



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS

**Avaliação da Performance do Modelo WRF em Simular o Evento
de Precipitação Ocorrido em 27 de Fevereiro de 2023 no
Município de Itajubá/MG**

Denis William Garcia

Itajubá, MG, Brasil

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS

DENIS WILLIAM GARCIA

Avaliação da Performance do Modelo WRF em Simular o Evento
de Precipitação Ocorrido em 27 de Fevereiro de 2023 no
Município de Itajubá/MG

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Itajubá como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de Concentração:

Modelagem atmosférica

Orientação:

Prof. Dr^a. Michelle Simões Reboita – UNIFEI

Coorientação:

Prof. Dr^a. Vanessa Silveira Barreto Carvalho – UNIFEI

ITAJUBÁ, MG, BRASIL

2025

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter me dado tudo que foi necessário para chegar até aqui. Agradeço aos meus pais Carlos e Márcia por todo o apoio durante esses longos anos de faculdade, de estudos e de luta. Além de serem minha fonte de inspiração, que nos momentos de tomadas de decisão sempre souberam como me aconselhar. Agradecido por todos os valores que me foram repassados através deles como perseverança, caráter, humildade, respeito e comprometimento, afinal essa conquista também é de vocês, por todo tempo trabalhado e dedicado a mim.

Agradeço também aos meus avós José Francisco e Maria Isabel que sempre torceram por mim e pela minha formação acadêmica e que através de conversas e brincadeiras sempre me incentivaram a estudar cada vez mais e também aos meus falecidos avós Sergio Garcia e Maria de Lourdes Garcia.

A Milena e aos meus grandes amigos Danilo Silva, Pe. Bruno Morais e Lucas Chediak, por inúmeras conversas, conselhos e puxões de orelhas, que me auxiliaram a me tornar na pessoa que sou hoje. E também as pessoas que eu tenho um enorme carinho e que de certa forma contribuíram para este momento incrível em minha vida.

Aos meus orientadores e amigos Prof^a. Dr^a. Michelle Simões Reboita e Prof^a. Dr^a. Vanessa Silveira Barreto Carvalho por seus ensinamentos repassados a mim, por toda atenção dedicada e tempo gastos para o meu entendimento e crescimento acadêmico. Agradeço também por terem me dado a oportunidade de trabalhar com elas.

Agradeço aos meus amigos de pós-graduação André, Lorena Lara, Vinicius Fabiana Bartolomei, Giovana, Laila, Marcela, Maria Eduarda, Thaís. Obrigado pela companhia, pelas risadas e também pelos momentos que jamais serão esquecidos.

Ao Prof.^o Thiago Biscaro pela disponibilização dos dados de radar utilizados neste trabalho, agradecer também aos Professores Enrique Vieira Mattos, Benedito Cláudio de Silva e Wallace Figueiredo Menezes pela disposição e participação nesta banca.

"A meteorologia é uma arte de prever o que a natureza nunca quer revelar."

John Ruskin

RESUMO

Na tarde do dia 27 de fevereiro de 2023, em aproximadamente 40 minutos, ocorreu precipitação superior a 50 mm em Itajubá, sul de Minas Gerais, o que resultou em diversos danos e prejuízos associados a alagamentos e inundações, deslizamentos de terra, quedas de árvores e muros. Diante disso, o objetivo desse estudo é avaliar a performance da previsão numérica realizada pelo Centro de Estudos e Previsão do Tempo e Clima de Minas Gerais (CEPreMG), da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), que executa operacionalmente o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF). Além disso, tem-se como objetivo a realização de oito testes de sensibilidade com o modelo WRF a fim de verificar uma possível melhor configuração para as previsões no sul de Minas Gerais. Portanto, além da simulação controle, considerando a mesma configuração utilizada na operação pelo CEPreMG, os testes de sensibilidade consideram diferentes esquemas de parametrização de microfísica de nuvens: (1) WSM3, (2) WSM6 e (3) WDM6, condições iniciais de fronteira: (4) GFS, (5) GDAS e (6) ERA5, (7) umidade do solo, (8) temperatura da superfície do mar (SST) e (9) a combinação das melhores configurações obtidas nos experimentos. Para avaliar a performance do modelo, diferentes medidas estatísticas são aplicadas para comparar a precipitação simulada com dados observados em estações meteorológicas, estimativas de satélite e radar. As análises estatísticas indicaram que para a microfísica, o esquema WSM3 possui melhor assertividade, enquanto que os dados de inicialização provenientes da reanálise do ERA5 levam a uma melhor simulação do caso em estudo; para a umidade do solo, os dados climatológicos que acompanham o WRF produziram uma simulação mais similar ao evento em estudo, mas para a SST, os dados semanais foram os que levaram à melhor performance da simulação. As análises estatísticas para o experimento usando as melhores configurações obtidas indicaram que essa simulação é superior em comparação aos experimentos prévios. Portanto, sugere-se que essa configuração seja utilizada para estudos de caso no sul de Minas Gerais, já que para modo operacional não pode ser implementada devido à latência da reanálise ERA5.

Palavras chaves: Precipitação. Performance do WRF. Modelos Atmosféricos. Testes de Sensibilidade. Sul de Minas Gerais.

**Evaluation of the WRF Model's Performance in Simulating the Precipitation Event on
February 27, 2023, in the Municipality of Itajubá/MG**

ABSTRACT

On the afternoon of February 27, 2023, in approximately 40 minutes, more than 50 mm of rain occurred in Itajubá, southern Minas Gerais, resulting in significant damages and losses associated with flooding, landslides, fallen trees, and collapsed walls. In this context, the objective of this study is to evaluate the performance of the numerical forecast conducted by the Center for Weather and Climate Studies and Forecasting of Minas Gerais (CEPreMG) at the Federal University of Itajubá (UNIFEI), which operationally runs the Weather Research and Forecasting (WRF) model. Additionally, the study aims to conduct eight sensitivity tests with the WRF model to identify a potentially better configuration for forecasts in southern Minas Gerais. Thus, in addition to the control simulation, which uses the same configuration as the operational CEPreMG setup, the sensitivity tests consider different cloud microphysics parameterization schemes: (1) WSM3, (2) WSM6, and (3) WDM6; initial and boundary conditions: (4) GFS, (5) GDAS, and (6) ERA5; (7) soil moisture; (8) sea surface temperature (SST); and (9) a combination of the best configurations obtained from the eight experiments. To evaluate the model's performance, various statistical measures are applied to compare the simulated precipitation with observed data from meteorological stations, satellite estimates, and radar observations. Statistical analyses indicated that for microphysics, the WSM3 scheme showed the best accuracy, while initialization data from the ERA5 reanalysis led to a better simulation of the studied case. Regarding soil moisture, the climatological data provided with the WRF produced a simulation more similar to the studied event, whereas for SST, weekly data resulted in the best simulation performance. Statistical analyses of the experiment using the best-obtained configurations indicated that this simulation outperformed the previous experiments. Therefore, it is suggested that this configuration be used for case studies in southern Minas Gerais, although it cannot be implemented operationally due to the latency of the ERA5 reanalysis.

Keywords: Precipitation. WRF performance. Atmospheric models. Sensitivity Tests. Southern Minas Gerais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Transtornos causados pela chuva do dia 27 de fevereiro de 2023: (a) tempestade, (b) alagamento da portaria principal da Universidade Federal de Itajubá, (c) descalçamento de rua em Pedralva e (d) barro sobre rua no bairro Anhumas em Itajubá. Fonte: Acervo pessoal (a) e G1 (b, c, d).....	16
Figura 2 - Processo metodológico adotado para desenvolvimento das análises.	21
Figura 3 - Mapa de relevo (metros) do município de Itajubá. Fonte: SRTMGL3. Os 4 pontos no mapa indicam a localização das estações pluviométricas existentes em fevereiro de 2023 no município.	22
Figura 4 - Grades aninhadas do modelo WRF presente no CEPReMG, grade externa D-01 (12 km de espaçamento de grade) e grade interna, aninhada a grade externa, D-02 (3 km de espaçamento). As grades estão centradas na coordenada 45,45°O e 22,45°S que representa o município de Itajubá.	27
Figura 5 - Campos sinóticos do dia 27 de fevereiro de 2023 às 1200 e 1800 UTC. (a-b) PNMM (hPa, linhas contínuas pretas), ventos em 250 hPa com intensidade superior 30 m.s ⁻¹ (preenchido) e espessura da camada 500-1000 hPa (m, linhas pontilhadas vermelhas), (c - d) umidade relativa do ar em 850 hPa (% , preenchido), altura geopotencial em 500 hPa (m, linhas contínuas pretas), movimento vertical em 500 hPa(Pa/s pontilhado); (e - f) divergência do fluxo de umidade integrado entre 1000 e 100 hPa (kg m s ⁻¹ , preenchido), vetores do vento (m s ⁻¹ , vetores pretos).	38
Figura 6 - Campos sinóticas do dia 27 às 1200-1800 UTC das variáveis: (a - b) índice Total Totals (°C, pontilhados acima de 45°C), índice K (°C, preenchido); (c - d) Cisalhamento vertical do vento entre 500 e 1000 hPa (m s ⁻¹ , preenchido), CAPE (J/kg, pontilhado acima de 1000 J/kg)	40
Figura 7 - Temperatura de brilho (K) obtida do GOES-16, canal 13 (10.3 μm), do dia 27 de fevereiro de 2023 às (a) 1800 UTC e (b) 1900 UTC.....	41
Figura 8 - Precipitação (mm) registrada a cada 10 minutos pelas estações pluviométricas do CEMADEN no município de Itajubá: Estiva (azul), Rio Sapucaí (laranja), São Vicente (verde) e a média das estações (preto).	41
Figura 9 - CAPPI de refletividade (dBZ) do radar do FCTH na altura de 3 km dos horários das (a) 1900 UTC às (l) 1955 UTC.....	42

Figura 10 - Estimativa de precipitação (mm/h) obtidas com a relação Z-R aplicada aos dados do radar do FCTH na altura entre os horários das (a) 1900 UTC às (l) 1955 UTC.	43
Figura 11 - CAPPI de refletividade do radar do FCTH na altura de 3 km. (a) CAPPI às 1940 UTC e (b) seção transversal do CAPPI às 1940 UTC.	44
Figura 12 - CAPPI de refletividade (dBZ) do radar do FCTH na altura de 3 km. (a) CAPPI às 1940 UTC e (b) classificação convectiva/estratiforme da tempestade (preenchido) para às 1940 UTC.	45
Figura 13 - Precipitação acumulada diária (mm, preenchido) para o dia 27 de fevereiro de 2023, utilizando diferentes fontes de dados e simulações realizadas: (a) Reanálise ERA5, (b) CHIRPS, (c) MERGE, (d) WSM3 (controle), (e) WSM6, (f) WDM6, (g) GDAS, (h) experimento com dados do ERA5, (i) SST, (j) SOIL, (k) ERA5_SST e (l) estações meteorológicas.	47
Figura 14 - Índice Total Totals (°C, pontilhados), índice K (°C, preenchido) dia 27 às 1200 UTC. Em que: (a) dados da ERA5, (b) WSM3, (c) WSM6, (d) WDM6, (e) GDAS, (f) experimento com dados do ERA5, (g) SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST.	49
Figura 15 - Índice Total Totals (°C, pontilhados), índice K (°C, preenchido) dia 27 às 1800 UTC. Em que: (a) dados de reanálise do ERA5, (b) WSM3, (c) WSM6, (d) WDM6, (e) GDAS, (f) experimento com dados da ERA5, (g) SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST.	50
Figura 16 - Advecção horizontal temperatura do ar (preenchido), direção e intensidade do Vento em 850 hPa (m/s, vetores) dia 27 às 1800 UTC. Em que: (a) dados de reanálise ERA5, (b) WSM3, (c) WSM6, (d) WDM6, (e) GDAS, (f) experimento com dados do ERA5, (g) SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST.	52
Figura 17 - Advecção horizontal temperatura do ar (preenchido), direção e intensidade do Vento em 850 hPa (m/s, vetores) dia 27 às 1800 UTC. Em que: (a) dados de reanálise ERA5, (b) WSM3, (c) WSM6, (d) WDM6, (e) GDAS, (f) experimento com dados do ERA5, (g) SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST.	53
Figura 18 - CAPE superior a 500 J/kg (J/kg, pontilhados), Cisalhamento Vertical do Vento (m/s, preenchido) dia 27 às 1200 UTC. Em que: (a) dados de reanálise do ERA5, (b) WSM3, (c) WSM6, (d) WDM6, (e) GDAS, (f) experimento com dados do ERA5, (g) SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST.	55
Figura 19 - CAPE superior a 500 J/kg (J/kg, pontilhados), Cisalhamento Vertical do Vento (m/s, preenchido) dia 27 às 1800 UTC. Em que: (a) dados de reanálise do ERA5, (b) WSM3,	

(c)WSM6, (d)WDM6, (e)GDAS, (f)experimento com dados do ERA5, (g)SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST. 56

Figura 20 - Diagrama SkewT - LogP para o dia 27 de fevereiro de 2023 às 1800 UTC (a) dados de reanálise do ERA5, (b)WSM3, (c)WSM6, (d)WDM6, (e)GDAS, (f)experimento com dados do ERA5, (g)SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST. A linha verde indica temperatura do ponto de orvalho, a linha preta indica a temperatura da parcela e a linha vermelha indica a temperatura do ar ambiente. 57

Figura 21 - (a) Precipitação horária(mm/hora) utilizando a grade de 3 km e (b) gráfico horário de BIAS para grade de 3 km. Têm-se as simulações: WSM3 (vermelho), WSM6 (verde), WDM6 (azul) e a média dos dados das estações (preto). 61

Figura 22 - (a) CAPE horário (J/kg) utilizando a grade de 3 km, (b) K horário (°C) utilizando a grade de 3 km, (c) TT horário (°C) utilizando a grade de 3 km e (d) cisalhamento vertical do vento horário (m/s) utilizando a grade de 3 km. Têm-se as simulações: WSM3 (vermelho), WSM6 (verde), WDM6 (azul) e a média dos dados das estações (preto). 63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos estudos de testes de sensibilidade em diferentes regiões do globo utilizando o modelo WRF.	17
Tabela 2 - Tabela de variáveis da reanálise ERA5 utilizadas como condição de fronteira no modelo WRF.	23
Tabela 3 - Localização das estações meteorológicas em que foram obtidos os dados usados no estudo.....	24
Tabela 4 - Resumo das principais informações dos conjuntos de dados utilizados.	25
Tabela 5 - Configurações do modelo WRF utilizado nas simulações de previsão do tempo pelo CEPReMG e também nesse estudo, exceto nos experimentos de sensibilidade em que as parametrizações físicas são modificadas.	28
Tabela 6 - Tabela com o nome dos experimentos e sua descrição.	29
Tabela 7 - Descrição das características das parametrizações microfísicas.	30
Tabela 8 - Índice TT e a situação da atmosfera (Fonte: Miller, 1972).	33
Tabela 9 - Índice K, probabilidade de ocorrência de eventos e a situação atmosférica (Fonte: Vasquez, 2017).	33
Tabela 10 - Valores de CAPE e as possíveis ocorrências atmosféricas. (Fonte: Vasquez, 2017).	34
Tabela 11 - Tipos de tempestades em função do CAPE (J/Kg) e cisalhamento vertical do vento horizontal (m/s) entre 500 e 1000 hPa. Fonte: Adaptado de Joe et al. (2012).	35
Tabela 12 - Estatísticas Aplicadas na Análise: Viés, Coeficiente de Correlação e Índice de Eficiência Kling-Gupta (KGE).	36
Tabela 13 - Tabela contendo os valores registrados em Itajubá para cada experimento realizado: WSM3, WSM6, WDM6, GDAS, ERA5, SST, SOIL, ERA5_SST.	59
Tabela 14 - Tabela contendo os valores do KGE e da correlação para os experimentos de sensibilidade dos parâmetros microfísicos (WSM3, WSM6 e WDM6).	64
Tabela 15 - Tabela contendo os valores do KGE e da correlação para os experimentos de sensibilidade dos dados de entrada do modelo WRF (GFS, GDAS e ERA5).....	65

Tabela 16 - Tabela contendo os valores do KGE e da correlação para os experimentos de sensibilidade dos dados da temperatura da superfície do mar (climatológica e semanal).	66
Tabela 17 - Tabela contendo os valores do KGE e correlação para os experimentos de sensibilidade dos dados de umidade do solo do modelo WRF (GFS, GDAS e ERA5).	67
Tabela 18 - Tabela contendo os valores do KGE e da correlação para os experimentos de sensibilidade dos dados de entrada do modelo WRF (GFS, GDAS e ERA5).	68

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	20
2.1. Objetivo Geral	20
2.2. Objetivos Específicos	20
3. DADOS E METODOLOGIA	21
3.1. Área de estudo	21
3.2 Dados	22
3.2.1. Dados do <i>Global Forecast System</i> (GFS) e do <i>Global Data Assimilation System</i> (GDAS).....	22
3.2.2. Reanálise ERA5.....	23
3.2.3. Precipitação	23
3.2.4. Dados de Radar.....	25
3.3 <i>Weather Research Forecasting</i> (WRF)	26
3.4. Experimentos Numéricos de Sensibilidade	28
3.5. Parametrização de microfísica de nuvens.....	29
3.6. Condições Iniciais e de Fronteira Laterais	30
3.7. Condição de Fronteira na Superfície - SST	31
3.8. Condição de Fronteira na Superfície - Umidade do Solo.....	31
3.9. Simulação Final	31
3.10. Análises	31
3.10.1. Caracterização sinótica e de mesoescala da tempestade	31
3.10.2. Validação dos Experimentos Numéricos - Campos Espaciais	32
3.10.3 Validação dos Experimentos Numéricos: Medidas Estatísticas.....	35
4. RESULTADOS	37
4.1. Análise Sinótica com a ERA5	37
4.2. Caracterização da Tempestade através de Radar.....	41

4.3. Validação das Simulações na Grade de 3 km.....	45
4.3.1. Precipitação Acumulada Diária	45
4.3.2. Índices de Instabilidade	48
4.3.3. Análise Estatística	59
5. CONCLUSÕES.....	69
REFERÊNCIAS	71

1. INTRODUÇÃO

Eventos extremos podem ser de tempo ou de clima. No caso dos eventos extremos de tempo, estes podem, por exemplo, ser episódios de chuvas diárias intensas. De acordo com o IPCC (2014), eventos extremos são definidos como eventos que ocorrem raramente numa determinada localidade. Esses eventos estão nas caudas das distribuições de probabilidade (entre os 10% dos valores mais altos ou mais baixos). Os eventos extremos de tempo podem ser responsáveis por alagamentos, inundações e deslizamentos de terra (Cassalho *et al.*, 2017; Medeiros; Souza; Gomes Filho, 2014; Bourdeau-Brien; Kryzanowski, 2020; Reza, 2020), rajadas de vento intensas (Pristo *et al.*, 2018), problemas à saúde associados com doenças transmissíveis, transtornos psicossociais e comportamentais, doenças cardiovasculares e intensificação de doenças crônicas (Freitas *et al.*, 2014; Hidalgo; Baez, 2019; Henneman *et al.*, 2020) e danos à infraestrutura (Reichstein *et al.*, 2013).

Vários estudos têm relatado aumento na tendência de ocorrência de eventos extremos de precipitação através de dados observados e reanálises no território brasileiro (Zilli, *et al.*, 2017; Marrafon e Reboita, 2020; Lindemann *et al.*, 2021) e com dados de satélites para todo o globo (Gu; Adler, 2022). No Brasil, podem-se citar episódios recentes como em 2020 e 2022 na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Brumadinho e Muriaé (Bartolomei *et al.*, 2023, Pinto, 2025), no ano de 2023 vários episódios ocorreram a exemplo disso temos no Rio de Janeiro (Lima; Armound, 2022), litoral Norte de São Paulo (SP, Silva; Marengo; Ruv Lemes, 2024), Petrópolis (Alcântara *et al.*, 2023; Blaudt *et al.*, 2023; Silveira *et al.*, 2023), e mais recentemente no Rio Grande do Sul em 2024 (Rocha *et al.*, 2024).

Dos casos citados, o evento de 18 e 19 de fevereiro de 2023, no Litoral Norte do Estado de SP, é o de maior recorde de precipitação acumulada em 24 horas no país. Em São Sebastião foi registrada precipitação de cerca de 683 mm em 15 horas (Marengo *et al.*, 2024). De acordo com o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), mais de 2000 pessoas ficaram desabrigadas, 2466 desalojadas e ocorreram 70 óbitos neste evento (CEMADEN, 2023). As fortes chuvas ocasionaram diversos movimentos de massa e também inundações, maiores responsáveis pelo grande número de mortes na cidade (Silva; Marengo; Ruv Lemes, 2024). Já o caso do Rio Grande do Sul tem destaque para o volume de chuvas numa sequência de dias entre o final de abril e início de maio de 2024 que levou à inundação de diversas localidades no Estado (Rocha *et al.*, 2024).

O Sul de MG por diversas vezes foi afetado por elevados volumes de precipitação; os dois casos mais severos ocorreram em 1991 e 2000 (Reboita *et al.*, 2017). Esses eventos são

típicos nos meses de outubro a março, período chuvoso da região (Teodoro et al. 2020; Reboita et al., 2015, 2022; Ferreira e Reboita, 2023). O município de Itajubá, localizado no sul do Estado de MG, também é afetado pelos eventos extremos de precipitação. Campos et al. (2011) considerou o limiar de 50 mm/dia para identificar a ocorrência de eventos no município. Entre os anos de 1998 e 2011, a cidade foi atingida por 21 eventos meteorológicos desta magnitude ou superior. Dentre os eventos analisados, encontra-se o que ocorreu entre os dias 01 e 04 de janeiro de 2000, em que o valor diário de chuva excedeu 50 mm/dia. No último dia do evento o total acumulado de precipitação ultrapassou 180 mm de o que ocasionou o transbordamento do Rio Sapucaí (Pinheiro, 2005) causando diversos transtornos à população residente em seu entorno.

No dia 27 de fevereiro de 2023, as cidades de Itajubá e Pedralva foram atingidas por uma forte chuva em curto período de tempo (cerca de 40 minutos). A chuva causou diversos pontos de alagamentos, inundações, quedas de árvores, barreiras e muros, resultando em danos econômicos e 28 desabrigados, sendo nove no município de Itajubá (G1, 2023). Esse episódio também afetou a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). A chuva elevou o volume de água na bacia localizada atrás do campus da UNIFEI, que ocasionou inundação afetando a universidade. A universidade estimou um prejuízo de aproximadamente 10 milhões de reais em perdas de equipamentos laboratoriais e computacionais, além de danos estruturais (G1, 2023).

Na data do evento, havia quatro pluviômetros no município de Itajubá, sendo três geridos pelo CEMADEN e um pela UNIFEI. O pluviômetro localizado no bairro Estiva, próximo à prefeitura da cidade de Itajubá, registrou 58,8 mm de precipitação; o do bairro São Vicente registrou 43,8 mm e a estação Rio Sapucaí registrou 24,6 mm, em 40 minutos (<https://mapainterativo.cemaden.gov.br/#>). Já na estação meteorológica da UNIFEI o valor foi superior, chegando a 73 mm. A Figura 1 exibe imagens de alguns estragos causados pela tempestade ocorrida no município de Itajubá no dia 27 de fevereiro de 2023.

