Meteorológica Mundial (OMM), opera redes de estações meteorológicas e centros de previsão. As estações meteorológicas automáticas¹⁶ cobrem boa parte do território brasileiro e os dados coletados estão disponíveis através do Banco de Dados Meteorológicos do INMET (BDMET), cujo endereço de acesso é o seguinte: <https://bdmep.inmet.gov.br/>.

Consta do sítio do BDMET uma relação de dados históricos de todas as estações automáticas, separadas por ano de coleta, desde 2000. Cada arquivo compactado em formato ZIP contém todas as estações automáticas que coletaram dados meteorológicos. E, para cada arquivo de estação, dados horários contendo todas as variáveis meteorológicas coletadas durante determinado ano.

Para tratar os dados de determinadas estações (arquivos), os seguintes requisitos foram definidos:

1. Alteração dos nomes de arquivos para seguir um padrão, removendo caracteres de controle, como espaços dos nomes originais;
2. Remoção dos cabeçalhos, que contém informações sobre a estação, incluindo a linha de identificação dos campos presentes no arquivo;
3. Extração das colunas de dados de interesse do arquivo;

¹⁶ Relação (catálogo) com dados das estações sob responsabilidade do INMET consta do seguinte endereço: <https://portal.inmet.gov.br/paginas/catalogoaut>.

4. Extração das linhas de dados que identificam as datas de interesse;
5. Troca do separador decimal de vírgula por ponto, para o caso dos dados serem usados
6. Alteração de nomes de arquivo.

Para automatizar o processamento dos dados CSV foram criados *scripts* em Bash Shell para ajudar nesta etapa. Eles foram disponibilizados, junto a outros *scripts*, na plataforma GitHub, no seguinte repositório:

<https://github.com/glcamillo/model-extract-and-plot.git>. Eles podem ser baixados via link direto

(<https://github.com/glcamillo/model-extract-and-plot/archive/refs/heads/main.zip>) ou usando o comando git, da seguinte forma:

```
67 git clone https://github.com/glcamillo/model-extract-and-plot.git
```

Segue descrição dos principais arquivos de *scripts* e respectivas funções no processo de extração e filtragem de dados CSV oriundos do BDMET.

1. (v1) “bdmet-v1-filename-extraí-nome-estacao.sh DIRETORIO” Extraí o nome da estação e o código WMO presente no cabeçalho e usa como nome do arquivo resultante. Além disso, são removidos caracteres de espaço, parênteses, dentre outros. É feita uma cópia do arquivo original e escrito no seguinte diretório: “v0-original”. O arquivo original será renomeado e movido para o diretório “v1”.

2. (v2) “bdmet-v2-dados-remove-cabecalho.sh DIRETORIO” Remove as linhas de cabeçalho e copia os arquivos resultantes para o diretório “v2”. Além disso, faz uma segunda remoção, mas deixando a linha de nome das colunas. O resultado também vai escrito no diretório “v2”.

3. (v3) “bdmet-v3-dados-extraí-campos.sh DIRETORIO” Extraí os campos (colunas) dos arquivos que estão presentes no diretório “v2”. Ao usuário é solicitado informar os números dos campos após impressão em tela. Os arquivos resultantes são escritos no diretório “v3”.

4. (v4) “bdmet-v4-dados-remove-linhas-nulas.sh DIRETORIO” Tem a função de remover linhas sem dados que são filtradas usando a seguinte comparação: “;”. Os resultados são salvos no diretório “v4”.

5. (v5) “bdmet-v5-dados-altera-ponto-decimal.sh DIRETORIO” A depender da ferramenta que será usada para tratar os dados, é conveniente trocar a vírgula decimal pelo ponto decimal. Essa é a função deste *script*. Dados finais salvos no diretório “v5”.

Observações: A maior parte dos *scripts* foi definida para obter dados de entrada parametrizados pela opção de diretório de leitura. Mas a escrita é pré-configurada com os respectivos diretórios. Assim, o comando para remover alterar a vírgula decimal pode ser aplicado sobre os dados oriundos de “v1”. Os diretórios de destino “v?” são criados a partir do diretório de execução do *script*.