Figura 1 - Transtornos causados pela chuva do dia 27 de fevereiro de 2023: (a) tempestade, (b) alagamento da portaria principal da Universidade Federal de Itajubá, (c) descalçamento de rua em Pedralva e (d) barro sobre rua no bairro Anhumas em Itajubá. Fonte: Acervo pessoal (a) e G1 (b, c, d).



Como os eventos extremos estão cada vez mais frequentes e intensos, a segurança de uma comunidade está atrelada com a boa gestão política, que no caso depende de ferramentas e informações provenientes de monitoramento e previsão hidrometeorológicas. Tendo em vista a necessidade por previsões acuradas no sul de MG, a UNIFEI possui em suas instalações, o Centro de Estudos e Previsão do Tempo e Clima de Minas Gerais (CEPreMG), que executa diariamente as previsões numéricas do tempo com a utilização da versão 4.4 do modelo *Weather Research Forecasting* (WRF).

Nem todos os processos físicos nos modelos numéricos são resolvíveis, parametrizações físicas são necessárias, sendo fontes de incertezas nas simulações. Há parametrizações físicas para processos radiativos, microfísica de nuvens, convecção cumulus, camada limite planetária, cada qual com sua característica. Portanto, para a utilização do WRF em uma dada região são necessários testes de sensibilidade para definir qual a melhor combinação de parametrizações tanto para estudos de caso quanto para o uso em modo operacional. Uma síntese de estudos com esse objetivo, usando o WRF em diferentes regiões do globo, é apresentada na Tabela 1. Esses estudos indicam o grande impacto das condições iniciais e das parametrizações físicas, como a de microfísica, na precipitação simulada. Desta forma, a realização de experimentos de

sensibilidade para o sul de MG, tem como parte fundamental a melhoria da configuração do modelo de previsão do tempo realizada pelo CEPReMG.

Tabela 1 - Resumo dos estudos de testes de sensibilidade em diferentes regiões do globo utilizando o modelo WRF.

Referência	Área de estudo	Testes de Sensibilidade	Principais Conclusões
Mohan <i>et al.</i> , (2018)	Chennai, Índia	Microfísica: Morrison Double moment (MORR), Lin Scheme, WSM3, WSM6 e New Thompson	Os esquemas de Thompson e Morrison simularam corretamente o horário e a intensidade máxima das chuvas. O esquema de Thompson também produziu corretamente os movimentos verticais associados à instabilidade, grande convergência em níveis médios e divergência em níveis superiores.
Liu <i>et al.</i> , (2018)	Ásia	Convecção cumulus; KF, Zang-McFarlane (ZM) e Grell-3D ensemble (G3) Microfísica: WDM5, WDM6 e MORR	A convecção cumulus ZM com a parametrização microfísica de MORR representou melhor a precipitação média quanto à distribuição espacial.
Solano-Farias <i>et al.</i> (2023)	Andalusia	G3, GF, KF e desligadas (convecção cumulus); Thompson, WSM6 e WSM7 (microfísica).	A parametrização de convecção cumulus de GF e desligando o esquema de cumulus, apresentaram melhores resultados. A região estudada apresenta orografia complexa e em locais com altas montanhas embora o esquema de Thompson tenha mostrado bons resultados, a parametrização microfísica WSM7 obteve resultados superiores a parametrização microfísica anterior.
Faria <i>et al.</i> , (2023)	Sul do Brasil	GFS e ERA5 (condições iniciais); KF e BMJ (convecção cumulus); SST + 2°C (temperatura da superfície do mar); Fluxo de calor turbulento (FCT) ligado e desligado.	A combinação da ERA5 com BMJ obteve os melhores resultados ao comparar os dados da pressão a nível médio do mar e também a trajetória de um ciclone estudado. Além disso, simulações com o FCT desligados apresentaram um ciclone enfraquecido, porém com maior duração. Ao acrescentar 2°C na SST o ciclone se mostrou mais intenso em comparação com o ERA5 e as outras simulações realizadas pelos autores.

Gunwani <i>et al.</i> , (2023)	Planície Indo- Gangética, Índia	FNL, GDAS, ERA5 - Interim, NCMRWF (condições iniciais)	As condições iniciais que obtiveram os melhores resultados para o transporte químico da atmosfera, com uma pequena taxa de erros e grande similaridade com os dados observados, foram o GDAS e a reanálise ERA5.
Martinez <i>et al.</i> , (2024)	Região Amazônica Colombiana e Cordilheira dos Andes	YSU, MYNN e QNSE (camada limite planetária).	As simulações que utilizaram os esquemas YSU e QNSE da camada limite planetária obtiveram resultados mais realistas do sistema convectivo de mesoescala estudado. Estes parâmetros da camada limite planetária representaram de maneira eficiente as correntes de densidade em níveis mais próximos da superfície com uma linha nítida de convergência e grandes velocidades verticais próxima a Cordilheira do Andes.
Biswasharma <i>et al.</i> , (2024)	Nagaland, Índia	Todos os esquemas de convecção cumulus e todos os esquemas microfísicos.	Os esquemas de momento duplo (New Thompson, WDM5, WDM6 e MORR) possuem melhores resultados em comparação com os de momento único quando as validações são realizadas com dados de pluviômetros e do Global Precipitation Measurement (GPM).
Souza <i>et al.</i> , (2024)	Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, Brasil	GF, Multi-Scale- Kain-Fitisch (MKF) e KF (convecção cumulus) WSM6, MORR, WSM7, WDM6 e WDM7 (microfísica).	Os resultados encontrados por Souza <i>et al.</i> , (2024) sugerem que a combinação dos esquemas MORR e MKF produz os melhores resultados para as 150 simulações realizadas pelos autores. No entanto, ao avaliar categoricamente seus resultados para eventos dinâmicos/convectivos, os conjuntos MORR e MKF e WDM6 apresentaram os melhores índices. Além disso, outros resultados apresentaram melhores índices exclusivamente para eventos convectivos como o WSM6 e GF.
Campos, Carvalho, Mattos (2023)		GF e KF (convecção cumulus) Thompson, Milbrant 2-mom. (MILB), (MORR) e WDM6 (microfísica).	Campos <i>et al.</i> , (2023) encontraram que para os processos de chuva quente, a parametrização microfísica WDM6 obteve resultados superiores aos outros esquemas. Enquanto que o granizo foi melhor representado por MILB.

Gonçalves <i>et al.</i> , (2024)	Espírito Santo, Brasil	Tiedtke (TK), KF, GD e G3 (convecção cumulus); Thompson, WSM3, Ferrier, Purdue-Lin e WSM6 (microfísica). MYJ, YSU, MY-NN3 e TKE (camada limite planetária).	A combinação de TK para convecção cumulus, Thompson para microfísica e TKE para camada limite obtiveram melhores resultados para representar o padrão geral do vento. Contudo, o modelo teve uma tendência de superestimar a velocidade do vento de nordeste. Quanto mais próximo do oceano, menor a performance da simulação.
Duzenli, Yuel, Yilmaz (2024)	Mar Mediterrâneo e Mar Negro Oriental	WRF acoplado do WRF-Hydro (umidade do solo)	O modelo WRF acoplado ao WRF-Hydro possui melhor desempenho na localização e na intensidade da ocorrência de precipitação extrema horária. Com a alteração dos dados iniciais de umidade do solo os elementos do ciclo hidrológico foram afetados. Além disso, a inicialização do modelo com a umidade do solo baseada em satélites melhora a saída da vazão após um período de ajuste.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral avaliar a qualidade da previsão do modelo *Weather Research Forecasting* (WRF) no evento de precipitação que atingiu a cidade de Itajubá no dia 27 de fevereiro de 2023 e através da realização de testes de sensibilidade para verificar outras possibilidades de configuração do modelo, que eventualmente possam a ser usadas nas rodadas operacionais podendo obter melhores previsões

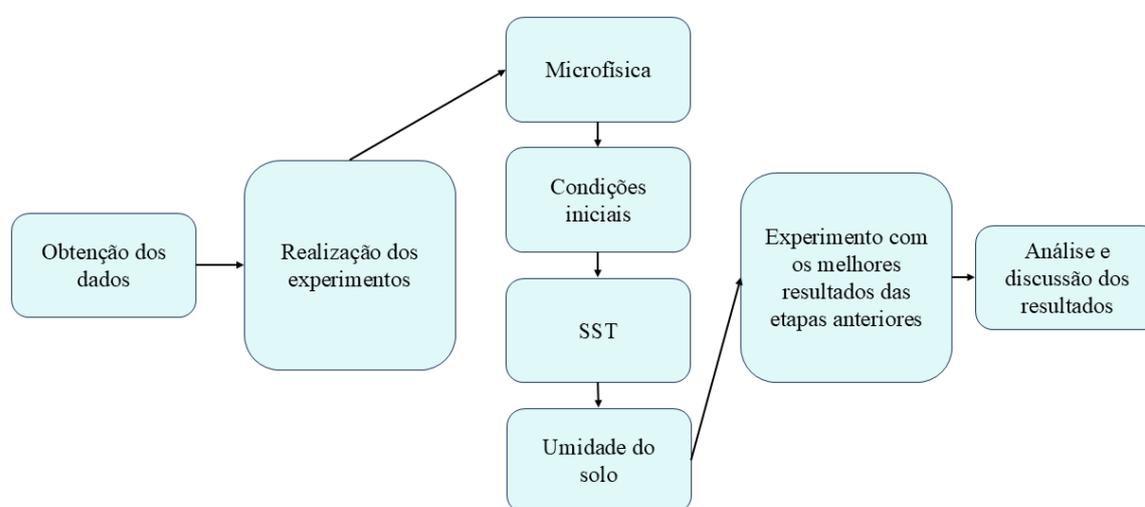
2.2. Objetivos Específicos

- Descrever as características sinóticas, dinâmicas e termodinâmicas associadas ao episódio da chuva extrema.
- Avaliar a performance de diferentes experimentos de sensibilidade: (a) parametrizações de microfísica de nuvens, (b) condições de fronteira, (c) temperatura da superfície do mar (SST) e (d) umidade do solo, com o intuito de identificar alternativas que possam melhorar a qualidade das previsões numéricas com o WRF, seja para estudos de caso ou para a parte operacional.

3. DADOS E METODOLOGIA

Nesta seção serão descritos o local de estudo, os dados utilizados e as análises realizadas. Definida a área de estudo e realizada a obtenção dos dados, as simulações foram realizadas. O fluxograma (Figura 2) resume as etapas realizadas neste trabalho, uma vez que a realização dos experimentos foi a etapa mais complexa, em que a partir de cada simulação o melhor resultado foi adotado na simulação seguinte.

Figura 2 - Processo metodológico adotado para desenvolvimento das análises.



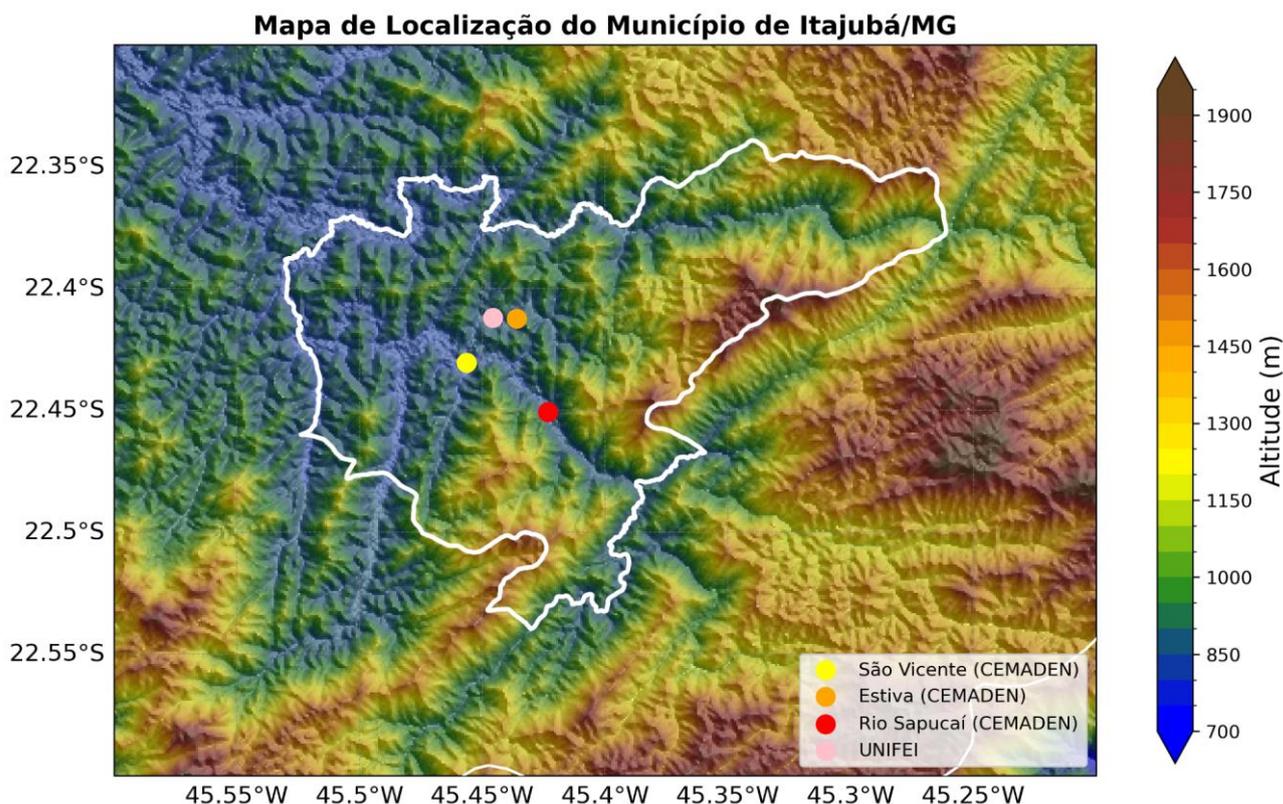
3.1. Área de estudo

O município de Itajubá (Figura 3) está localizado na latitude 22° 30' 30" S, longitude 45° 27' 20" O, no sul de MG, na Serra da Mantiqueira. Itajubá faz parte da bacia hidrográfica do Rio Sapucaí, afluente do Rio Grande. O município possui relevo montanhoso-ondulado cercado pela mata atlântica com a presença de diversas espécies nativas do bioma (Prefeitura Municipal de Itajubá, 2023).

Itajubá possui área territorial de 294.835 km² e população estimada em 93.073 habitantes (IBGE, 2022), a cidade está a cerca de 842 metros acima do nível do mar e possui clima tropical de altitude pela classificação de Köppen, caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos frios e secos (Reboita *et al.*, 2015). Entretanto, o termo mais utilizado atualmente é o de clima de monção. Tanto Itajubá quanto às demais cidades do sul do Estado apresentam precipitação média anual de cerca de 1600 mm (Reboita *et al.*, 2015, Minuzzi *et*

al., 2007; Siqueira *et al.*, 2007; Viola *et al.*, 2010, Souza *et al.*, 2011; Mello; Viola, 2013; Silva *et al.*, 2014).

Figura 3 - Mapa de relevo (metros) do município de Itajubá. Fonte: SRTMGL3. Os 4 pontos no mapa indicam a localização das estações pluviométricas existentes em fevereiro de 2023 no município.



3.2 Dados

3.2.1. Dados do *Global Forecast System* (GFS) e do *Global Data Assimilation System* (GDAS)

Os dados dos modelos GFS e GDAS possuem diferenças importantes entre eles. O GDAS, que fornece as condições iniciais para o GFS, demanda um maior período de processamento dos dados. Isso ocorre porque o GDAS integra e processa dados observacionais de várias fontes, como satélites e estações meteorológicas, para criar uma base inicial precisa. Em contrapartida, o GFS utiliza essas condições iniciais para gerar previsões rapidamente, sem realizar a assimilação direta de dados observacionais, o que permite a disponibilização rápida das previsões do tempo para atender à demanda de diversos setores.

O modelo WRF operado no CEPreMG-UNIFEI utiliza dados do GFS, assim como as simulações deste estudo. Os dados do GFS podem ser obtidos no *link* <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>. Esses dados possuem resolução espacial de 0,25° e são disponibilizados nos horários sinóticos padrão (0000,

0600, 1200 e 1800 UTC). As previsões são para um horizonte de 72 horas, com rodada iniciada 24 horas antes do horário de referência. Os GFS e o GDAS serão utilizados como dados de fronteira do modelo WRF para verificar qual o impacto das simulações do caso em estudo.

3.2.2. Reanálise ERA5

A reanálise ERA5 é proveniente do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasting* (ECMWF, Hersbach *et al.*, 2020). A ERA5 é disponível com resolução espacial de 0.25° com frequência temporal horária. Entretanto, essa variável não é disponibilizada em tempo real, tendo uma latência de cerca de 5 dias. Um experimento foi realizado considerando a ERA5 como condição de fronteira. As variáveis para isso estão descritas na Tabela 2. A reanálise ERA5 também serviu para validação das simulações. Nesse caso, foram obtidas as variáveis temperatura, vento zonal e meridional, umidade relativa e específica para os níveis de 1000, 850, 500 e 250 hPa para as validações das simulações.

Tabela 2 - Tabela de variáveis da reanálise ERA5 utilizadas como condição de fronteira no modelo WRF.

Variáveis	Níveis de pressão
Temperatura	
Pressão	
Altura Geopotencial	1000 a 10 hPa
Componente Zonal e Meridional do Vento	
Umidade específica	
Pressão a nível do mar	
Temperatura da Superfície do Mar	
Temperatura do solo	
Umidade do solo	Superfície
Cobertura de neve	
Precipitação acumulada	
Altura do terreno	

3.2.3. Precipitação

Os dados de precipitação para validação das simulações provêm das estações meteorológicas do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

(CEMADEN), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, Tabela 3), do produto MERGE/CPTEC e do *Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations* (CHIRPS).

Dados horários de 60 estações pluviométricas/meteorológicas do CEMADEN e do INMET situadas nos estados de MG e SP foram obtidos. O MERGE/CPTEC é um produto de precipitação em pontos de grade que é obtido da combinação de dados do Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG, Huffmann *et al.*, 2015a, b,c) com dados observados (Rozante *et al.*, 2010). O produto MERGE/CPTEC possui resolução espacial de $0,1^\circ$ (~10 km) e frequência de 30 minutos, os dados estão disponíveis em: <http://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/MERGE/GPM>.

O CHIRPS (<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>) corresponde a uma combinação de dados do *Climate Hazards Group Infrared Precipitation* (CHIRP) com observações de estações meteorológicas *in situ*. Atualmente, o produto possui resolução espacial de $0,05^\circ$ (Funk *et al.*, 2015). Além de possuir uma longa série histórica, desde 1981 até os dias de hoje, também possui dados diários (utilizados neste estudo), mensais, anuais e pêntadas. A Tabela 4 mostra de forma resumida as principais informações dos conjuntos de dados utilizados neste trabalho.

Tabela 3 - Localização das estações meteorológicas em que foram obtidos os dados usados no estudo.

Município	Latitude ($^\circ$ S)	Longitude ($^\circ$ O)
Itajubá/MG	22,4269	45,453
Lambari/MG	21,9671	45,3466
Juiz de Fora/MG	21,7642	43,3496
Passos/MG	20,7204	46,6101
Poços de Caldas/MG	21,7883	46,5625
Extrema/MG	22,8546	46,3191
Santa Rita do Sapucaí/MG	22,2499	45,7198
São Lourenço /MG	22,1175	45,0517
Maria da Fé/MG	22,2961	45,3846
Lorena/SP	22,7272	45,1199
Campos do Jordão/SP	22,7386	45,5921
Cachoeira Paulista/SP	22,6737	44,9973
São Bento do Sapucaí/SP	22,6883	45,7363
Atibaia/SP	23,1171	46,5502

Tabela 4 - Resumo das principais informações dos conjuntos de dados utilizados.

Dataset	Resolução Horizontal	Frequência	Link para acesso
GFS	0,25° x 0,25°	Horária	https://www.nco.ncep.noaa.gov/
GDAS	0,25° x 0,25°	Horária	https://www.nco.ncep.noaa.gov/
ERA5	0,25° x 0,25°	Horária	cds.climate.copernicus.eu/
CEMADEN	local	10 minutos	http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/
INMET	local	Horária	https://portal.inmet.gov.br/
MERGE	0,1° x 0,1°	Horária	http://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/MERGE/GPM/
CHIRPS	0,05° x 0,05°	Diária	https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps

3.2.4. Dados de Radar

A Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) disponibilizou os dados do radar localizado na barragem da Ponte Nova, na cabeceira do Rio Tietê com latitude 23,59°S e longitude 45,97°O (em formato HDF5). Este radar possui um raio de atuação de 240 km com frequência temporal de cinco minutos (<http://cge.prefeitura.sp.gov.br/v3/fontes-de-informacao.jsp>). O radar do FCTH utiliza a Banda S, que possui maior potência de transmissão, é ideal para localizar precipitação em Zonas Temperadas. Neste estudo serão apresentados os produtos do *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI), estimativa de precipitação fornecida pelo radar, seção transversal e a classificação da tempestade em convectiva e estratiforme. Itajubá se encontra dentro do raio de atuação do radar do FCTH a cerca de 140 km de distância em linha reta, sendo assim, é possível obter informações importantes do deslocamento, refletividade e também do interior das tempestades que atuam sobre a área.

O CAPPI representa a refletividade das nuvens de tempestade a uma altura constante, neste caso, a 3 km acima do solo. Essa informação é essencial para determinar a intensidade da precipitação associada a cada tempestade. A seção transversal é realizada como um corte na vertical passando pelo interior de uma nuvem. Tem papel fundamental para verificar a estrutura de uma célula de tempestade e a presença de gelo, água e água super resfriada. A classificação das regiões como convectivas e estratiformes é de grande importância. As regiões convectivas indicam áreas de maior instabilidade atmosférica, devido ao significativo desenvolvimento vertical das nuvens, o que está associado a fenômenos meteorológicos severos, como chuvas intensas e tempestades. Além de analisar o interior da nuvem, classificar em convectivas e

estratiformes, os dados de refletividade podem ser aplicados em equações e desta forma serem utilizados como taxa de precipitação.

3.2.5. Dados do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES)

O satélite GOES 16 é um satélite geostacionário que foi lançado em 2016 pelas empresas americanas NOAA e NASA. O satélite possui 16 canais espectrais: 2 canais visíveis, 4 canais infravermelhos próximos e 10 canais infravermelhos. A resolução espacial de cada canal varia entre 500 metros e 2 quilômetros, sua resolução temporal é de 10 minutos (INPE, 2025). Os dados obtidos do GOES-16 pertencem ao canal 13 (infravermelho, 10,3 μm) com resolução de 2 km e estão disponíveis em : <https://noaa-goes16.s3.amazonaws.com/index.html>.

3.3 *Weather Research Forecasting* (WRF)

O WRF (Skamarock, 2019) desenvolvido pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration/National Centre for Environmental Prediction* (NOAA/NCEP) se trata de um modelo numérico utilizado para a realização de previsões e estudos de caso em mesoescala.

O modelo WRF instalado no CEPreMG é a versão 4.4, lançada em agosto de 2022 que tem a opção de 22 parametrizações microfísicas disponíveis em: (https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_references.html#CU). As configurações instaladas no modelo presente no CEPreMG levam em consideração uma grade externa com resolução espacial de 12 km (D-01) e uma grade aninhada com resolução espacial de 3 km (D-02), apresentadas na Figura 2. O modelo realiza previsão para as próximas 72 horas. Entretanto, as previsões das primeiras 12 horas não são disponibilizadas, pois são consideradas período de “*spin-up*” (Skamarock, 2004). Este é um período de ajuste do modelo (Skamarock, 2019, Campos et al., 2023, Araújo et al., 2023, Garcia et al., 2023).

Para que o modelo WRF possa realizar as simulações, são necessárias a inserção de dados de contorno e de fronteira. Estes dados são provenientes do *Global Forecast System* (GFS) que possui resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (~25 km x ~25 km) e resolução temporal de seis horas. Demais configurações podem ser visualizadas na Tabela 5. A Figura 4 apresenta as grades aninhadas do modelo WRF utilizada no CEPreMG. Como o CEPreMG não armazena as previsões por falta de capacidade computacional, foi necessário executar novamente o modelo para o caso de interesse usando as mesmas configurações e versão do modelo acima

descritas. Por padrão, as variáveis como uso do solo, SST e umidade do solo o modelo WRF utiliza dados do satélite Terra e Aqua combinado *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) *Land Cover Type* (MCD12Q1).

Figura 4 - Grades aninhadas do modelo WRF presente no CEPreMG, grade externa D-01 (12 km de espaçamento de grade) e grade interna, aninhada a grade externa, D-02 (3 km de espaçamento). As grades estão centradas na coordenada $45,45^{\circ}\text{O}$ e $22,45^{\circ}\text{S}$ que representa o município de Itajubá.

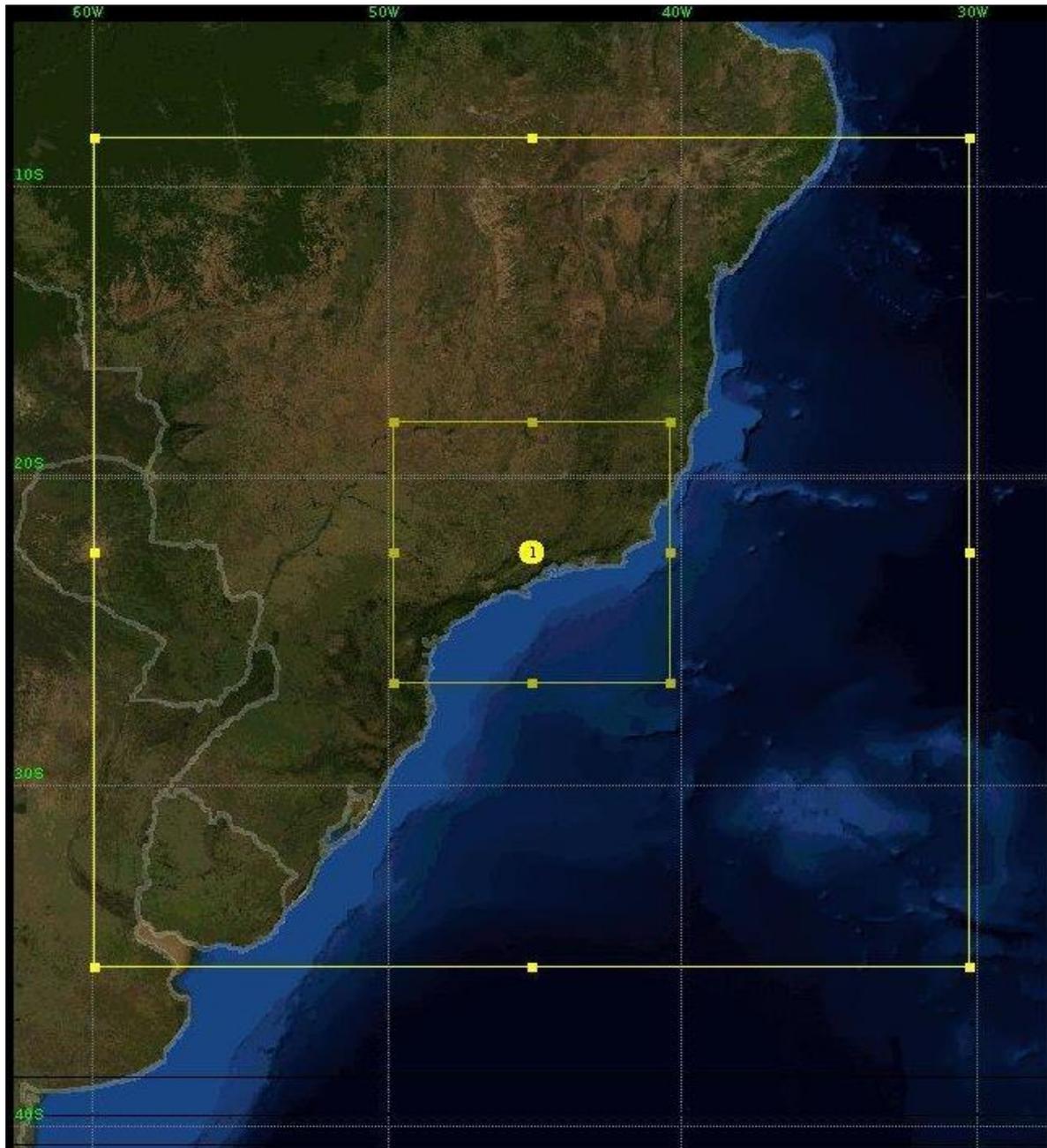


Tabela 5 - Configurações do modelo WRF utilizado nas simulações de previsão do tempo pelo CEPReMG e também nesse estudo, exceto nos experimentos de sensibilidade em que as parametrizações físicas são modificadas.

Parâmetros	Grid D-01	Grid D-02
Pontos na direção X	190	153
Pontos na direção Y	240	181
Pontos na direção Z	42	42
Resolução Horizontal	12 km	3 km
Passo de tempo	60 segundos	15 segundos
Ponto central de latitude	22,4255° S	
Ponto central de longitude	45,4527° W	
Convecção Cumulus	Grell-Freitas (Grell <i>et al.</i> , 2014) Essa opção é desligada quando usada a grade D-2	
Microfísica	WSM3 (Hong <i>et al.</i> , 2004)	
Camada Limite Planetária	Yonsei University Scheme (Hong <i>et al.</i> , 2006)	
Camada de Superfície	Revised-MM5 (Jiménez <i>et al.</i> , 2012)	
Interação solo-atmosfera	Noah-LSM (Tewari <i>et al.</i> , 2004)	
Radiação de onda curta	MM5 (Dudhia, 1989)	
Radiação de onda longa	RRTM (Mlawer <i>et al.</i> , 1997)	

3.4. Experimentos Numéricos de Sensibilidade

Nesse estudo, o experimento controle é aquele com as mesmas configurações do CEPReMG (descritas na seção 3.3). Oito experimentos de sensibilidade foram realizados (Tabela 6) e são descritos na sequência.

Tabela 6 - Tabela com o nome dos experimentos e sua descrição.

Experimento	Descrição
WSM3	Configuração controle do WRF CEPReMG, usando o esquema de microfísica WSM3, condições iniciais e de fronteira do GFS, SST e umidade do solo climatológica.
WSM6	Alteração no parâmetro microfísico, usando o esquema de microfísica WSM6, que é um sistema que conta com seis classes ao invés de três, utilizada pelo CEPReMG.
WDM6	Alteração no parâmetro microfísico, usando o esquema de microfísica WDM6, que leva em consideração a massa e a quantidade de partículas.
GDAS	A condição de inicial e de fronteira é o GDAS
ERA5	A condição de inicial e de fronteira é a ERA5
SST	Alteração da SST climatológica, padrão utilizado no modelo, pela SST semanal. Mesma utilizada pelos dados da ERA5.
SOLO	Alteração da umidade do solo com dados climatológicos, padrão utilizado no modelo, pela umidade do solo semanal. Mesma utilizada pelos dados do GDAS
ERA5_SST	Simulação com os melhores resultados obtidos das simulações anteriores. Neste caso, foram alterados os dados de condições iniciais e de fronteira e os dados de SST de climatológicos para semanais.

3.5. Parametrização de microfísica de nuvens

Três esquemas, descritos na Tabela 7 foram testados. A parametrização microfísica WSM3 é caracterizada por ser um esquema simples em comparação com os outros (WSM6 e WDM6). O WSM3 possui três categorias de partículas sendo elas o vapor d'água, água de nuvem/gelo e chuva/neve. O esquema WSM5 é a evolução do WSM3 e pode efetuar cálculos que contam com a presença de água super-resfriada, além de possuir cinco classes de água (vapor d'água, gotículas de nuvem, gelo de nuvem, neve e chuva) em seu algoritmo. O esquema WSM6 adiciona um parâmetro em comparação com o WSM5. O graupel, ao ser adicionado nos cálculos deste novo esquema, contribui para o melhor detalhamento das fases da água no interior das nuvens. Por último, o WDM6, que além de possuir as mesmas classes utilizadas na

parametrização WSM6 (vapor d'água, gotículas de nuvem, gelo de nuvem, neve, chuva e granizo), a parametrização prevê as concentrações numéricas de gotículas de nuvem e de chuva.

Na Tabela 7 são descritas as características de cada esquema de parametrização microfísica utilizadas neste estudo.

Tabela 7 - Descrição das características das parametrizações microfísicas.

Referências	Parametrizações	Características
Hong <i>et al.</i> , 2004; Dudhia, 1989; Hong; Lim, 2006; Skamarock, 2019	WSM3 (WRF Single-Moment 3- class)	Novas parametrizações da fase de gelo. Possui relação diagnóstica usada para o número de gelo, da qual é baseada o conteúdo de massa de gelo e não na temperatura. Este esquema prevê três categorias com variáveis úmidas: vapor d'água, água de nuvem/gelo e chuva/neve.
Lin <i>et al.</i> , 1983; Hong <i>et al.</i> , 2004; Dudhia <i>et al.</i> , 2008.	WSM6 (WRF Single-Moment 6- class)	Este esquema é uma evolução do WSM5 que contava com cinco classes e agora passa a ter seis classes: vapor d'água, chuva, neve, gelo de nuvem, água de nuvem e graupel. Introdução de um novo método para representar as velocidades de queda de partículas da fase mista para as partículas de neve e graupel, da qual foi atribuída um único valor de queda (velocidade) para ambos. Neste esquema já se leva em consideração água super resfriada, um dos fatores que torna o esquema mais adequado para grade com resolução de nuvens.
Lim; Hong, 2010; Dudhia <i>et al.</i> , 2008.	WDM6 (WRF Double-Moment 6-class)	Este esquema possui processos idênticos de fase de gelo que o WSM6, contudo, o número de nuvens e chuva são calculados como variáveis prognósticas. O esquema leva em consideração o número de núcleos de condensação (CCNs).

3.6. Condições Iniciais e de Fronteira Laterais

No experimento controle, o GFS provê as condições iniciais e de fronteira. Aqui, testes foram conduzidos utilizando dados do GDAS e da reanálise ERA5. O processo de adaptação do modelo para uso das condições iniciais e de fronteira da ERA5 é apresentado no anexo A.

3.7. Condição de Fronteira na Superfície - SST

Os dados de SST climatológicos do MODIS, que acompanham o WRF, foram substituídos por dados de SST semanal da reanálise ERA5. O processo de adaptação do modelo para uso da SST semanal é apresentado no anexo B.

3.8. Condição de Fronteira na Superfície - Umidade do Solo

Na simulação controle é utilizada a umidade do solo padrão do modelo WRF proveniente do MODIS. Outra simulação foi realizada em que os dados climatológicos foram atualizados para semanais obtidas do GDAS. As alterações necessárias no modelo estão descritas no anexo C.

3.9. Simulação Final

Após a identificação da melhor configuração de cada conjunto de experimentos (a-microfísica, b-condição de fronteira, c-SST e d-umidade do solo), uma simulação final foi realizada, integrando os melhores resultados de cada um deles.

3.10. Análises

3.10.1. Caracterização sinótica e de mesoescala da tempestade

É realizada uma descrição do evento ocorrido no dia 27 de fevereiro de 2023, com o objetivo de identificar as características sinóticas e de mesoescala que favoreceram o desenvolvimento da tempestade. Para a análise sinótica é utilizada a reanálise ERA5.

As variáveis são apresentadas em conjunto nos mapas:

- (I) pressão a nível médio do mar (PNMM), jatos em 250 hPa e espessura da camada entre 500 e 1000 hPa. A partir destas variáveis é possível identificar a presença de frentes frias e outros sistemas atmosféricos como a atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS);
- (II) umidade relativa do ar em 850 hPa, velocidade vertical (ω) em 500 hPa e altura geopotencial em 500 hPa;
- (III) divergência do fluxo de umidade integrado na vertical entre os níveis de 1000 e 100 hPa. Isto permite identificar regiões que apresentam divergência e convergência de umidade;

(IV) índices de instabilidade: índice total totals (TT) e índice K (K), utilizados para a identificação de riscos potenciais de tempestades (esses índices são descritos na próxima seção);

(V) cisalhamento vertical do vento horizontal entre 500 e 1000 hPa e *Convective Available Potential Energy* (CAPE), a combinação dessas duas variáveis indicam o potencial para a ocorrência de tempestades.

A aparência da tempestade, uma característica de mesoescala, também é investigada e dada pelo CAPPI, bem como por uma seção transversal da tempestade e a sua classificação em tempestade estratiforme e convectiva. De acordo com Steiner *et al.*, (1995) regiões convectivas e estratiformes são identificadas por meio da intensidade da refletividade. Os picos são chamados de núcleos convectivos e o restante da região que não é classificada como convectiva se torna estratiforme.

3.10.2. Validação dos Experimentos Numéricos - Campos Espaciais

É feita uma comparação espacial dos experimentos na grade 2 para avaliar os resultados da precipitação e dos índices de instabilidade. Os índices analisados são: TT, K e o CAPE, além de variáveis como o cisalhamento vertical do vento entre 500 e 1000 hPa e a advecção horizontal de temperatura. O CAPE já é dado pelo modelo, mas o TT e K foram calculados como mostram as Equações 1 e 2. As variáveis cisalhamento vertical do vento entre 500 e 1000 hPa e a advecção horizontal de temperatura também foram computadas

3.10.2.1. Total Totals

O TT é utilizado para a identificação de áreas com grandes chances de desenvolvimento de tempestades. O cálculo para se obter o índice foi formulado por Miller (1972) e é dado por:

$$TT = T850 + TD850 - 2T500 \quad (1)$$

em que:

T500 é a temperatura do ar no nível de 500 hPa, em graus Celsius;

T850 é a temperatura do ar no nível de 850 hPa, em graus Celsius;

TD850 é a temperatura do ponto de orvalho no nível de 850 hPa, em graus Celsius.

Na Tabela 8 são apresentados os valores para classificação das condições atmosféricas levando em consideração o TT.

Tabela 8 - Índice TT e a situação da atmosfera (Fonte: Miller, 1972).

TT (°C ou K)	Situação favorável a:
< 44	Sem atividades
44 a 49	Tormentas Fracas
50 a 55	Tormentas Moderadas
>55	Tormentas muito fortes

3.10.2.2 Índice K

A taxa vertical de variação de temperatura (*lapse rate*) tem papel fundamental na meteorologia. A partir disso, George (1960) desenvolveu o K, que é utilizado como uma medida do potencial de tempestades baseado no *lapse rate*. Abaixo têm-se a equação desenvolvida por George (1960):

$$K = (T850 - T500) + Td850 - (T700 - Td700) \quad (2)$$

em que:

T700 é a temperatura do ar no nível de 700 hPa, em graus Celsius;

TD700 é a temperatura do ponto de orvalho no nível de 700 hPa, em graus Celsius.

Os demais termos já foram descritos na Equação 1.

Tabela 9 - Índice K, probabilidade de ocorrência de eventos e a situação atmosférica (Fonte: Vasquez, 2017).

K (°C)	Probabilidade de Ocorrência (%)	Ocorrência Atmosférica favorável a:
<15	Próximo de zero	Improvável ocorrência de tempestades
15 a 20	20	Tempestades Isoladas
21 a 25	20 a 40	Tempestades amplamente dispersas
26 a 30	40 a 60	Tempestades dispersas
31 a 35	60 a 80	Tempestades dispersas

3.10.2.3 CAPE

Embora o CAPE seja fornecido pelo WRF é importante apresentar sua definição e os limites para análise.

O potencial para tempestade pode ser analisado usando uma variável dinâmica, o cisalhamento vertical do vento entre 6-0 km (que pode ser aproximado por 500 e 1000 hPa), e uma termodinâmica que é o CAPE (Houze, 1993). CAPE: O CAPE é calculado como:

$$g \int_{NCE}^{NEL} \frac{\theta_v(Z) - \bar{\theta}_v(Z)}{\bar{\theta}_v(Z)} dZ \quad (3)$$

Contudo a variável é disponibilizada nos dados de reanálise ERA5.

O CAPE, ao ultrapassar o valor de 1000 J/kg pode ser indicativo da presença de nuvens convectivas, devido à grande quantidade de energia disponível na atmosfera para a formação de nuvens mais profundas (Dias, 2008). Na Tabela 10, são apresentados os limiares utilizados para a classificação de uma atmosfera instável a partir do CAPE.

Tabela 10 - Valores de CAPE e as possíveis ocorrências atmosféricas. (Fonte: Vasquez, 2017).

CAPE (J/kg)	Situação
0 a 500	Estável, bom tempo, chuvas fracas e isoladas
500 a 1000	Marginalmente instável, chuvas dispersas
1000 a 2500	Moderadamente instável, favorável a tempestades
2500 a 4000	Acentuadamente instável, favorável a tempestades severas generalizadas
> 4000	Extremamente instável, chuvas de granizo

O TT e o K serão comparados com os dados de reanálise da ERA5 e será verificada a classificação, de acordo com as Tabelas 8 e 9,

3.10.2.4 Cisalhamento vertical do vento entre 500 e 1000 hPa

O cisalhamento vertical neste estudo foi calculado como a diferença da intensidade do vento em 500 hPa menos a intensidade em 1000 hPa, que representam as camadas de 6 e 0 km, respectivamente (Johnson; Mapes, 2001; Markowski; Richardson, 2010).

O cisalhamento vertical do vento 500-1000 hPa juntamente com o CAPE são excelentes indicadores para ocorrência de tempestades. Os valores típicos são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Tipos de tempestades em função do CAPE (J/Kg) e cisalhamento vertical do vento horizontal (m/s) entre 500 e 1000 hPa. Fonte: Adaptado de Joe et al. (2012).

CAPE (J/Kg)	Cisalhamento vertical do vento (m/s)		
	< 10,3	10,3 - 23,15	> 20,6
< 1000	Comum	Comum ou multicélulas	Comum ou supercélula
1000 - 2500	Comum com traços severos	Multicélulas	Supercélula
> 2500	Comum com traços severos	Multicélulas	Supercélula

3.10.2.5 Advecção horizontal de temperatura

A advecção horizontal de temperatura do ar consiste em indicar qual a característica da massa de ar que está chegando em uma determinada região, quente ou fria. De acordo com d Holton (1992) é obtida como;

$$ADV = -V \cdot (\vec{\nabla}T) \quad (4)$$

em que:

V é a velocidade horizontal do vento em 1000 hPa;

$\vec{\nabla}T$ é a variação horizontal de temperatura em 1000 hPa.

3.10.3 Validação dos Experimentos Numéricos: Medidas Estatísticas

Serão realizadas comparações estatísticas de cada simulação para com as informações das estações pluviométricas/meteorológicas. As medidas estatísticas são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Estatísticas Aplicadas na Análise: Viés, Coeficiente de Correlação e Índice de Eficiência Kling-Gupta (KGE).

Estatística	Fórmula	Interpretação
VIÉS	$\text{VIÉS} = (\text{previsto} - \text{observado})$	<p>Viés positivo: A previsão superestimou o valor observado.</p> <p>Viés negativo: A previsão subestimou o valor observado</p> <p>Viés zero: A previsão corresponde exatamente à observação.</p>
Correlação	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$	<p>$r = 1$: Correlação linear perfeita positiva (as variáveis aumentam juntas).</p> <p>$r = -1$: Correlação linear perfeita negativa (uma variável aumenta enquanto a outra diminui).</p> <p>$r = 0$: Nenhuma correlação linear (as variáveis não têm relação linear).</p>
KGE	$\text{KGE} = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$	<p>O KGE combina três métricas estatísticas: coeficiente de correlação, taxa de variabilidade e taxa de viés, em uma única medida de modelo de desempenho. O KGE varia entre -infinito e 1, onde um valor de 1 indica concordância perfeita entre as previsões do modelo e os dados observados. Valores positivos indicam que o modelo possui um bom desempenho (Jackson, 2019)</p>

Os resultados foram obtidos em duas etapas. Primeiro, foi calculada a média dos dados das estações dentro de cada cidade. Depois, os dados das simulações foram extraídos para os locais das estações, e uma nova média foi calculada para representar os valores simulados de cada cidade. Concluído os passos anteriores, foi realizada a comparação entre os dados observados e os dados previstos pelos experimentos ao longo do período de simulação, em que foi obtido valores do KGE e da correlação.