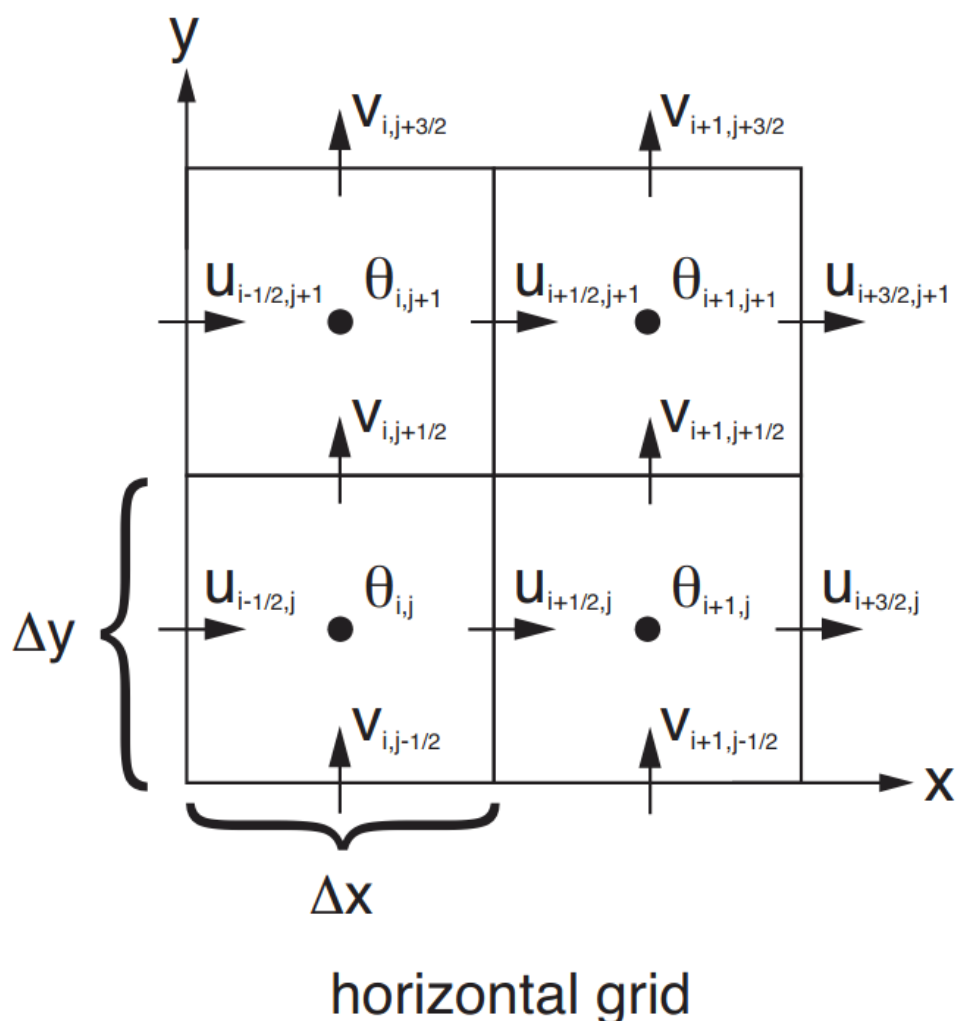
E.5 Extração de Dados de Saída do Modelo WRF

Os arquivos produzidos pelos programas *real.exe* e *wrf.exe* estão em formato NetCDF (NetCDF *Data Format data - 64-bit offset*). No sítio do WRF (<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Basics/wrf.php>) são apresentados os padrões de nomeação para arquivos gerados pelo *real.exe* e pelo *wrf.exe*. No caso do *wrf.exe*, os arquivos de saída são, por padrão, nomeados como “wrfout_dxx_[initial_date]”, sendo um para cada domínio.

E.5.1 Sistema de Coordenadas de Arquivos de Saído do WRF

Antes de considerar o processo de extração de dados dos arquivos NetCDF produzidos pelo WRF, será apresentado a organização da grade do modelo. A Figura 42 apresenta a grade horizontal do modelo WRF com destaque para os seguintes pontos: **u** para o cálculo de velocidades leste-oeste; **v** para cálculo de velocidades de sul-norte; *Theta* para o cálculo das demais variáveis meteorológicas.

Figura 42 – Esquema de grade horizontal do modelo WRF com destaque para os pontos de cálculo de variáveis atmosféricas.



Fonte: Skamarock et al. (2021).

Sobre o sistema de coordenadas: elas são referidas pelas letras i e j e correspondem, respectivamente, a x e y . A origem é no canto esquerdo inferior da grade, seguindo o sistema cartesiano de coordenadas.

E.5.2 Especificação das Coordenadas dos Pontos de Grade dos Dados NetCDF

Conforme consta na Seção E.5.1, o modelo WRF usa coordenadas cartesianas $i \times j$ enquanto que as localidades são identificadas por coordenadas geográficas. De forma a obter as coordenadas i e j correspondente a uma determinada coordenada geográfica, foi usado o programa “ncview”¹⁷. Esse programa está disponível nos repositórios dos sistemas Debian/Ubuntu.