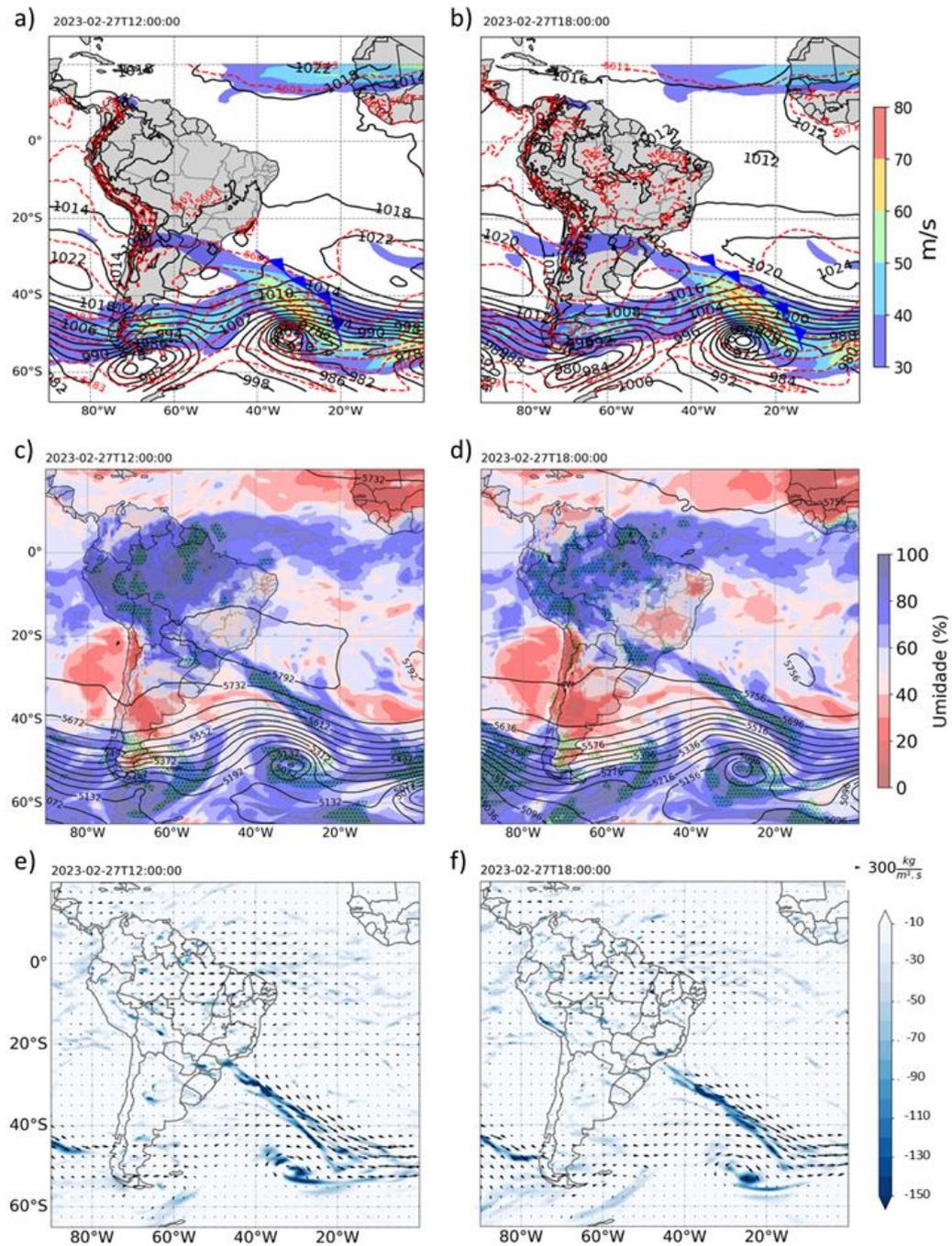
4. RESULTADOS

4.1. Análise Sinótica com a ERA5

A Figura 5 apresenta os campos sinóticos do dia 27 de fevereiro de 2023 às 1200 e 1800 UTC. Há um sistema frontal próximo à região sul do Brasil que se conecta a um centro de baixa pressão sobre o oceano Atlântico, mas bem distante de MG. A principal característica é que o sul de MG se encontra sem atuação de sistema frontal e de jatos em altos níveis (Figura 5a e 5b) e de cavados em médios níveis da atmosfera (Figura 5c e 5d), isto é, sem sistemas dinâmicos causadores de alterações no tempo.

A umidade relativa em 850 hPa no dia do evento era baixa na maior parte de MG, exceto no extremo sul, onde os valores atingiam 80% (Figura 5d). Nessa mesma região, predominava convergência do fluxo de umidade integrado na vertical, mas sem associação com movimentos de grande escala, já que os vetores do fluxo estavam enfraquecidos na região. De acordo com a estação meteorológica da UNIFEI, no dia 27 de fevereiro a temperatura máxima registrada foi de 31,4°C. A alta temperatura associada com a convergência do fluxo de umidade na região pode ter contribuído para a formação de nebulosidade na área de estudo. De fato, a Figura 5b mostra movimento ascendente (ômega negativo) em 500 hPa sobre a região da Serra da Mantiqueira, entre os estados de MG e SP.

Figura 5 - Campos sinóticos do dia 27 de fevereiro de 2023 às 1200 e 1800 UTC. (a-b) PNMM (hPa, linhas contínuas pretas), ventos em 250 hPa com intensidade superior $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (preenchido) e espessura da camada 500-1000 hPa (m, linhas pontilhadas vermelhas), (c - d) umidade relativa do ar em 850 hPa (% , preenchido), altura geopotencial em 500 hPa (m, linhas contínuas pretas), movimento vertical em 500 hPa(Pa/s pontilhado); (e - f) divergência do fluxo de umidade integrado entre 1000 e 100 hPa (kg m s^{-1} , preenchido), vetores do vento (m s^{-1} , vetores pretos).

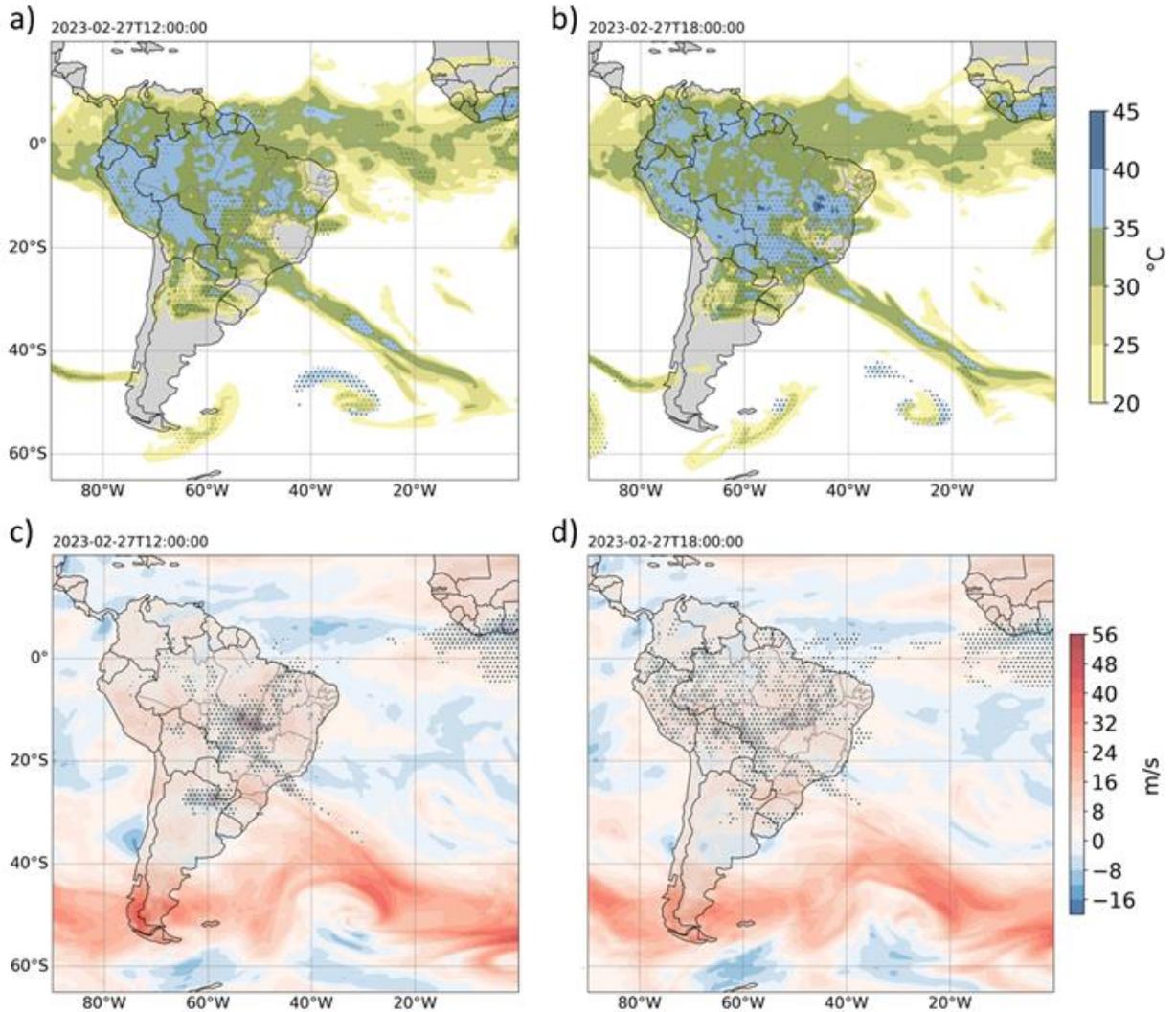


Para uma análise termodinâmica, na Figura 6 são apresentados os índices TT e K, além do cisalhamento vertical do vento entre 500 e 1000 hPa e CAPE. O K possui valores superiores a 30°C que, de acordo com a literatura (Vasquez, 2017), indica chances de tempestade dispersas entre 60 e 80%. No sul de MG, há áreas em que o valor de K supera 35°C, indicando maiores chances de formação de tempestades. A Figura 6a-b também apresenta valores de TT que estão superiores a 44°C, um indicativo de tormentas fracas (Tabela 8).

O cisalhamento vertical do vento e o CAPE superior a 1000 J/kg são mostrados nas Figuras 6c e 6d. A relação entre o cisalhamento vertical do vento entre 1000 e 500 hPa e o CAPE é importante para a manutenção das tempestades. De acordo com Ahrens e Henson (2015), a presença de um forte cisalhamento do vento faz com que as células individuais sejam fortemente integradas entre elas, e elas perdem suas características, para uma tempestade de larga escala e longa duração. Desta forma, a tempestade possui uma melhor organização, capacitando-a a se manter por mais tempo e a ser um sistema mais intenso.

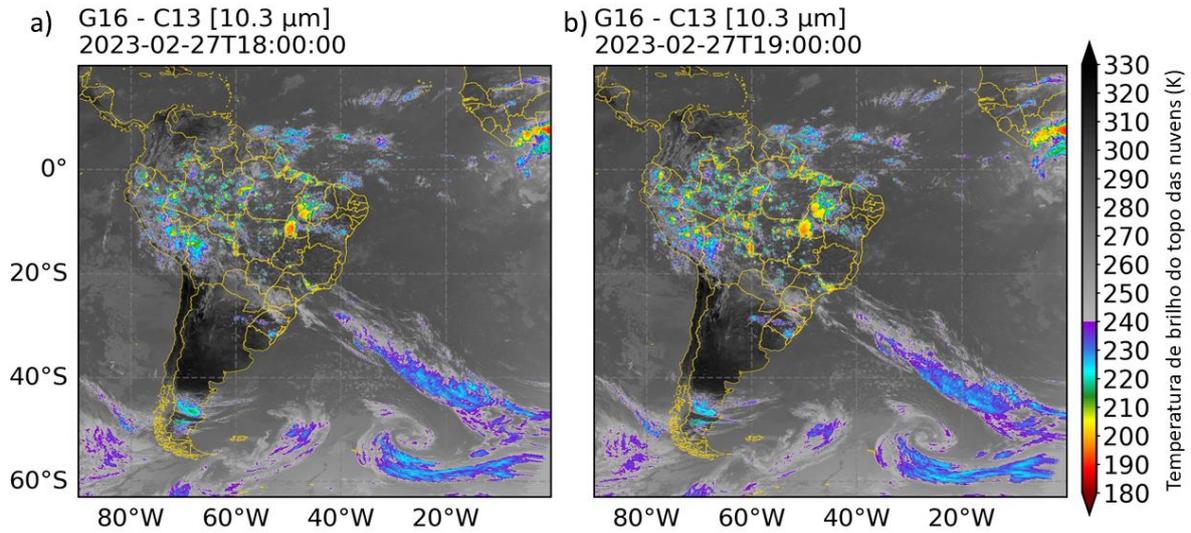
De acordo com Vasquez (2017), valores de CAPE acima de 1000 J/kg é indicativo de uma atmosfera moderadamente instável, e que possuem chances de ocorrência de tempestade. Estes valores podem ser observados na região Norte e Central do Brasil (Amazonas, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul) e áreas do estado de SP, como na Serra da Mantiqueira e próximo à divisa com o Paraná.

Figura 6 - Campos sinóticos do dia 27 às 1200-1800 UTC das variáveis: (a - b) índice Total Totals (°C, pontilhados acima de 45°C), índice K (°C, preenchido); (c - d) Cisalhamento vertical do vento entre 500 e 1000 hPa (m s^{-1} , preenchido), CAPE (J/kg , pontilhado acima de 1000 J/kg)



A Figura 7 mostra a temperatura de brilho obtida do GOES-16. As nuvens com os tops mais frios (200 K) estão concentradas sobre a região continental tropical. Entretanto, na divisa de SP com o sul de MG também há um pequeno aglomerado de nuvens com tops muito frios. A região da frente fria sobre o oceano mostra nuvens com tops menos frios do que a nebulosidade no continente.

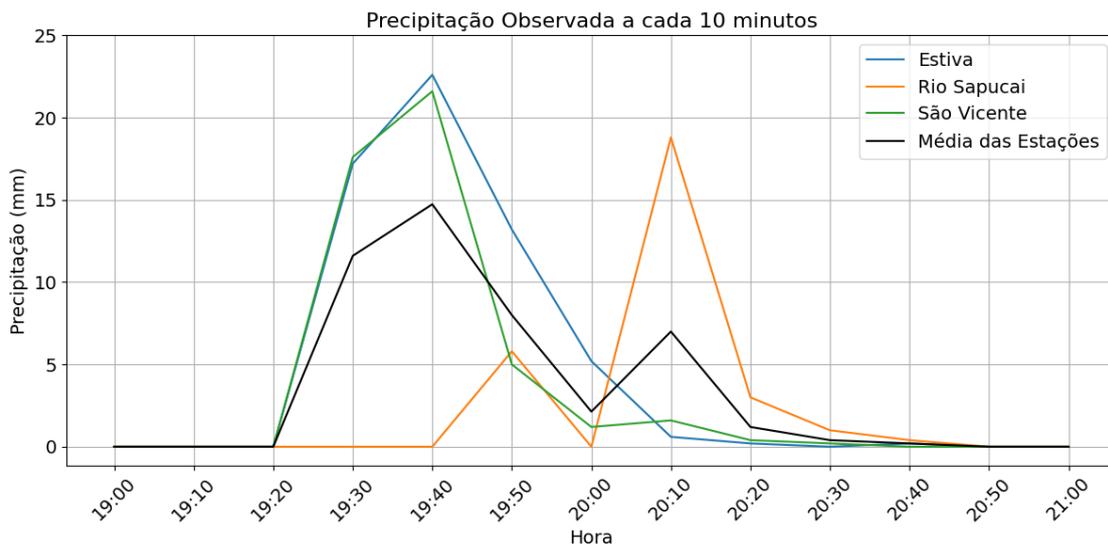
Figura 7 - Temperatura de brilho (K) obtida do GOES-16, canal 13 (10.3 μm), do dia 27 de fevereiro de 2023 às (a) 1800 UTC e (b) 1900 UTC.



4.2. Caracterização da Tempestade através de Radar

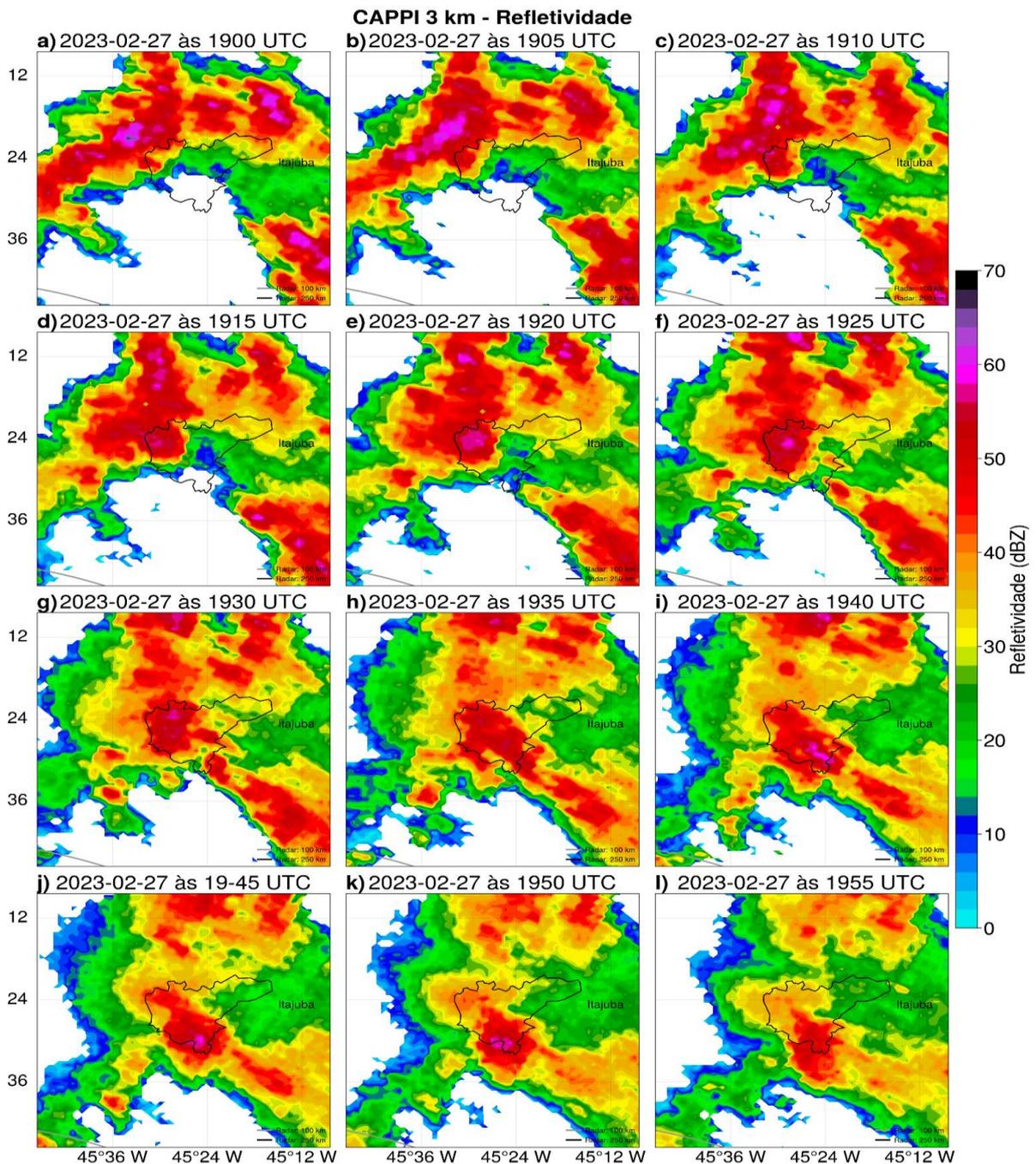
A Figura 9 exibe o CAPPI do evento ocorrido no dia 27 de fevereiro de 2023. A tempestade ocorreu no final da tarde, por volta das 16 horas local, e o seu pouco tempo de duração (50 minutos) foi o suficiente para causar inúmeros estragos. A Figura 8 mostra o gráfico horário de precipitação registrado pelas estações do CEMADEN no município de Itajubá no dia do evento.

Figura 8 - Precipitação (mm) registrada a cada 10 minutos pelas estações pluviométricas do CEMADEN no município de Itajubá: Estiva (azul), Rio Sapucaí (laranja), São Vicente (verde) e a média das estações (preto).



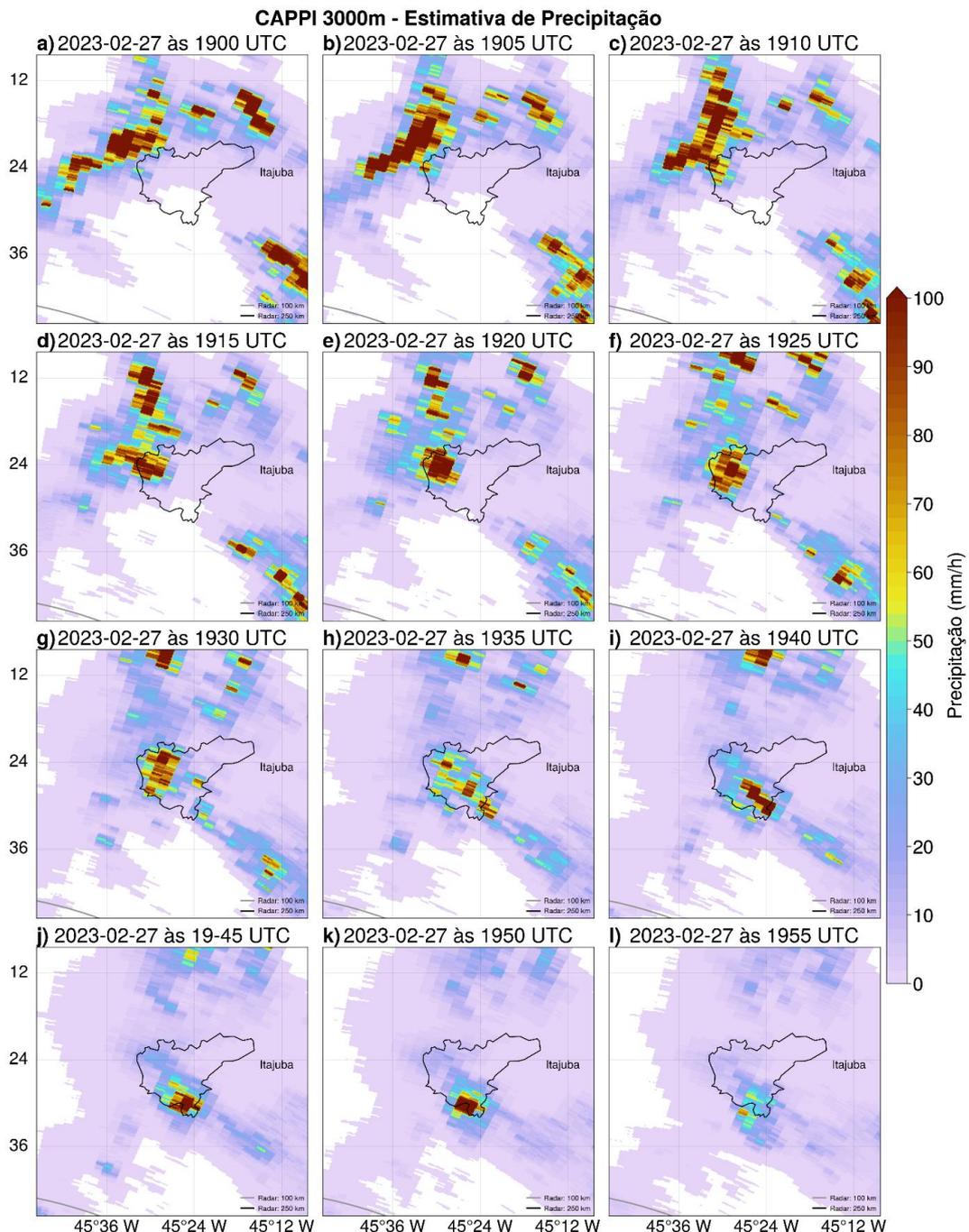
Altos valores de refletividade (maiores que 50 dBZ) foram registrados em grande parte do município de Itajubá durante quase todo o evento, das 1910 UTC até às 1955 UTC. Ao longo de seu deslocamento de oeste para leste, os maiores valores de refletividade, superiores a 55 dBZ, foram registrados em dois momentos: às 1920 UTC (Figura 9e) e às 1940 UTC (Figura 9i). Valores refletividade maiores do que 55 dBZ indicam a ocorrência de chuva forte ou granizo (Rodriguez, 2020).

Figura 9 - CAPPI de refletividade (dBZ) do radar do FCTH na altura de 3 km dos horários das (a) 1900 UTC às (l) 1955 UTC.



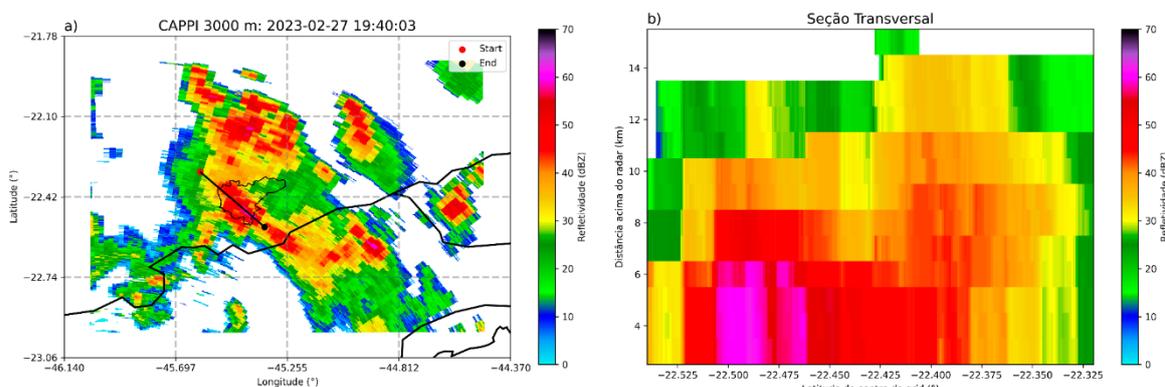
Com os dados de refletividade (Figura 9) pode-se calcular, através da equação Z-R (Marshall; Palmer, 1948), a estimativa da taxa de precipitação em um dado momento. A Figura 9 indicou que os altos valores de refletividade (~ 55 dBZ) sobre o município de Itajubá ocorreram às 1920 UTC e 1940 UTC, o mesmo pôde ser observado na Figura 10 que apresenta a estimativa da taxa de precipitação. Nos horários citados, o volume chegou a superar 80 mm/h, em que é considerada chuva de forte intensidade (> 50 mm/h, Delgado; Santos, 2013).

Figura 10 - Estimativa de precipitação (mm/h) obtidas com a relação Z-R aplicada aos dados do radar do FCTH na altura entre os horários das (a) 1900 UTC às (l) 1955 UTC.



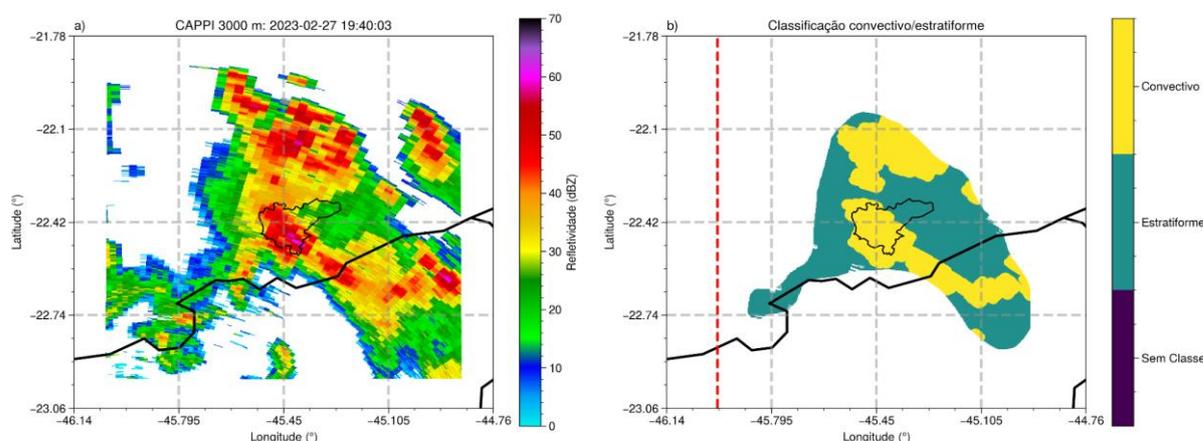
Os radares são fundamentais para o monitoramento de tempestades e para estudos de eventos pontuais. Algumas informações são obtidas ao explorar o interior das nuvens através de corte vertical. Na Figura 11 são apresentados o CAPPI (Figura 11a) e a seção transversal da tempestade (Figura 11b). Observa-se que no interior da tempestade há refletividade superior a 55 dBZ, a alta refletividade indica a presença de granizo, de acordo com Rodriguez (2020). Esta região se encontra sobre a porção central do município de Itajubá; local onde também tinha os pluviômetros que mediram os totais elevados de chuva. Além disso, o topo da nuvem ultrapassou os 14 km de altitude, ou seja, a tempestade teve um grande desenvolvimento vertical e com valores de refletividade variaram entre 30 e 40 dBZ.

Figura 11 - CAPPI de refletividade do radar do FCTH na altura de 3 km. (a) CAPPI às 1940 UTC e (b) seção transversal do CAPPI às 1940 UTC.



As informações de radares também permitem classificar as tempestades em convectiva e estratiforme. A Figura 12 apresenta o resultado obtido desta classificação. A classificação indica que as áreas com valores de refletividade superior a 30 dBZ (Figura 12a) são caracterizadas como convectivas (Bringi e Chandrasekhar, 2001) e que grande parte do município de Itajubá encontra-se sob ela. Em geral, nuvens convectivas que possuem refletividade acima de 30 dBZ (Figura 12a) causam chuvas volumosas em um curto período de tempo e podem ser acompanhadas de queda de granizo. A grande quantidade de precipitação causada por este tipo de nuvem foi mostrada pelos dados das estações meteorológicas em Itajubá e também pela classificação da tempestade na Figura 12b.

Figura 12 - CAPPI de refletividade (dBZ) do radar do FCTH na altura de 3 km. (a) CAPPI às 1940 UTC e (b) classificação convectiva/estratiforme da tempestade (preenchido) para às 1940 UTC.



4.3. Validação das Simulações na Grade de 3 km

Os experimentos descritos na Tabela 6 serão validados. Como um dos objetivos era realizar um experimento com as melhores configurações obtidas, algumas análises foram realizadas previamente e, por facilidade, na apresentação dos resultados, tal simulação é apresentada a partir daqui, já com as demais. Os resultados indicaram que o experimento de microfísica, com a usada no CEPreMG, é o que fornece melhores resultados, bem como a umidade do solo climatológica padrão do modelo WRF. Os dados de condições iniciais e de fronteira e os dados de SST da reanálise do ERA5 obtiveram melhores resultados, contudo devido ao tempo de liberação desses dados aos usuários, sua utilização é indicada apenas para estudos de caso e não de cunho operacional.

4.3.1. Precipitação Acumulada Diária

A Figura 13 apresenta o acumulado de precipitação diária para o dia 27 de fevereiro de 2023 dos dados observados (estações meteorológicas), dados de reanálise (ERA5), dados de estimativa por satélites (CHIRPS e MERGE) e os resultados dos experimentos do modelo WRF para a grade de 3 km.

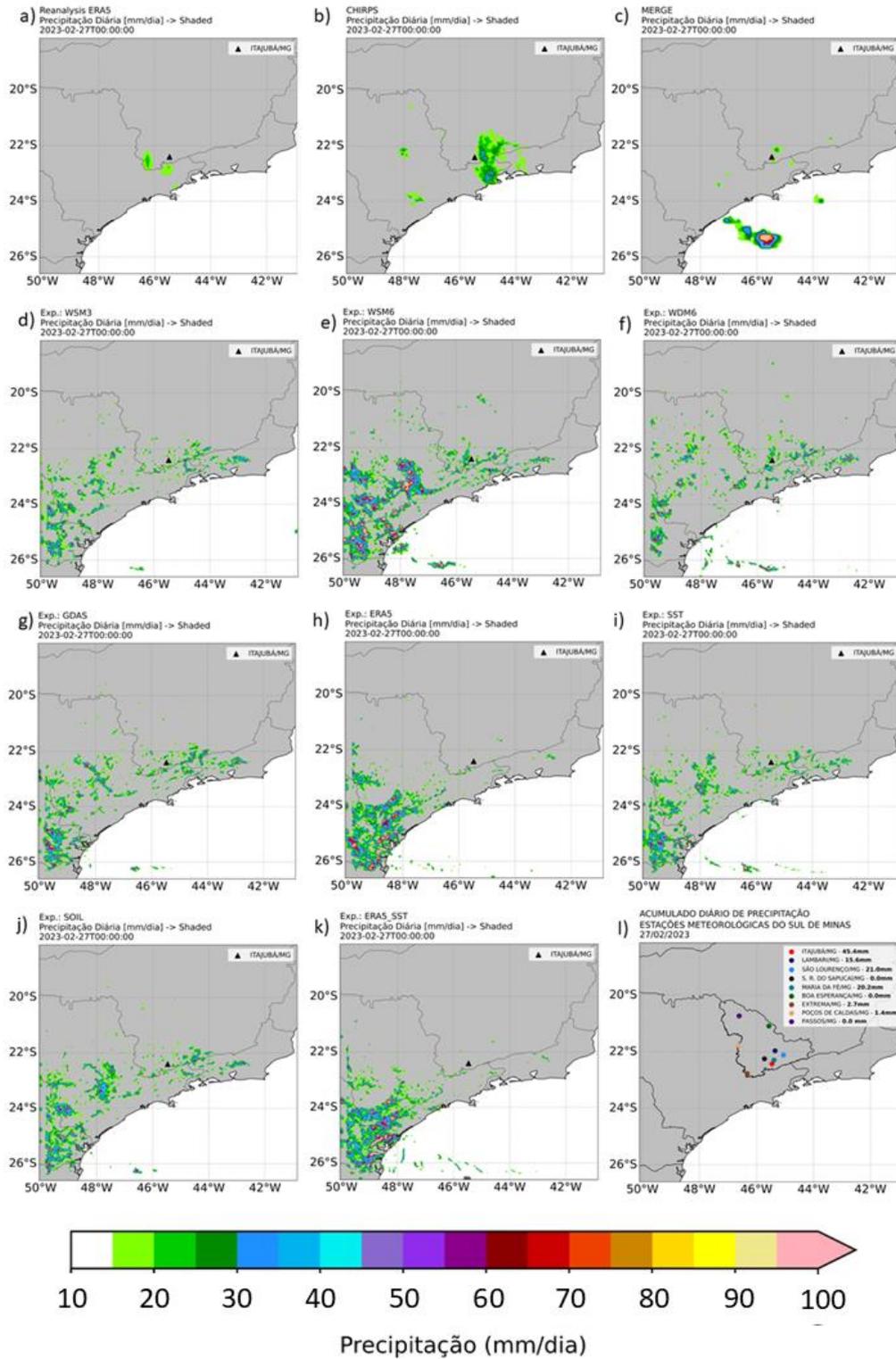
As estações meteorológicas representadas na Figura 13i indicaram que, no dia 27 de fevereiro, a cidade de Itajubá registrou 45,4 mm de precipitação (média das três estações geridas pelo CEMADEN na localidade), estações meteorológicas de outras cidades também registraram precipitação neste mesmo dia, caso como Lambari, Maria da Fé e São Lourenço. Em Santa Rita do Sapucaí, cidade localizada a menos de 40 km (em linha reta na direção noroeste) do município de Itajubá, não foi registrada precipitação.

A reanálise ERA5 (Figura 13a) não capturou a precipitação sobre a região, alguns valores foram obtidos apenas na divisa entre os estados de MG e SP e não ultrapassaram 25 mm; sua resolução espacial grosseira de $0,25^\circ$ pode ter contribuído para a deficiência nos registros de precipitação. Por outro lado, o CHIRPS com maior resolução horizontal ($0,05^\circ$) registrou valores de 40 a 45 mm de precipitação em áreas próximas ao município de Itajubá. Além disso, outras regiões do sul de MG, Vale do Paraíba e uma pequena parte do litoral do Estado de SP, que registraram valores pluviométricos durante o dia 27 de fevereiro, tiveram precipitação indicada pelo CHIRPS.

Embora com boa resolução espacial comparada com a reanálise do ERA5, o produto MERGE (Figura 9c) não representou bem a precipitação nas regiões do sul de MG e do Vale do Paraíba como o CHIRPS. Os maiores volumes de chuva registrados pelo produto estão situados sobre o oceano Atlântico (100 mm) e valores próximos de 30 mm foram observados em uma região isolada no sul de MG, contudo próximo ao município de Itajubá.

A simulação controle não representou bem a precipitação no sul de MG. Os maiores volumes ficaram concentrados sobre o sul do estado de SP e na região de interesse os valores foram abaixo do que foi registrado pelas estações meteorológicas. De acordo com dados do CHIRPS, MERGE e da ERA5, as chuvas ocorreram em regiões próximas à divisa do Estado de SP com MG. Entretanto, nenhum dos experimentos representou bem o padrão espacial, o que pode ser um problema associado com a complexidade da topografia da região.

Figura 13 - Precipitação acumulada diária (mm, preenchido) para o dia 27 de fevereiro de 2023, utilizando diferentes fontes de dados e simulações realizadas: (a) Reanálise ERA5, (b) CHIRPS, (c) MERGE, (d) WSM3 (controle), (e) WSM6, (f) WDM6, (g) GDAS, (h) experimento com dados do ERA5, (i) SST, (j) SOIL, (k) ERA5_SST e (l) estações meteorológicas.



4.3.2. Índices de Instabilidade

Os índices de instabilidade são indicadores das condições atmosféricas propícias à formação de tempestade. Um único índice pode não ser eficiente para capturar as condições atmosféricas, dessa forma mais de um índice deve ser analisado. Nesta seção, serão apresentados os índices de instabilidade simulados no dia 27 de fevereiro de 2023 às 1200 UTC e 1800 UTC.

4.3.2.1. Total Totals e Índice K

As Figuras 14 e 15 mostram o TT e o índice K para os horários das 1200 UTC e 1800 UTC, respectivamente. Valores de TT de 44°C dão indícios da possibilidade de tempestades, enquanto que valores de K a partir de 25°C já indicam atenção. A ERA5 (Figura 14a) indicou que havia possibilidade de tormentas isoladas sobre a região de Itajubá às 1200 UTC, ao serem verificados o K possui valores entre 20 e 25°C, além de contar com a presença de TT, o que promove as chances de ocorrência de eventos extremos para aquela área.

Na Figura 14 foi observado a presença de um padrão entre os experimentos (Figura 14b a 14f). O índice K é superior a 35°C na faixa que se estende desde o triângulo mineiro, sul de MG, indicando que poderiam ocorrer tormentas na área. O TT se encontra acima de 45°C indicando a possibilidade de tempestades moderadas a muito fortes (Dias, 2008). Ao delimitar a análise para o sul de Minas, o índice K é apresentado, em grande parte da área, com valores que variam entre 35 e 40°C que, de acordo com Henry (1987) e Nascimento (2005), tem alto potencial para ocorrência de tempestade, o que mostra uma atmosfera extremamente instável capaz de desenvolver inúmeras nuvens convectivas na região.

À medida que a temperatura subia no decorrer da tarde do dia 27 de fevereiro, a ERA5 (Figura 15a) começava a indicar a possibilidade de tormentas isoladas sobre a região de Itajubá. Os valores do K estavam entre 30 e 35°C e, próximo à região de interesse, também eram encontrados valores de TT superiores a 45°C, indicativo de tormentas fracas (Tabela 8).

Ao analisar os resultados encontrados pelos experimentos, regiões no entorno de Itajubá possuem K superior a 40°C e este padrão se mantém para todas as simulações (Figura 15b a 15f), indicativo de possibilidade de ocorrência de tempestades dispersas. O mesmo pode-se dizer quanto aos resultados obtidos de TT, que em toda a área em que o índice K é superior a 35°C o TT se encontra superior a 45°C.

Figura 14 - Índice Total Totals (°C, pontilhados), índice K (°C, preenchido) dia 27 às 1200 UTC. Em que: (a) dados da ERA5, (b) WSM3, (c) WSM6, (d) WDM6, (e) GDAS, (f) experimento com dados do ERA5, (g) SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST.

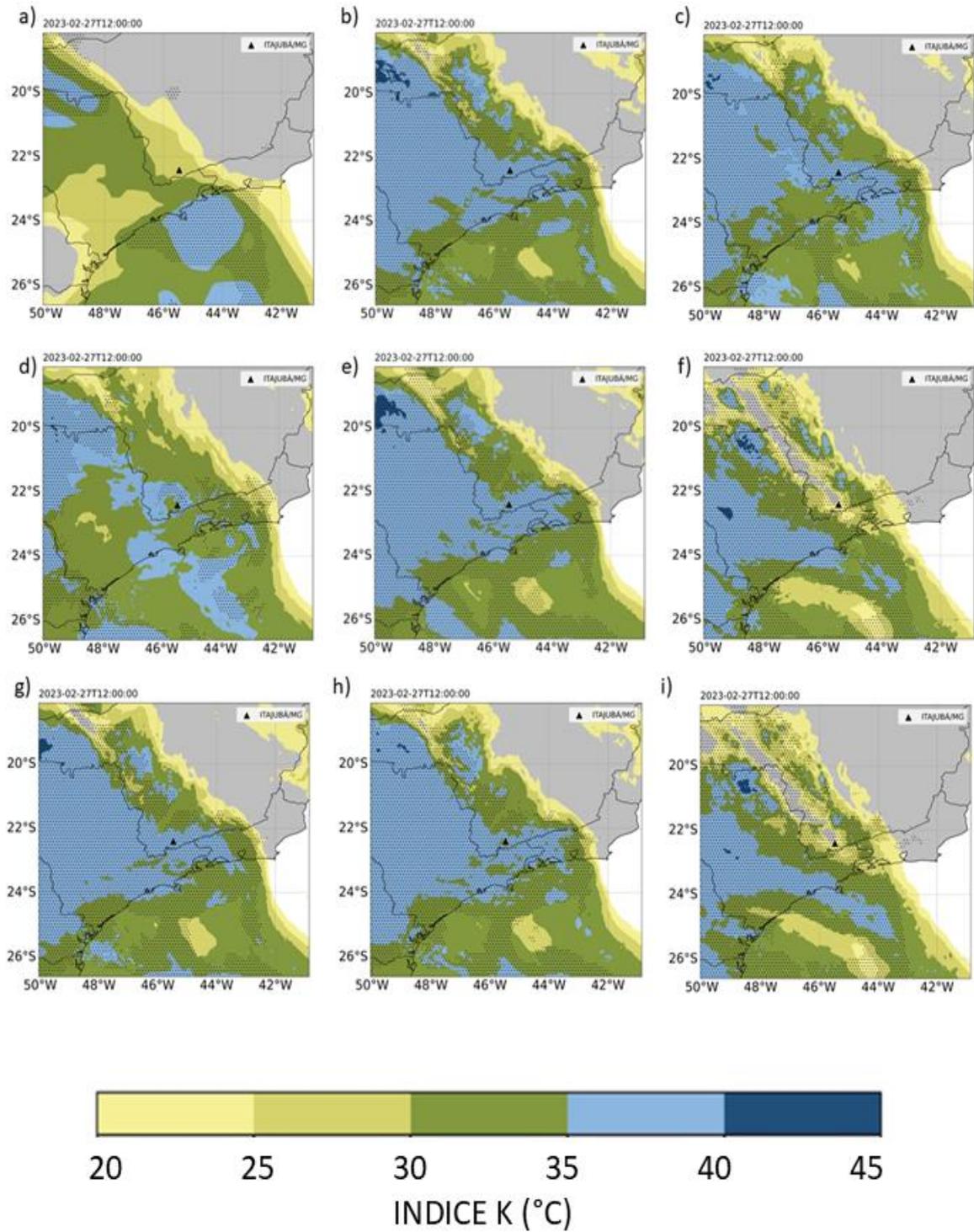
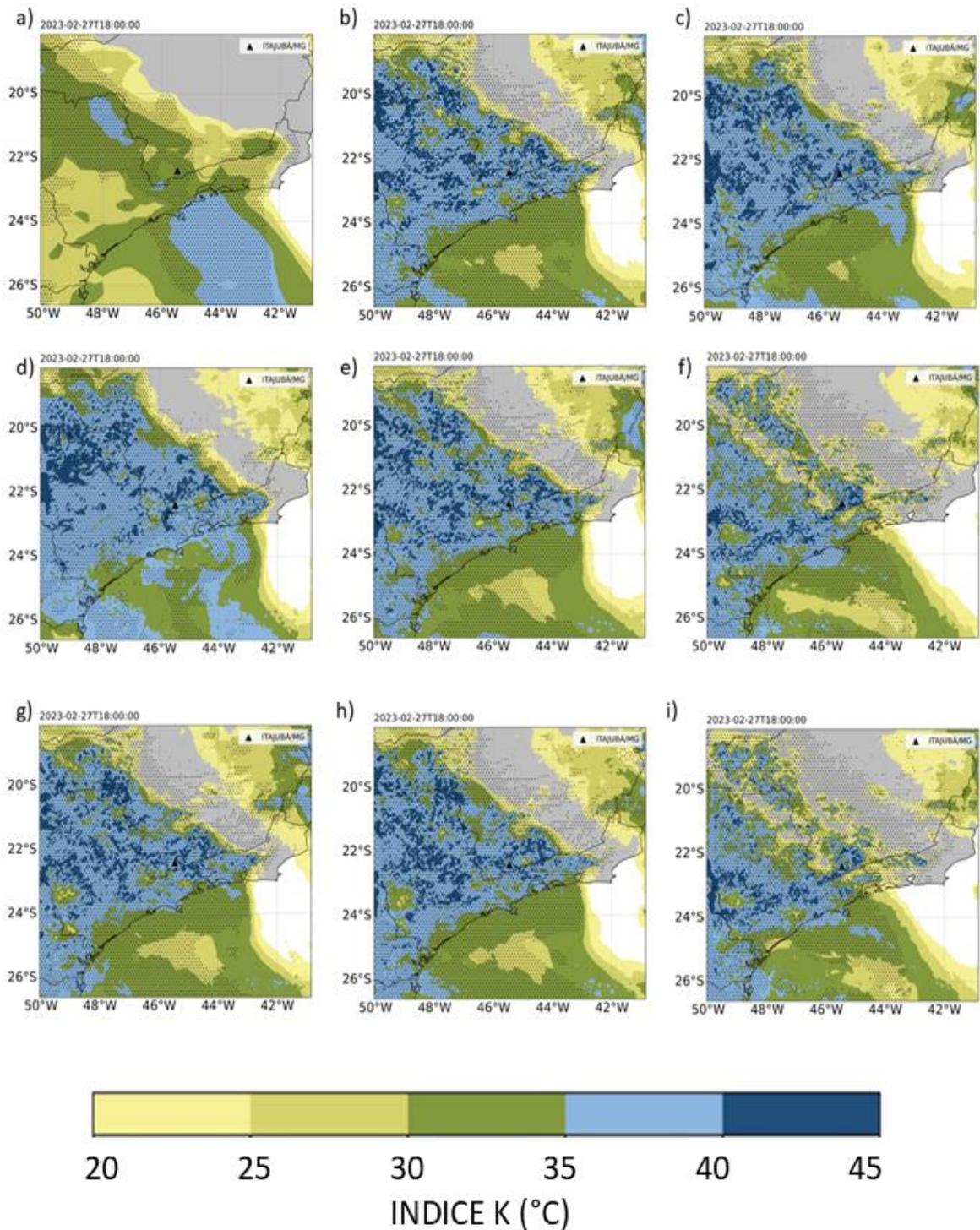