Num primeiro momento obtém-se as coordenadas geográficas do local na forma de latitude e longitude usando valores em formato com ponto decimal. Após,

¹⁷ Mais informações em <https://cirrus.ucsd.edu/ncview/>.

usando o programa ncview, abre-se para visualização o arquivo de terreno gerado pelo geogrid.exe para a configuração que será executada. Considerando o pacote “model-wrf”, seria usado o arquivo “geo_em.d02.nc”. A seguir, faz-se escolhas das visualizações das coordenadas “CLAT” e “CLONG”. Para cada uma, segue-se com o ponteiro do mouse até encontrar o valor da coordenada geográfica. O programa informa qual a coordenada do modelo corresponde àquele ponto.

Observações: Essa é uma técnica manual para poucos pontos. As correspondências de pontos devem ser consideradas para o respectivo domínio a partir do qual serão extraídos os dados.

E.5.3 Extração de Dados de Precipitação em Pontos de Grade NetCDF

Existem diversas técnicas e ferramentas¹⁸ para extração de dados pontuais dos arquivos de saída do WRF. Por exemplo, o GrADS e o CDO¹⁹ permitem especificar coordenadas geográficas e os programas fazem a interpolação para as coordenadas do modelo. Alguns pacotes/bibliotecas de linguagens como Python podem também oferecer essa opção.

Aqui será explanado de forma sumária sobre a linguagem R²⁰ e como foi usada para extrair dados de precipitação da saída do modelo WRF. A linguagem R tem foco em processamento estatístico e científico, mas pode ser usada em uma variedade de aplicações. Para tratar arquivos em formato NetCDF foi desenvolvida biblioteca referida como “ncdf4”²¹ e que provê uma interface de alto nível para tratar com dados nesse formato.

Foi criado um programa (script) na linguagem R para extrair dados de precipitação nos pontos $i \times j$ relativo ao arquivo de saída NetCDF do programa wrf.exe. O nome do script é “wrfout-extract-PRP-with-R-for10kmAREA-and-statistics-from-D2.R” e está disponível no mesmo repositório do GitHub cujo endereço é <https://github.com/glcamillo/model-extract-and-plot>. Segue a metodologia usada:

1. Instalar o pacote R e suas bibliotecas principais. O processo depende da versão do sistema operacional e principalmente da distribuição Linux usada. A seguir, devem ser instaladas as seguintes bibliotecas para execução do *script*.

```
68 # A interface do R básica é em linha de comando e pode ser chamada através
69 # da execução do comando 'R' num terminal Linux.
70
71 > install.packages("ncdf4")
72 > install.packages("Metrics")
73 > install.packages("CFtime")
```

¹⁸ O seguinte sítio do projeto do formato NetCDF lista softwares para manipulação dos respectivos arquivos: <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/software.html>.

¹⁹ Mais informações em <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo>.

²⁰ Mais informações em <https://cran.r-project.org/>.

²¹ Mais informações em <https://cran.r-project.org/package=ncdf4>.

No programa do *script*, as bibliotecas são disponibilizadas para o ambiente através da execução desses comandos: `library(ncdf422)`, `library(Metrics23)` e `library(CFtime24)`. A biblioteca “ncdf4” é a interface para tratar arquivos NetCDF tanto para leitura quanto para escrita. A biblioteca “Metrics” contém diversas funções para sumarizações estatísticas, apesar de ter sido criada para tarefas de aprendizado de máquina supervisionado. A biblioteca “CFtime” provê funções relacionadas a calendário e formatos de data e hora (*timestamps*) usados em dados climáticos e meteorológicos (como no NetCDF4).

2. Após baixado o *script*, deve ser dada permissão de execução. A seguir, segue exemplo de chamada para executar a extração sobre os dados de saída NetCDF do WRF para o domínio D2 relativa à previsão numérica de 24 horas iniciando no dia 14 de agosto de 2020, às 00UTC.

```
74 # 1. Para executar, setar o bit de execução:
75 chmod u+x wrfout-extract-PRP-with-R-for10kmAREA-and-statistics-from-D2.R
76
77 # 2. Executar o script incluindo os parâmetros em uma linha (todos obrigatórios)
78 ./wrfout-extract-PRP-with-R-for10kmAREA-and-statistics-from-D2.R
79     wrfout_d02_2020-08-14_00.nc
80     data-prp-pbl_BOUGEAULT-8-mp_MADWRF-96
81     ALL
82     24
83     AREA
```

Especificação dos parâmetros:

wrfou_d02_2020-08-14_00.nc Nome e localização do **arquivo de entrada** do *script* que deve apontar para a saída NetCDF do WRF. Aqui representa a saída do modelo para o domínio D2 de uma execução que iniciou às 00 UTC do dia 14/08/2020.

data-prp-pbl_BOUGEAULT-8-mp_MADWRF-96 Padrão de nomeação do **arquivo de saída em formato CSV** para identificar quais as parametrizações usadas na execução do modelo. Pode ser usado qualquer nome para este arquivo de saída.