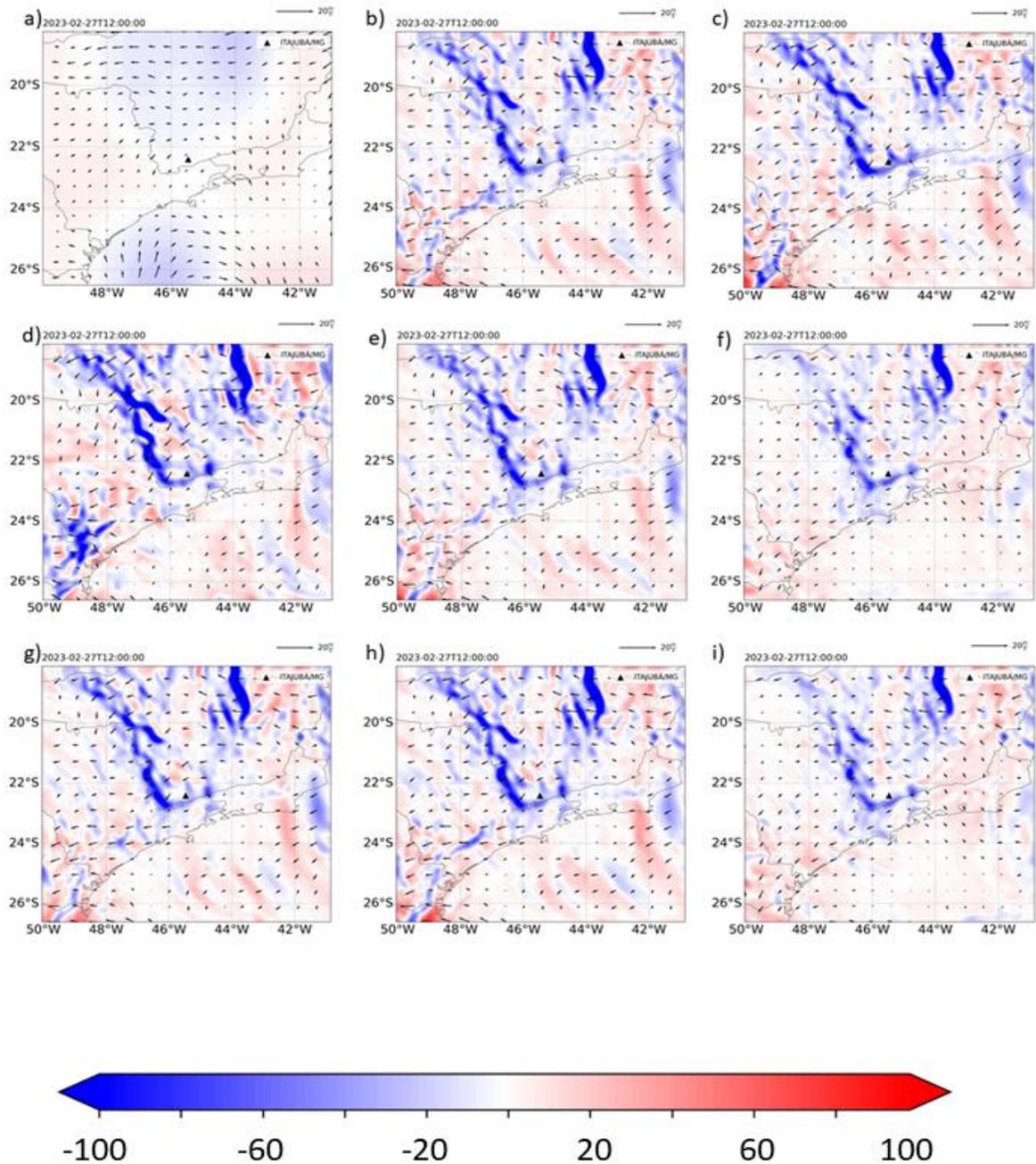
Figura 15 - Índice Total Totals (°C, pontilhados), índice K (°C, preenchido) dia 27 às 1800 UTC. Em que: (a) dados de reanálise do ERA5, (b) WSM3, (c) WSM6, (d) WDM6, (e) GDAS, (f) experimento com dados da ERA5, (g) SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST.



A advecção horizontal de temperatura é uma variável que indica se ar quente ou frio está chegando no local de interesse. O padrão espacial da ERA5 foi reproduzido nas simulações, que mostram várias áreas com advecção negativa, especialmente no interior do estado de MG. Próximo à Serra da Mantiqueira, predominou a advecção de ar frio, mas intercalada com áreas de advecção positiva.

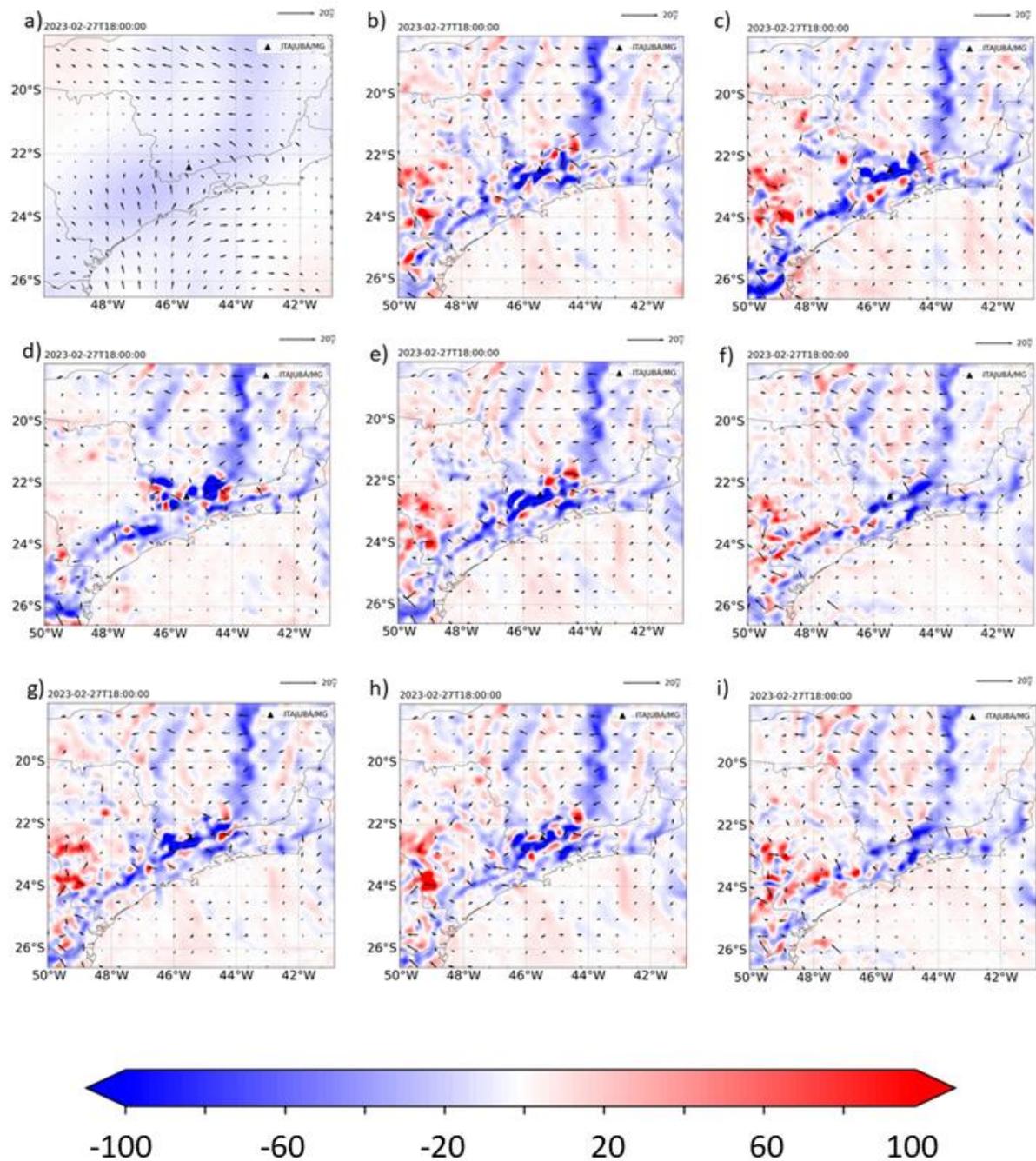
Todos os experimentos de sensibilidade realizados para as 1200 UTC (Figura 16b-f) indicaram advecção horizontal de temperatura negativa próximo à região de Itajubá, o que seria desfavorável à instabilidade térmica local, dificultando o desenvolvimento de nuvens de tempestade. Os experimentos seguiram um padrão similar, ao determinar áreas com advecção negativa sobre o interior, a partir de uma extensa faixa de advecção fria desde o sul de MG ao Triângulo Mineiro, além de variações na região central do Estado.

Figura 16 - Advecção horizontal temperatura do ar (preenchido), direção e intensidade do Vento em 850 hPa (m/s, vetores) dia 27 às 1800 UTC. Em que: (a) dados de reanálise ERA5, (b)WSM3, (c)WSM6, (d) WDM6, (e) GDAS, (f)experimento com dados do ERA5, (g)SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST.



Ao aproximar do horário do evento (Figura 17), notam-se mudanças na advecção horizontal de temperatura dos experimentos. O transporte de ar quente em algumas localidades de São Paulo e do sul de Minas ficaram mais intensos favorecendo a formação de convecção nessas regiões.

Figura 17 - Advecção horizontal temperatura do ar (preenchido), direção e intensidade do Vento em 850 hPa (m/s, vetores) dia 27 às 1800 UTC. Em que: (a) dados de reanálise ERA5, (b)WSM3, (c)WSM6, (d) WDM6, (e) GDAS, (f)experimento com dados do ERA5, (g)SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST.



Na Figura 18 e 19 são apresentados o CAPE e cisalhamento vertical do vento entre 500 e 1000 hPa para os horários sinóticos das 1200 UTC (Figura 18) e 1800 UTC (Figura 19).

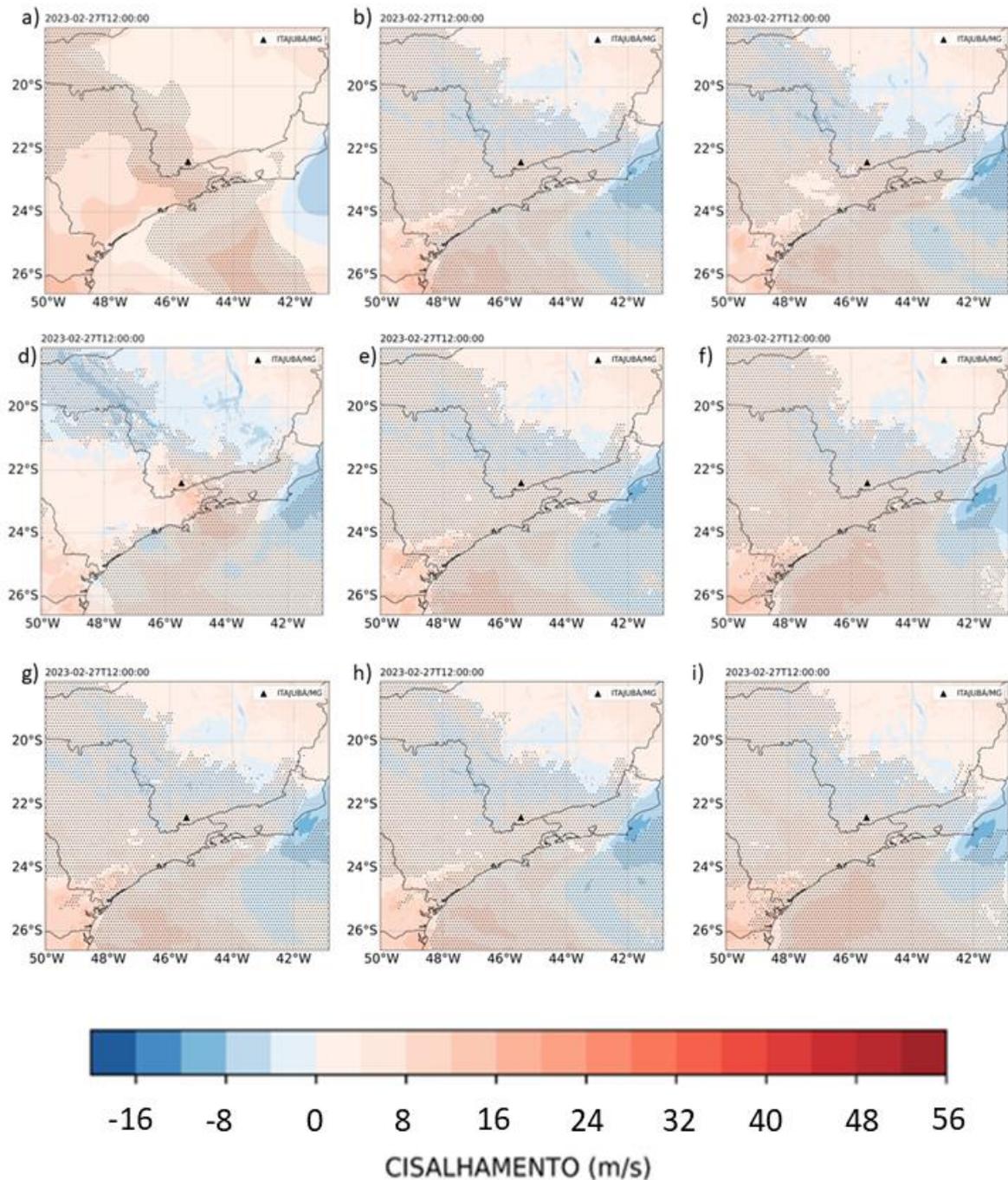
De acordo com Vasquez (2017), altos valores de cisalhamento do vento indicam maior possibilidade de tempestades severas. A ERA5 (Figura 18a) mostra que sobre a região do sul

de MG, o cisalhamento vertical do vento encontra-se com valores entre 0 e 8 m/s, já na região central do Estado mineiro o cisalhamento negativo predomina.

A maior resolução espacial do modelo WRF, traz maior detalhamento do cisalhamento do vento (Figura 18b a 18f), percebe-se que regiões antes eram dominadas pelo cisalhamento de vento positivo (Figura 18a), nas simulações possuem valores negativos em algumas regiões do mapa. Em geral, o modelo não representa espacialmente o padrão mostrado pela ERA5 (Figura 18a). Todas as simulações apresentaram o mesmo padrão entre si: áreas do Sul e centro de MG com cisalhamento do vento negativo e a leste do Espírito Santo; desfavoráveis a tempestades.

O CAPE tem valores acima de 500 J/kg nas regiões entre Triângulo Mineiro e o Atlântico (Figura 18a). Os experimentos (Figura 18b e 18f) indicaram que, praticamente, toda a região do sul de MG apresentou CAPE maior do que 500 J/kg o que indica uma atmosfera marginalmente instável com chuvas dispersas (Vasquez, 2017). Esse valor de CAPE associado com valores de cisalhamento vertical de vento abaixo de 10,3 m/s podem indicar a ocorrência de tempestades comuns (Joe *et al.*, 2012).

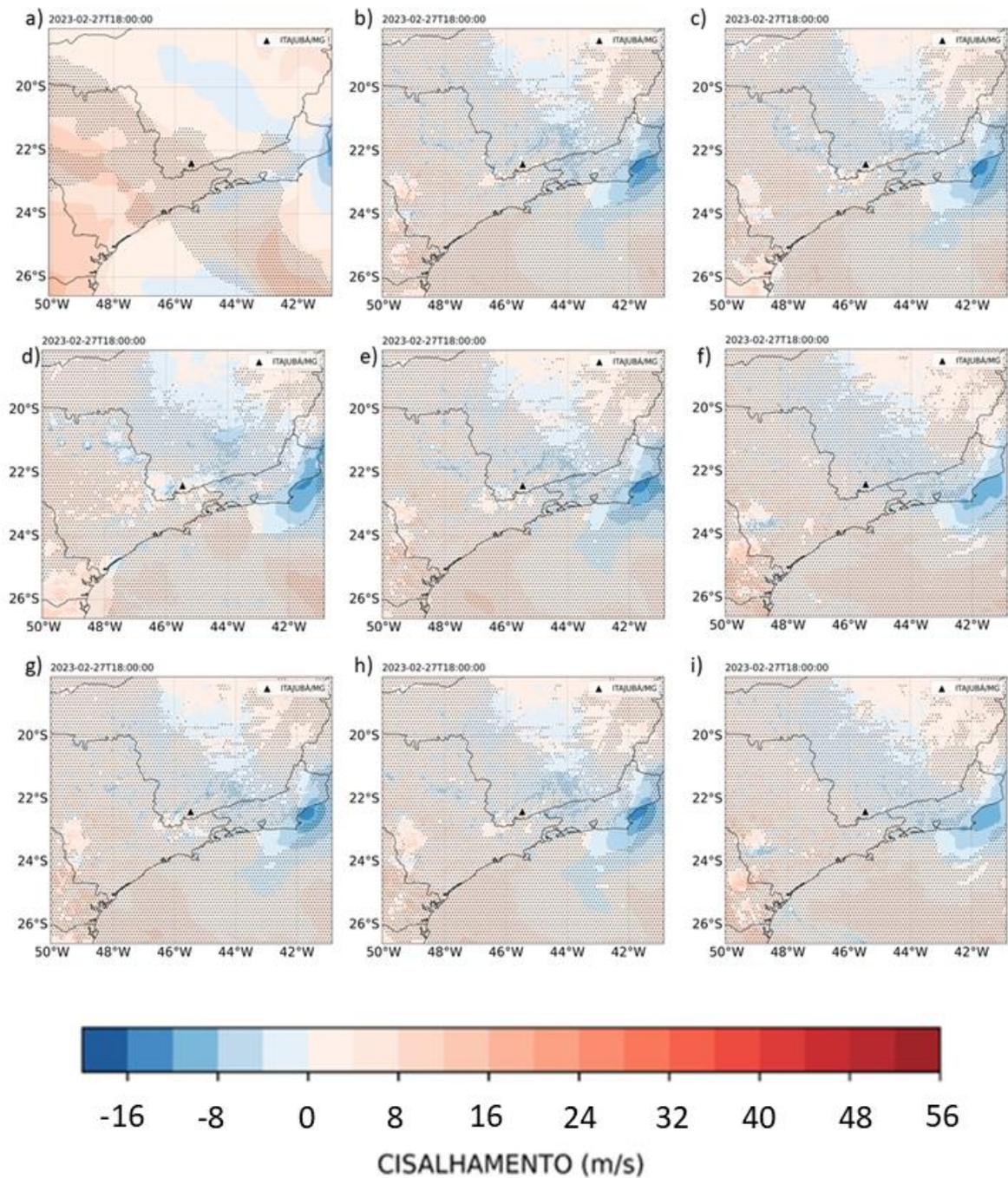
Figura 18 - CAPE superior a 500 J/kg (J/kg, pontilhados), Cisalhamento Vertical do Vento (m/s, preenchido) dia 27 às 1200 UTC. Em que: (a) dados de reanálise do ERA5, (b)WSM3, (c)WSM6, (d)WDM6, (e)GDAS, (f)experimento com dados do ERA5, (g)SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST.



Às 1800 UTC (Figura 19) os valores de cisalhamento do vento entre 500 e 1000 hPa, não sofreram grandes mudanças em relação às 1200 UTC, nas cercanias do município de Itajubá, de acordo com a ERA5 (Figura 19a), ficando com valores positivos (ventos em 500 hPa mais intensos do que em 1000 hPa). Por outro lado, os experimentos mostram valores negativos próximos a região de estudo, esses resultados mostram ventos mais fortes em

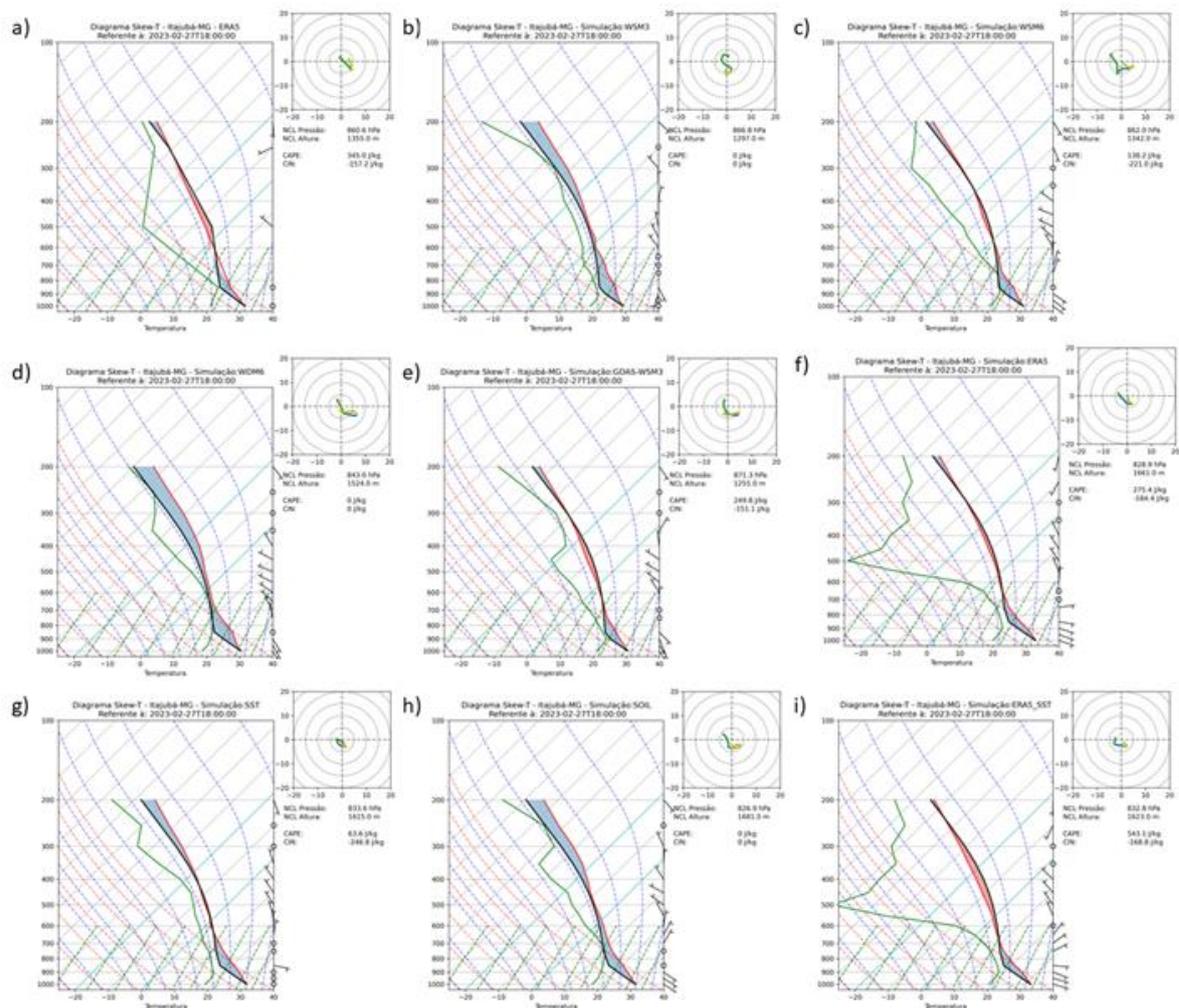
superfície em comparação com o nível de 500 hPa. Resultados negativos de cisalhamento do vento podem indicar que a tempestade ocorrida foi de característica unicelular/comum de acordo com Joe *et al.*, (2012).

Figura 19 - CAPE superior a 500 J/kg (J/kg, pontilhados), Cisalhamento Vertical do Vento (m/s, preenchido) dia 27 às 1800 UTC. Em que: (a) dados de reanálise do ERA5, (b)WSM3, (c)WSM6, (d)WDM6, (e)GDAS, (f)experimento com dados do ERA5, (g)SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST.



Na Figura 20 o CAPE foi mostrado espacialmente, mas outra forma de representá-lo é através de diagramas Skew T-Log P. Na Figura 22 são mostrados os diagramas obtidos com a ERA5 e com os experimentos para o horário das 1800 UTC. Primeiramente, comparando-se o perfil de temperatura do ar ambiente e a temperatura de ponto de orvalho, os experimentos WSM3, WSM6, WDM6, GDAS, SST e SOIL mostram uma atmosfera mais úmida, já nos experimentos ERA5 e ERA5_SST aparece um maior distanciamento das linhas de T e TD, indicando condições mais secas. Por outro lado, uma atmosfera em níveis médios mais secas ajuda a potencializar as tempestades (Hane,1986). Entretanto, não há CAPE com valores elevados nessas sondagens.

Figura 20 - Diagrama SkewT - LogP para o dia 27 de fevereiro de 2023 às 1800 UTC (a) dados de reanálise do ERA5, (b)WSM3, (c)WSM6, (d)WDM6, (e)GDAS, (f)experimento com dados do ERA5, (g)SST, (h) SOIL, (i) ERA5_SST. A linha verde indica temperatura do ponto de orvalho, a linha preta indica a temperatura da parcela e a linha vermelha indica a temperatura do ar ambiente.



A Tabela 13 mostra os resultados dos índices de instabilidade e outras variáveis como cisalhamento do vento entre 500 e 1000 hPa, fluxo de umidade integrado na vertical e advecção horizontal de temperatura do ar em 850 hPa no município de Itajubá no dia 27 de fevereiro de 2023 às 1800 UTC.

Observou-se que os dados da ERA5 indicaram um valor de CAPE de 1023,2 J/kg, indicativo de uma atmosfera moderadamente instável (Vasquez,2017). A simulação que mais se aproximou deste resultado foi obtida da alteração dos dados de entrada da SST, em que o CAPE previsto foi de 1033,1 J/kg. Além disso, foi gerado o CAPE pelo meio da sondagem, com o qual os resultados se divergiram das saídas do modelo. O CAPE gerado pela sondagem com os dados da ERA5 foi de apenas 345 J/kg. A sondagem mais próxima desse resultado foi obtida no experimento que utilizou condições iniciais ajustadas com os dados de reanálise da ERA5. O experimento ERA5_SST foi o único a apresentar um valor de CAPE superior.

Os valores índices de instabilidade K e TT foram superestimados em todas as simulações para o município de Itajubá ao serem comparadas com os dados de reanálise da ERA5. De acordo com a Tabela 9, o K gerado pela reanálise é classificado como tempestades dispersas e apenas uma simulação se enquadra nesta classificação, o experimento WSM3. Por outro lado, o TT foi classificado como tormentas fracas e o experimento WSM6 foi a única simulação que o classificou como tormentas moderadas, enquanto que as outras classificaram corretamente o índice.

No dia do evento o cisalhamento vertical do vento encontrava-se abaixo de 10,3 m/s, o que foi encontrado em todas as simulações realizadas. Desta maneira, a classificação de acordo com Joe et al., (2012) seria de uma tempestade ordinária. Em relação aos valores encontrados, a simulação com que utilizou a parametrização microfísica WDM6 (2,23 m/s) ficou mais próxima ao encontrado pelos dados de reanálise da ERA5 (4,82 m/s), enquanto que os outros experimentos os valores foram inferiores a 2 m/s.

O fluxo de umidade integrado na vertical havia convergência de umidade sobre a região, de acordo com a reanálise da ERA5, das oito simulações realizadas apenas três indicaram fluxo de umidade negativo (GDAS, ERA5 e SOIL), ou seja, previram a convergência de umidade para aquela área. As outras simulações obtiveram valores positivos desta variável inclusive o experimento com as configurações controle.

Por fim, a advecção horizontal de temperatura, que revela se o ar que está chegando em uma determinada região é mais frio ou mais quente. Os dados da reanálise indicam que estava

chegando ar mais frio sobre o município de Itajubá no dia em questão, o que dificulta a formação de nuvens de precipitação. Apenas a simulação controle e a simulação com alteração na SST obtiveram resultados positivos que previa o transporte de ar quente.

Tabela 13 - Tabela contendo os valores registrados em Itajubá para cada experimento realizado: WSM3, WSM6, WDM6, GDAS, ERA5, SST, SOIL, ERA5_SST.

REANÁLISE ERA 5								
		1023,2	345	4,82	32,9	45,2	-114,1	-3,695
EXPERIMENTOS		CAPE MAPA	CAPE SONDAGENS	CISALHAMENTO	K	TT	FLUXO DE UMIDADE	ADVECÇÃO (*10 ⁻⁴)
MICROFÍSICA	WSM3	537	0	0,64	33,8	46,8	700,7	6,778
	WSM6	1397,4	138,2	0,2	39,9	49,2	109	-2,984
	WDM6	254,5	0	2,23	40,2	47,7	475,4	-6,704
FRONTEIRA	GDAS	1630,5	281	1,66	35,6	47,3	-263,2	-2,578
	ERA5	1554	275,4	0,64	36,5	47,3	-15,9	-3,943
	SST	1033,1	63,6	0,57	36,4	47,8	253,15	3,178
	SOIL	439,2	0	-0,02	39,1	48,1	-39,92	-0,4316
	ERA5_SST	1994,5	543,1	0,68	37,5	48,3	155,4	2,867

4.3.3. Análise Estatística

4.3.3.1. Precipitação

Para que os gráficos de precipitação horária e do BIAS (Figura 18) pudessem ser gerados, foi realizada a média horária de todas as estações descritas na Tabela 3, com isso, foram obtidos séries temporais para cada simulação. O mesmo método foi utilizado com os dados de reanálise da ERA5.

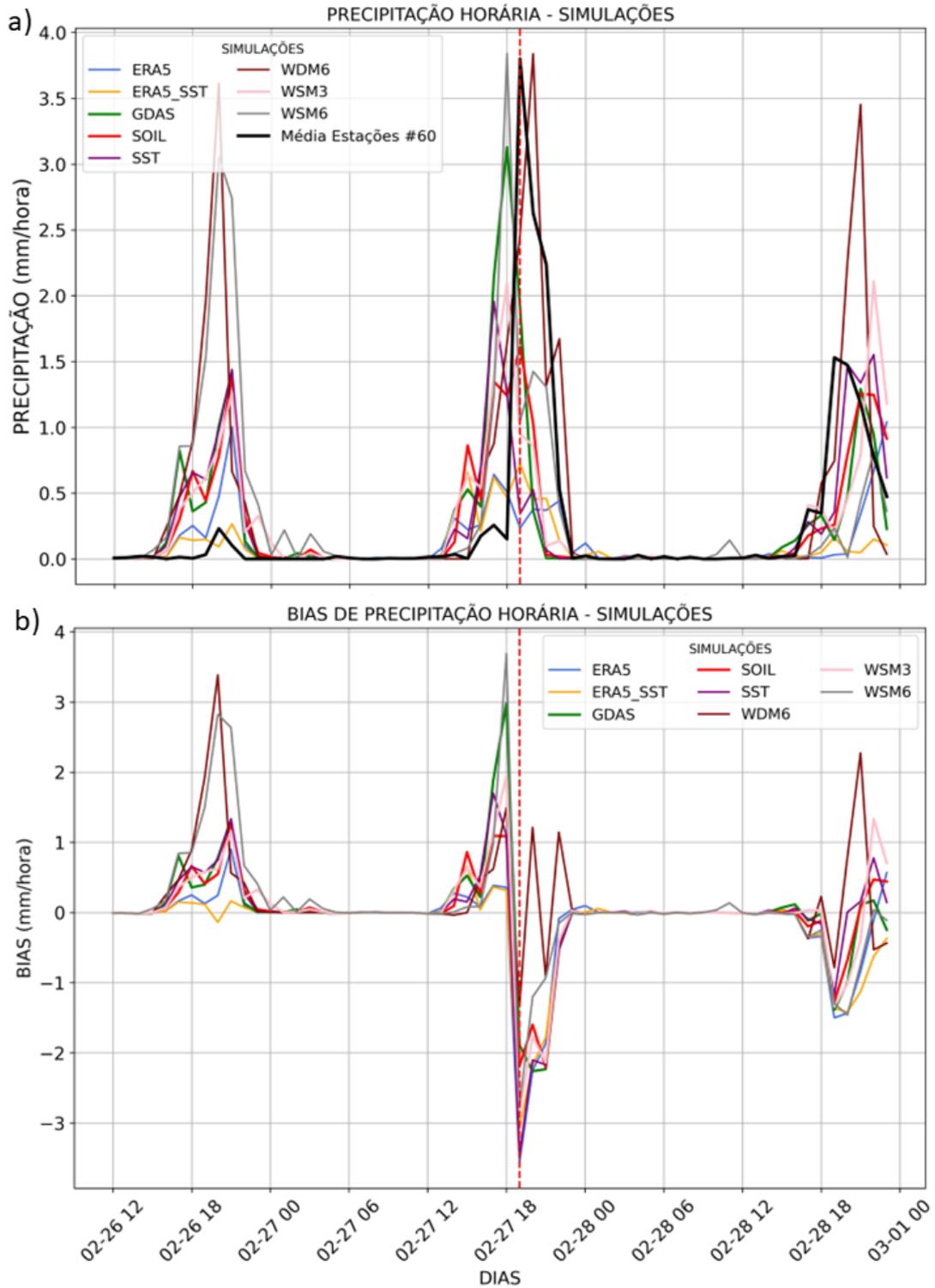
Ao verificar todo o período de experimento, por volta das 2000 UTC do dia 26 de fevereiro, há baixos volumes de precipitação registrados pela média das estações (linha preta), com pico de intensidade sendo inferior a 0,5 mm. Por sua vez, dos oito experimentos do modelo

WRF, dois previram corretamente o horário (WSM6 e WDM6), contudo, superestimaram o volume daquele horário.

No dia do evento, 27 de fevereiro de 2023 por volta das 1900 UTC, foi observado que o pico da maior taxa de precipitação ultrapassou a 3,5 mm, porém todas as simulações, subestimaram a chuva deste horário. Ao analisar o volume, dois experimentos registraram o pico máximo de precipitação próximo aos valores observados pelas médias das estações no dia do evento: WSM6 (antecedeu o pico em uma hora) e WDM6 (atrasou o pico em uma hora). Outras simulações também apresentaram picos, contudo, não foram próximos ao registrado pelas médias das estações meteorológicas.

Houve precipitação observada também no dia 28 de fevereiro de 2023 às 1900 UTC com valor máximo de 1,6 mm e, ao comparar com as simulações, elas não representaram temporalmente de forma correta.

Figura 21 - (a) Precipitação horária(mm/hora) utilizando a grade de 3 km e (b) gráfico horário de BIAS para grade de 3 km. Têm-se as simulações: WSM3 (vermelho), WSM6 (verde), WDM6 (azul) e a média dos dados das estações (preto).



Para que seja possível a formação de nuvens de tempestades, principalmente das cumulonimbus, são necessárias diversas combinações envolvendo os índices de instabilidade.

Devido a isso, a verificação de como essas variáveis foram simuladas no município de Itajubá tem grande importância. Desta forma, a Figura 19 apresenta o BIAS de três índices de instabilidade: CAPE, índice K, TT, além do cisalhamento do vento entre 500 e 1000 hPa. Para extrair os dados foi realizada a média em uma área a partir do ponto central da cidade e após a extração os dados foram comparados com dados provenientes da ERA5.

Na Figura 19a, são apresentadas as informações horárias do CAPE. A partir das 12 UTC do dia 27 de fevereiro todas as simulações apresentaram oscilações, em que determinados horários estavam superestimando e outros subestimando a reanálise e isto se mantém até pouco antes das 0600 UTC do dia seguinte. Uma hora antes do horário do evento, a simulação que utilizou os dados de entrada da ERA5 e os dados de SST horários (ERA5_SST) obteve viés próximo de 1000 J/kg que já poderia ter classificação de prováveis tempestades, de acordo com Vasques (2017). Os demais experimentos tiveram um viés menor em relação a reanálise os resultados ficaram entre -00 J/kg (WSM6) e 500 J/kg (ERA5).

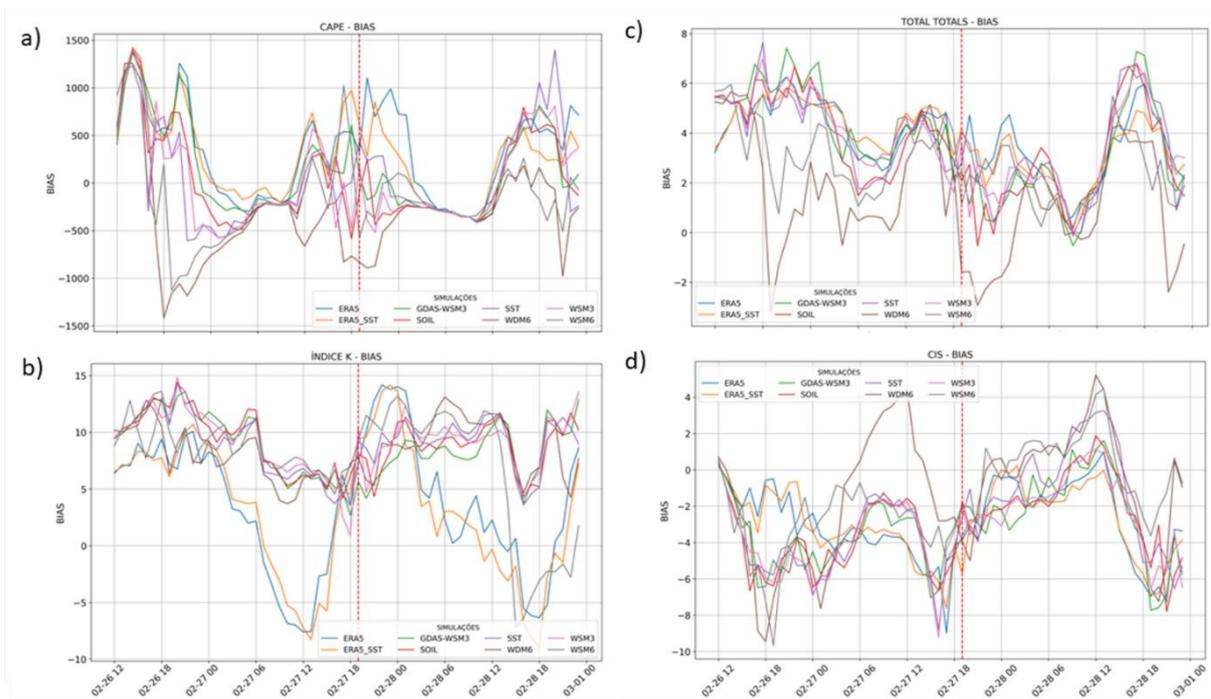
Quanto ao K (Figura 22b) dos experimentos realizados, apenas dois apresentaram viés negativo horas antes do horário do evento, superando um viés de -5°C ao serem comparadas com a reanálise. Às 1800 UTC, todas as simulações possuem viés positivo, ou seja, em comparação com os dados adotados como base, os valores foram superestimados. A reanálise mostra valores entre 30 e 35°C , enquanto que as simulações encontraram valores que vão de 35 a 40°C . Ambos resultados são categorizados como tempestades dispersas com possibilidades de ocorrência que variam de 60 a 80% (Vasquez, 2017).

Neste trabalho outras variáveis que representam a instabilidade na atmosfera foram analisadas. A Figura 19c apresenta o TT e a partir disso, foi verificada a Tabela 8, em que a reanálise encontrou valores acima de 45°C , o que já é caracterizada a possibilidade de tempestades fracas (Miller, 1972). Os resultados, obtidos através do BIAS, indicam que todas as simulações previram valor de TT superior a 45°C . Nas horas que antecederam a tempestade no município de Itajubá, a previsão dos experimentos atingira seu valor máximo de BIAS para o dia do evento. Às 18 UTC, horário em que a tempestade estava próxima ao município, o viés já se encontrava próximo de 4°C , valor acima do resultado da reanálise do ERA5, que de acordo com Miller (1972) é classificado como tempestade fraca.

Por fim, a Figura 19d mostra o BIAS do cisalhamento vertical do vento. Durante todo o período do experimento a variável apresentou valores positivos, porém baixos, indicativo de que os ventos em níveis superiores não estavam fortes suficiente e, caso uma possível tempestade ocorresse poderia ter características ordinárias. As simulações subestimaram os

valores encontrados pela reanálise da ERA5, em até 4 m/s, uma hora antes do evento. Isto indica o fraco cisalhamento vertical do vento o que não proporciona a ocorrência de tempestades duradouras.

Figura 22 - (a) CAPE horário (J/kg) utilizando a grade de 3 km, (b) K horário ($^{\circ}\text{C}$) utilizando a grade de 3 km, (c) TT horário ($^{\circ}\text{C}$) utilizando a grade de 3 km e (d) cisalhamento vertical do vento horário (m/s) utilizando a grade de 3 km. Têm-se as simulações: WSM3 (vermelho), WSM6 (verde), WDM6 (azul) e a média dos dados das estações (preto).



4.3.3.2. Kling-Gupta- Efficiency (KGE) e Correlação de Pearson (r) em relação a precipitação

O KGE é uma ferramenta estatística muito utilizada para avaliar a performance de modelos hidrológicos. A Tabela 14 apresenta os valores de KGE para 14 cidades situadas nos estados de MG. Nos experimentos em que foram utilizados diferentes esquemas de microfísica (Tabela 14), a microfísica WSM3 apresentou um KGE médio de -5.60 e uma correlação de 0.17. Desta forma, o experimento obteve o melhor resultado ao ser comparado com as demais simulações microfísicas. A simulação que utilizou MP WSM6 obteve o pior resultado dentre os três experimentos com o KGE médio calculado em -22.16 e correlação de 0.09. Por fim, a MP de momento duplo (WDM6) registrou KGE médio de -6.52 e uma correlação de 0.17. De maneira geral, a configuração controle presente no modelo WRF (MP WSM3) demonstrou ter

um desempenho superior na análise estatística, quando comparada aos testes que utilizaram as demais parametrizações.

Tabela 14 - Tabela contendo os valores do KGE e da correlação para os experimentos de sensibilidade dos parâmetros microfísicos (WSM3, WSM6 e WDM6).

Cidades	WSM3		WSM6		WDM6	
	KGE	Correlação	KGE	Correlação	KGE	Correlação
Itajubá/MG	-0,34	0,14	-0,27	0,32	-0,07	0,15
Lambari/MG	0,36	0,46	0,31	0,40	0,02	0,41
Juiz de Fora/MG	-0,63	-0,06	-0,46	-0,04	-0,72	0,02
Passos/MG	-9,47	-0,03	-31,4	-0,03	-0,35	-0,02
Poços de Caldas/MG	-0,86	0,31	-0,49	0,02	-0,35	-0,14
Extrema/MG	0,26	0,28	-0,13	0,15	-0,16	0,55
S.R. do Sapucaí/MG	-64,05	-0,03	-257,37	-0,03	-72,41	-0,03
São Lourenço /MG	-0,10	-0,01	0,04	0,40	0,19	0,42
Maria da Fé/MG	0,13	0,46	-0,06	-0,02	-0,22	0,11
Lorena/SP	-0,70	0,41	-0,01	0,33	-4,17	0,41
Campos do Jordão/SP	-0,78	0,25	-2,37	-0,01	-2,29	-0,03
Cachoeira Paulista/SP	-0,07	-0,03	-0,20	-0,03	0,11	0,15
S, B, do Sapucaí/SP	-1,58	0,01	-14,6	-0,05	-7,81	-0,04
Atibaia/SP	-0,70	0,27	-3,21	-0,04	-3,18	0,29
Média	-5,60	0,17	-22,15	0,10	-6,52	0,17

A Tabela 15 apresenta os resultados do KGE e da correlação para os experimentos que utilizaram outras fontes para as condições de fronteira do modelo. A configuração controle do WRF, que utiliza os dados globais do GFS, possui KGE de -5.60 e correlação de 0.17. Já ao realizar o experimento utilizando os dados do GDAS, o valor do KGE se aproxima de -6.01 e uma correlação de 0.15, o que indica uma pequena piora na assertividade da previsão ao utilizar estes dados de entrada. Por outro lado, ao empregar os dados de reanálise da ERA5, o KGE apresentou uma melhora significativa, com -2.66 de KGE médio encontrado, enquanto que a correlação diminuiu para 0.07. Com isso, os dados de reanálise da ERA5 obtiveram o melhor resultado estatístico em comparação com outras fontes de dados iniciais, GFS e GDAS.

Tabela 15 - Tabela contendo os valores do KGE e da correlação para os experimentos de sensibilidade dos dados de entrada do modelo WRF (GFS, GDAS e ERA5).

Cidades	GFS		GDAS		ERA5	
	KGE	Correlação	KGE	Correlação	KGE	Correlação
Itajubá/MG	-0,34	0,14	-0,46	0,15	-0,67	-0,03
Lambari/MG	0,36	0,46	-0,22	-0,01	-0,59	0,12
Juiz de Fora/MG	-0,63	-0,06	-0,49	-0,05	-0,75	-0,07
Passos/MG	-9,47	-0,03	-7,87	-0,03	-0,2	-0,03
Poços de Caldas/MG	-0,86	0,31	-0,23	-0,11	-2,94	0,37
Extrema/MG	0,26	0,28	0,19	0,19	-0,07	0,39
S.R. do Sapucaí/MG	-64,05	-0,03	-71,85	-0,03	-28,71	-0,03
São Lourenço /MG	-0,10	-0,01	-0,16	-0,05	-0,63	0,02
Maria da Fé/MG	0,13	0,46	0,47	0,66	-0,26	0,18
Lorena/SP	-0,70	0,41	-2,23	0,44	-0,69	0,06
Campos do Jordão/SP	-0,78	0,25	-0,87	0,13	-0,34	0,0
Cachoeira Paulista/SP	-0,07	-0,03	-0,05	-0,01	-0,48	0,04
S.B. do Sapucaí/SP	-1,58	0,01	0,06	0,2	-1,03	-0,04
Atibaia/SP	-0,70	0,27	-0,53	0,58	0,05	0,07
Média	-5,60	0,17	-6,01	0,15	-2,66	0,07

Os resultados sintetizados na Tabela 16 comparam os valores de KGE encontrados nos experimentos utilizando a SST climatológica (padrão do modelo WRF) e a SST (semanal) proveniente dos dados de reanálise da ERA5. Como já discutido anteriormente, os valores do KGE médio da configuração padrão utilizado no CEPremg é de -5.60 e correlação de 0.17. Ao utilizar os dados semanais na SST, nota-se uma grande melhora no KGE médio, saltando de -5.60 para -2.86. De acordo com Faria *et al.* (2023), a SST com temperaturas mais elevadas contribui para o aumento de gradientes verticais de temperaturas e de umidade, ingredientes fundamentais para a ocorrência de instabilidade e, conseqüentemente, a formação de nuvens convectivas; que justifica a melhora no índice de KGE.