ALL Especifica que todas as estações (pontos) serão extraídas.

24 Especifica que serão extraídos dados relativos à previsão de 24 horas. As sumarizações estatísticas serão o período de dados extraídos.

²² Mais informações em <https://cran.r-project.org/web/packages/ncdf4/index.html>.

²³ Mais informações em <https://cran.r-project.org/web/packages/Metrics/index.html>.

²⁴ Mais informações em <https://cran.r-project.org/web/packages/CFtime/index.html>.

AREA Serão extraídos dados para compor uma área de 10 km de lado, ou seja, 25 pontos de dados. As sumarizações estatísticas irão considerar a média dos pontos de dados em torno da estação.

3. Como o projeto de pesquisa exigiu um sumário sobre uma área de aproximadamente dez quilômetros de lado, foi necessário extrair 24 pontos ao redor da coordenada central i e j , num total de 25 pontos. Considerando a resolução espacial de dois quilômetros, representa, ao final um quadrado de 10 km de lado.

4. Os dados das estações (quais e coordenadas i e j) além dos dados de precipitação observada estão incorporados dentro do próprio *script*. Como trabalho futuro poderia-se ler essas informações de arquivos externos, permitindo que o programa possa ser parametrizado para diferentes casos com mais facilidade. Como amostra, segue exemplo da precipitação horária de Chapecó para o dia 14 de agosto de 2020 conforme obtido do banco BDMET:

```
84 st_CH_prp <- c(0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 10, 5.8, 0.6, 1.4, 0.8, 0.0, 0.0, 0.2)
```

As seguintes estações foram definidas para extração de dados. Segue relação e a seguir o código no script em R para definição dos respectivas coordenadas i e j :

CH: Chapecó	XA: Xanxerê	JO: Joaçaba
CN: Campos Novos	CR: Curitiba	CA: Caçador

1. CH: Chapecó -27.0853111 -52.6357111 679
WRF Grid points: -27.0789 j=236 -52.629 x=155
2. XA: Xanxerê -26.938666 -52.39809 878,74
WRF Grid points: -26.9241 j=243 -50.3976 i=167
3. JO: Joaçaba -27.16916666 -51.55888888 767,63
WRF Grid points: -27.1572 j=231 -51.5555 i=209
4. CN: Campos Novos -27.3886111 -51.21583333 963
WRF Grid points: -27.3935 j=218 -51.214 i=226
5. CT: Curitiba -27.288624 -50.604283 978,1
WRF Grid points: -27.2348 j=227 -50.5938 i=257
6. CA: Caçador -26.819156 -50.98552 944,26m
WRF Grid points: -26.811 j=250 -50.992 x=238

```
85 st_coord_names <- c('CH', 'XA', 'JO', 'CN', 'CT', 'CA')
86 st_coord_i <- c(155, 167, 209, 226, 257, 238)
87 st_coord_j <- c(236, 243, 231, 218, 227, 250)
```

5. Os dados extraídos dos arquivos de saída do WRF (em formato NetCDF) foram os seguintes, todos relacionados a variáveis contendo precipitação acumulada horária²⁵:

```
RAINCD:description = "ACCUMULATED TOTAL CUMULUS PRECIPITATION" ;  
RAINSH:description = "ACCUMULATED SHALLOW CUMULUS PRECIPITATION" ;  
RAINNC:description = "ACCUMULATED TOTAL GRID SCALE PRECIPITATION" ;
```

Para obter o total de precipitação em cada ponto, foi considerada a soma dos valores de RAINC e RAINNC. A variável RAINC acumula a precipitação de origem dos esquemas de parametrização de cumulus. E, a variável RAINNC (*Non-convective (grid-scale) precipitation*) contém a precipitação gerada pelos processos de parametrização de microfísica.

6. Os cálculos e saídas são as seguintes:

- Um resumo estatístico é fornecido pela função “summary()” do R e salvo em arquivo formato CSV. Contém os seguintes valores: mínimo, média, mediana, máximo e quartis.
- Foram usadas as seguintes funções da biblioteca “Metrics”: ae (*Absolute Error*), bias, mae (*Mean Absolute Error*) e rmse (*Root Mean Squared Error*).
- São geradas três saídas: um arquivo CSV com o sumário estatístico da estação para todo o período; um arquivo CSV com os sumários estatísticos por estação e para cada hora (intervalo de tempo de saída dos dados); e, uma plotagem em PDF contendo um gráfico da diferença entre o previsto e observado para as 24 horas.

²⁵ Mais informações sobre as variáveis de saída WRF podem ser encontradas em https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/output_variables.html.