Tabela 16 - Tabela contendo os valores do KGE e da correlação para os experimentos de sensibilidade dos dados da temperatura da superfície do mar (climatológica e semanal).

Cidades	Climatológica		Semanal	
	KGE	Correlação	KGE	Correlação
Itajubá/MG	-0,34	0,14	-0,26	0,11
Lambari/MG	0,36	0,46	-0,35	0,11
Juiz de Fora/MG	-0,63	-0,06	-0,66	-0,05
Passos/MG	-9,47	-0,03	-4,67	-0,03
Poços de Caldas/MG	-0,86	0,31	-0,22	-0,12
Extrema/MG	0,26	0,28	0,25	0,28
S.R. do Sapucaí/MG	-64,05	-0,03	-28,12	-0,03
São Lourenço /MG	-0,10	-0,01	-0,2	-0,04
Maria da Fé/MG	0,13	0,46	-0,26	0,09
Lorena/SP	-0,70	0,41	0,11	0,26
Campos do Jordão/SP	-0,78	0,25	-3,02	0,74
Cachoeira Paulista/SP	-0,07	-0,03	0,0	0,05
S.B. do Sapucaí/SP	-1,58	0,01	-2,79	0,22
Atibaia/SP	-0,70	0,27	0,09	0,34
Média	-5,60	0,17	-2,86	0,14

Na Tabela 17 são descritos os resultados do KGE em diferentes condições de umidade do solo, o que possibilitou a análise do impacto das variações desse parâmetro nos experimentos de sensibilidade. Ao utilizar os dados semanais de umidade do solo do modelo global GFS, o valor médio do KGE obteve resultados inferiores aos dados climatológicos padrão utilizados pelo modelo WRF. A configuração padrão do modelo registrou um KGE médio de -5,60, enquanto os dados semanais resultaram em um KGE médio de -7,35.

Tabela 17 - Tabela contendo os valores do KGE e correlação para os experimentos de sensibilidade dos dados de umidade do solo do modelo WRF (GFS, GDAS e ERA5).

Cidades	Climatológica		Semanal	
	KGE	Correlação	KGE	Correlação
Itajubá/MG	-0,34	0,14	-0,49	0,01
Lambari/MG	0,36	0,46	-0,06	0,08
Juiz de Fora/MG	-0,63	-0,06	-0,63	-0,05
Passos/MG	-9,47	-0,03	-0,81	-0,02
Poços de Caldas/MG	-0,86	0,31	-0,15	0,05
Extrema/MG	0,26	0,28	0,23	0,52
S.R. do Sapucaí/MG	-64,05	-0,03	-99,15	-0,03
São Lourenço /MG	-0,10	-0,01	-0,16	-0,04
Maria da Fé/MG	0,13	0,46	-0,37	0,01
Lorena/SP	-0,70	0,41	0,38	0,43
Campos do Jordão/SP	-0,78	0,25	-1,23	0,31
Cachoeira Paulista/SP	-0,07	-0,03	0,02	0,05
S.B. do Sapucaí/SP	-1,58	0,01	-0,36	-0,02
Atibaia/SP	-0,70	0,27	-0,15	0,33
Média	-5,60	0,17	-7,35	0,11

A Tabela 18 apresenta os resultados do KGE para duas simulações, o primeiro experimento com a configuração de controle utilizada no CEPReMG e o segundo experimento com a melhor configuração identificada nas etapas anteriores, ao unir as melhores configurações, o KGE obtido desta simulação foi efetivamente melhor do que a configuração utilizada no CEPReMG. O resultado indicou KGE de -2,52 que supera os valores encontrados nos demais experimentos.

Tabela 18 - Tabela contendo os valores do KGE e da correlação para os experimentos de sensibilidade dos dados de entrada do modelo WRF (GFS, GDAS e ERA5).

Cidades	Controle		ERA5_SST	
	KGE	Correlação	KGE	Correlação
Itajubá/MG	-0,34	0,14	-0,57	0,19
Lambari/MG	0,36	0,46	0,01	0,74
Juiz de Fora/MG	-0,63	-0,06	-0,75	-0,07
Passos/MG	-9,47	-0,03	-0,16	-0,03
Poços de Caldas/MG	-0,86	0,31	-0,06	-0,01
Extrema/MG	0,26	0,28	-0,33	0,06
S.R. do Sapucaí/MG	-64,05	-0,03	-29,88	-0,03
São Lourenço /MG	-0,10	-0,01	-0,55	0,03
Maria da Fé/MG	0,13	0,46	-0,35	0,06
Lorena/SP	-0,70	0,41	-0,52	0,08
Campos do Jordão/SP	-0,78	0,25	-0,37	0,03
Cachoeira Paulista/SP	-0,07	-0,03	-0,3	0,95
S.B. do Sapucaí/SP	-1,58	0,01	-1,21	-0,04
Atibaia/SP	-0,70	0,27	-0,26	-0,02
Média	-5,60	0,17	-2,52	0,13

5. CONCLUSÕES

Esse estudo analisou um caso de tempestade ocorrido no dia 27 de fevereiro de 2023 que causou muitos prejuízos em Itajubá. O trabalho teve como objetivo descrever o ambiente em que a tempestade se formou, as características dela através de análise de dados de radar e avaliar a performance do modelo WRF através de experimentos de sensibilidade. Os principais resultados obtidos foram;

Análise sinótica: apesar da presença de um sistema frontal atuando no sul do Brasil e se conectando a uma baixa pressão no oceano Atlântico, sua presença não causa efeitos sobre o sul de MG. Além disso, nenhum sistema dinâmico está atuante sobre a região, como sistemas frontais, cavados em médios níveis e jatos em altos níveis da atmosfera. As análises termodinâmicas indicavam a possibilidade de tormentas isoladas e dispersas como foram mostrados nos dados do K e também do TT. Apesar do baixo cisalhamento do vento no dia em questão o CAPE estava acima de 1000 J/kg, que associada aos outros índices é indicativo de que a atmosfera se encontrava instável.

Mesoescala: a tempestade teve curta duração (aproximadamente 40 minutos) e foi capaz de causar inúmeros estragos no município. Seu deslocamento de oeste para leste determinou a sua faixa de atuação, abrangendo boa parte da cidade. Neste período o volume de chuva chegou a 58,8 mm na estação localizada no bairro Estiva, em Itajubá.

Validação do modelo WRF: com relação à validação, nos experimentos de

- Microfísica: a melhor performance foi do experimento que utilizou a parametrização WSM3;
- Condição de fronteira: a simulação com os dados de reanálise da ERA5 obteve a melhor performance;
- SST: para os dados de inicialização da SST, os resultados obtidos com a ERA5 foram melhores em comparação com os dados climatológicos já presentes no modelo WRF;
- Umidade do Solo: por fim, os dados já utilizados pelo modelo WRF obtiveram melhores desempenho em comparação com os dados semanais no GDAS.

Com a definição das melhores configurações, um oitavo experimento foi realizado. Esta simulação obteve melhores resultados em comparação com as outras simulações. Ao compará-la com as configurações controle utilizada pelo CEPreMG os resultados obtidos também indicaram superioridade com esta nova configuração. No entanto, como os dados de reanálise

da ERA5 não são disponibilizados em tempo real, sua utilização é indicada para estudos de caso e não em escala operacional.

Para estudos futuros é sugerido a realização de simulações para outros eventos de precipitação que tenham afetado não somente o município, mas toda a região do sul de MG. Além disso, a importância de estudos envolvendo a Serra da Mantiqueira e sua influência sobre o sul de MG e o Vale do Paraíba em SP ajuda a preencher lacunas existentes na área de modelagem para regiões com topografias tão complexas.

REFERÊNCIAS

- AJILESH, P. *et al.* Observed and model-simulated thermodynamic processes associated with urban heavy rainfall events over Bangalore, India. **Meteorological Applications**, v. 27, n. 1, p. e1854, 2020.
- ALCÂNTARA, E. *et al.* Deadly disasters in Southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 23, n. 3, p. 1157-1175, 2023.
- ARAUJO, A.A. *et al.* Avaliação do modelo Weather Research and Forecasting (WRF) na simulação operacional de um evento de frente fria no sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 02, p. 805-817, 2023.
- BARTOLOMEI, F.R. *et al.* Eventos Extremos De Precipitação No Sudeste Do Brasil: Verão 2021 2022. **Revista Brasileira De Geografia Física**, vol. 16, n. 05, p. 2658-76, 2023. doi:10.26848/rbgf.v16.5.p2658-2676.
- BAUER, P.; THORPE, A.; BRUNET, G. The quiet revolution of numerical weather prediction. **Nature**, v. 525, n. 7567, 2015.
- BISWASHARMA, R. *et al.* 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, 2024.
- BLAUDT, L. M., *et al.* DESASTRE OCORRIDO EM PETRÓPOLIS NO VERÃO DE 2022: ASPECTOS GERAIS E DADOS DA DEFESA CIVIL: Disaster occurred in Petrópolis in the summer of 2022: general aspects and civil defense data. **Geosciences= Geociências**, 42(1), 59-71, 2023.
- BOURDEAU-BRIEN, M.; KRYZANOWSKI, L. Natural disasters and risk aversion. **Journal of Economic Behavior & Organization**, v. 177, p. 818-835, 2020.
- CAMPOS, B.; CARVALHO, V. S. B.; CALHEIROS, A. J. P. Análise da ocorrência de eventos extremos de precipitação registrados no município de Itajubá, MG. 2011.
- CAMPOS, B.; CARVALHO, V. S. B.; MATTOS, E. V. Assessment of cloud microphysics and cumulus convection schemes to model extreme rainfall events over the Paraíba do Sul River Basin. **Urban Climate**, 51, 101618, 2023.

- CAMPOS, T.L.O.B.; MOTA, M.A.S.; SANTOS, S.R.Q. Eventos extremos de precipitação em Belém-PA: uma revisão de notícias históricas de jornais. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, p. 182-194, 2015.
- CASSALHO, F. *et al.* Hydrological regionalization of maximum stream flows using an approach based on L-moments. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, 2017.
- CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, 2023. Reuniao_Impactos_52th_CEMADEN_Marco_2023. Disponível em: https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/monitoramento/boletim-de-impactos/boletim-de-impactos-de-extremos-de-origem-hidro-geo-climatico-em-atividades-estrategicas-para-o-brasil-2013-15-03-2023-ano-06-no-52/reuniao_impactos_52th_cemaden_marco_2023.pdf/view
- DELGADO, R.C.; SANTOS, E. O. *Precipitação*. In: APOSTILA DE METEOROLOGIA BÁSICA - IF 111 – 2013 – DCA/IF/UFRRJ. 2013. p. 245.
- DUDHIA, J. Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 46, n. 20, 1989.
- DUDHIA, J.; HONG, S.; LIM, K. A new method for representing mixed-phase particle fall speeds in bulk microphysics parameterizations. *気象集誌. 第 2 輯*, v. 86, p. 33-44, 2008.
- DUZENLI, E.; YUCEL, I.; YILMAZ, M. T. Evaluation of the fully coupled WRF and WRF-Hydro modelling system initiated with satellite-based soil moisture data. **Hydrological Sciences Journal**, p. 1-18, 2024.
- FARIA, L. F.; REBOITA, M.S. Eventos Meteorológicos Associados ao Ciclone Explosivo Ocorrido em junho de 2020 e Impactos ao Estado de Santa Catarina. **Geografia**, v. 48, n. 1, p. 1-27, 2023.
- FERREIRA, Glauber Willian de Souza et al. Assessment of precipitation and hydrological droughts in South America through statistically downscaled CMIP6 projections. **Climate**, v. 11, n. 8, p. 166, 2023.
- FREITAS, Carlos Machado et al. Natural disasters and health: an analysis of the situation in Brazil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 9, p. 3645, 2014.
- FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015.

G1 – Portal de notícias da Globo. Disponível em: < Universidade Federal de Itajubá estima prejuízo de R\$ 10 milhões com chuva que invadiu 70% do campus | Sul de Minas | G1 (globo.com)> Acesso em: 20 de junho 2023.

GARCIA, D.W.; REBOITA, M.S.; CARVALHO, V. S. B. Evaluation of WRF performance in simulating an extreme precipitation event over the South of Minas Gerais, Brazil. **Atmosphere**, v. 14, n. 8, p. 1276, 2023.

GONÇALVES, L.J.M. et al. Evaluation of a High Resolution WRF Model for Southeast Brazilian Coast: The Importance of Physical Parameterization to Wind Representation. **Atmosphere**, v. 15, n. 5, p. 533, 2024.

GRELL, G. A.; FREITAS, S. R. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling, **Atmos. Chem. Phys.**, 14, 5233-5250, 2014. doi:10.5194/acp-14-5233-2014.

GU, G.; ADLER, R. F. Observed variability and trends in global precipitation during 1979–2020. **Climate Dynamics**, v. 61, n. 1, p. 131-150, 2023.

GUNWANI, P. et al. Sensitivity of WRF/Chem simulated PM_{2.5} to initial/boundary conditions and planetary boundary layer parameterization schemes over the Indo-Gangetic Plain. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 5, p. 560, 2023.

HANE, C. E. Radar observations of the mesoscale environment. In: RAY, Peter S. (Ed.). *Mesoscale meteorology and forecasting*. Boston: American Meteorological Society, 1986. p. 359-389.

HENNEMAN, A. *et al.* Evaluation of pharmacy resident perceived impact of natural disaster on stress during pharmacy residency training. **Currents in pharmacy teaching and learning**, v. 12, n. 2, p. 147-155, 2020.

HENRY, W. The Skew-T, Log P Diagram. **National Weather Service Training Center**, EUA, 68 pp.,1987

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

HIDALGO, J; BAEZ, A.A. Natural disasters. **Critical care clinics**, v. 35, n. 4, p. 591-607, 2019.

HONG, S.; DUDHIA, J.; CHEN, S. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. **Mon. Wea. Rev.**, **132**, 103–120, 2004.

[doi:10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2)

HONG, S.; NOH, Y.; DUDHIA, J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318–2341, 2006.

[doi:10.1175/MWR3199.1](https://doi.org/10.1175/MWR3199.1)

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

HUFFMAN, G. J. et al. NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG). **Algorithm theoretical basis document (ATBD) version**, v. 4, n. 26, p. 30, 2015a.

HUFFMAN, G. J. et al. Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) technical documentation. **Nasa/Gsfc Code**, v. 612, n. 47, p. 2019, 2015b.

HUFFMAN, G. J. et al. Day 1 IMERG final run release notes. **NASA/GSFC: Greenbelt, MD, USA**, p. 9, 2015c.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Censo Demográfico 2022**. Disponível em : <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?=&t=resultados> . Acesso em 20/06/2023.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Disponível em:

<https://data.inpe.br/geonetwork/srv/api/records/669272f8-b121-46f4-8a3a-c5bf1c199988#:~:text=->

[%20Resolu%C3%A7%C3%A3o%20Temporal%3A%2010%20minutos%3B,dependendo%20do%20canal%20espectral\)%3B](#). Acesso em 28/01/2025.

JACKSON, E. K. et al. Introductory overview: Error metrics for hydrologic modelling—A review of common practices and an open source library to facilitate use and adoption.

Environmental Modelling & Software, v. 119, p. 32-48, 2019.

JIMÉNEZ, P. A. *et al.* A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation. **Monthly Weather Review**, v. 140, n. 3, 2012.

JOHNSON, R. H.; MAPES, B. E. Mesoscale processes and severe convective weather. In: DOSWELL, C. A. (Ed.). **Severe convective storms**. Boston, MA: American Meteorological Society, 2001. p. 71–122. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-935704-06-5_3

LIM, K. S.; HONG, S.. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. **Monthly weather review**, v. 138, n. 5, p. 1587-1612, 2010.

LIMA, S. S.; ARMOND, N. B. Rainfall in Metropolitan Region of Rio de Janeiro: characterization, extreme events, and trends. **Sociedade & Natureza**, 34, 2022.

LIN, Y.; FARLEY, R. D.; ORVILLE, H. D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. **Journal of Applied Meteorology and climatology**, v. 22, n. 6, p. 1065-1092, 1983.

LINDEMANN, Douglas et al. The Surface Wind Influence on the Heat Fluxes Variability on the South Atlantic. **Research Square**, v. 10, 2021.

LIU, D. et al. Combined impacts of convection and microphysics parameterizations on the simulations of precipitation and cloud properties over Asia. **Atmospheric research**, v. 212, p. 172-185, 2018.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas e eventos climáticos no Brasil. In: MARENGO, José A.; SCHAEFFER, Roberto; PINTO, Hilton Silveira; ZEE, David Man Wai. **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. Rio de Janeiro: FBDS, 2009. p. 4-19, 2009.

MARENGO, Jose A. et al. Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18th–19th, 2023, in the city of São Sebastião, São Paulo, Brazil: from meteorological causes to early warnings. **Natural Hazards**, v. 120, n. 8, p. 7997-8024, 2024.

MARKOWSKI, P.; RICHARDSON, Y. **Mesoscale meteorology in midlatitudes**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010. ISBN 9780470682104. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470682104>

MARRAFON, V. H. ; **REBOITA, M.S.** . Características da precipitação na América do Sul reveladas através de Índices Climáticos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 663-676, 2020.

MARTINEZ, J. A. *et al.* Mesoscale structures in the Orinoco basin during an extreme precipitation event in the tropical Andes. **Frontiers in Earth Science**, v. 11, p. 1307549, 2024.

- MEDEIROS, R. M. ; SOUSA, E. P.; GOMES FILHO, M. F. Ocorrência de eventos extremos de precipitação em Campina Grande–Paraíba, Brasil. 2014.
- MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Mapeamento das Chuvas Intensas no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 37-44, 2013.
- MILLER, R. C. **Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central**. AWS, 1972.
- MINUZZI, R. B. *et al.* Climatologia do comportamento do período chuvoso da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 3, p. 338-344, 2007
- MLAWER, E. J. *et al.* Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 102, n. D14, 1997.
- MOHAN, P. R. *et al.* Simulation of a heavy rainfall event over Chennai in Southeast India using WRF: Sensitivity to microphysics parameterization. **Atmospheric Research**, v. 210, p. 83-99, 2018.
- NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 1, p. 121-140, 2005.
- NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. *Spring Weather Preparedness Topics*. Disponível em: <https://www.weather.gov/ilx/swop-springtopics>. Acesso em: 14 jan. 2025.
- PINHEIRO, M.V. **Avaliação Técnica e Histórica das Enchentes em Itajubá – MG**. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia de Energia, UNIFEI. Itajubá, 2005.
- PINTO, Thaís Aparecida Cortez *et al.* Synoptic and Mesoscale Atmospheric Patterns That Triggered the Natural Disasters in the Metropolitan Region of Belo Horizonte, Brazil, in January 2020. **Atmosphere**, v. 16, n. 1, p. 102, 2025.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAJUBÁ. Disponível em < Aspectos Físicos e Geográficos - Prefeitura Municipal de Itajubá (itajuba.mg.gov.br)>. Acesso em: 20 de junho de 2023.
- PRISTO, Marcos Vinícius de Jesus *et al.* Heavy rainfall events climatology in the city of Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 615-630, 2018.

- REBOITA, M. S. *et al.* Aspectos Climáticos do Estado de Minas Gerais (Climate Aspects in Minas Gerais State). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, n. 11, p. 206-226, 2015.
- REBOITA, M. S. *et al.* Caracterização atmosférica quando da ocorrência de eventos extremos de chuva na região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 2017.
- REBOITA, M. S. *et al.* From a Shapiro–Keyser extratropical cyclone to the subtropical cyclone Raoni: An unusual winter synoptic situation over the South Atlantic Ocean. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 148, n. 747, p. 2991-3009, 2022.
- REICHSTEIN, M. *et al.* Climate extremes and the carbon cycle. **Nature**, v. 500, n. 7462, p. 287-295, 2013.
- REZA, S. W.. Profit skimming, asymmetric benchmarking, or the effects of implicit incentives? Evidence from natural disasters. **Journal of Multinational Financial Management**, v. 57, p. 100654, 2020.
- ROCHA, R.P.; REBOITA, M. S.; CRESPO, N. M. Análise do evento extremo de precipitação ocorrido no Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024. **Journal Health NPEPS**, v. 9, n. 1, 2024.
- RODRIGUEZ, C. A. M. Estratégias de Varredura para o Radar Meteorológico do CLA, 2020.
- ROZANTE, J.R. *et al.* Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. **Weather and forecasting**, v. 25, n. 3, p. 885-894, 2010.
- SILVA, L. J.; REBOITA, M. S.; ROCHA, R.P. Relação da passagem de frentes frias na região sul de Minas Gerais (RSMG) com a precipitação e eventos de geada. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, 2014.
- SILVA, R. C.; MARENGO, J. A. ; RUV LEMES, M.. Analysis of extreme rainfall and landslides in the metropolitan region of the Paraíba do Sul River Valley and North Coast of Sao Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 1-23, 2024.
- SILVEIRA, G.L. *et al.* Análise do Evento Extremo de Precipitação ocorrido em Petrópolis-RJ no dia 15 de fevereiro de 2022. In Proceedings of the IX Seminário de Recursos Naturais 2023, Itajubá, Brazil, 5–7 June 2023.

- SIQUEIRA, H. R.; ALVES, G. F.; GUIMARÃES, E. C. **Comportamento da precipitação pluviométrica mensal do estado de Minas Gerais: análise espacial e temporal.** 2007. Disponível em < http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/disciplinas:geoesalq:pira2012:adrielle_artigo1.pdf>. Acesso em 20 de junho de 2023.
- SKAMAROCK, W.C. Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra. **Monthly Weather Review** 132, 3019-3032, 2004.
- SKAMAROCK, W. C. et al. A description of the advanced research WRF version 4. **NCAR tech. note near/tn-556+ str**, v. 145, 2019.
- SOLANO-FARIAS, F. *et al.* Assessment of physical schemes for WRF model in convection-permitting mode over southern Iberian Peninsula. **Atmospheric Research**, v. 299, p. 107175, 2024.
- SOUZA, L. R. *et al.* **Determinação de padrões espaço-temporal e regiões homogêneas de precipitação pluvial no estado de Minas Gerais.** Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, v. 8, n. 2, p. 265-280, 2011.
- SOUZA, L. S. *et al.* Evaluation of Cumulus and Microphysical Parameterization Schemes of the WRF Model for Precipitation Prediction in the Paraíba do Sul River Basin, Southeastern Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, p. 1-22, 2024.
- TEODORO, T.A. *et al.* Análise das Estimativas da Precipitação Diária do Produto GPM-IMERG na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, Região Sudeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 2, p. 449-459, 2020.
- TEWARI, M. *et al.* Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. *In: 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction*, 2004, Seattle, WA, US, pp. 11–15.
- VASQUEZ, T. Instability, Skew-T & Hodograph Handbook. **Weather Graphics Technologies**, 248p, 2017.
- VIOLA, M. R. *et al.* Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 9, p. 970-978, 2010.
- WILKS, D.S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences; **Academic Press**: Cambridge, MA, USA, 2011.

ZILLI, M. T. *et al.* A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269-2279, 2017.