MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/10.22.17.34-TDI

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA PREVISÃO DE EVENTOS DE TEMPO SEVERO SOBRE O AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO

Sildiscley Assis Coelho

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Marcos Daisuke Oyama, aprovada em 18 de setembro de 2019.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3U9J6J8>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/10.22.17.34-TDI

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA PREVISÃO DE EVENTOS DE TEMPO SEVERO SOBRE O AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO

Sildiscley Assis Coelho

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Marcos Daisuke Oyama, aprovada em 18 de setembro de 2019.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3U9J6J8>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Coelho, Sildiscley Assis.

Co65p Simulações numéricas para previsão de eventos de tempo severo sobre o Aeroporto Internacional de São Paulo / Sildiscley Assis Coelho. – São José dos Campos : INPE, 2019.

xxxii + 151 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/10.22.17.34-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientador : Dr. Marcos Daisuke Oyama.

1. Alta resolução. 2. Ensemble. 3. WRF. I.Título.

CDU 551.509.313:656.7(81)

Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aluno (a): ***Sildiscley Assis Coelho***

Título: "SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA PREVISÃO DE EVENTOS DE TEMPO SEVERO SOBRE O AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de ***Mestre*** em

Meteorologia

Dr. Julio Pablo Reyes Fernandez

Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

( ) Participação por Video - Conferência

(X) Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Marcos Daisuke Oyama

Orientador(a) / IAE/DCTA / SJCampos - SP

( ) Participação por Video - Conferência

(X) Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Adaiana Francisca Gomes da Silva

Adaiana Gomes.

Convidado(a) / IFSP.. / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Video - Conferência

(X) Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

São José dos Campos, 16 de setembro de 2019

"Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível".

São Francisco de Assis

Dedico este trabalho
à minha esposa, ***Luana***
e às minhas filhas,
Laura *e* ***Manuela***

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, pela saúde, e por mostrar o caminho, dar força e perseverança para conquistar mais uma etapa em minha vida;

Aos meus pais Maria das Dores e Sebastião Martins, por todo amor, conselho e incentivo que fizeram de mim a pessoa que sou hoje e só tenho motivos para agradecer;

À minha esposa Luana, a quem tanto admiro pela sua fé, força espiritual e pelos momentos difíceis que passou com minha ausência. Este dia chegou e com você compartilho este momento tão especial em minha vida;

Às minhas filhas Laura e Manuela que não me importa o quanto vocês cresçam, sempre serão as minhas pequenas;

Ao meu orientador, Marcos Daisuke Oyama, pela dedicação, contribuições, incentivo e amizade. Muito obrigado pelos direcionamentos que nortearam este aprendizado;

À Força Aérea Brasileira, pela capacitação dos profissionais em meteorologia através do programa de Pós-Graduação em Meteorologia;

Ao IAE-CTA, pelo apoio a realização deste trabalho;

À INFRAERO, pela disponibilização dos dados da estação meteorológica de superfície (SBGR) para o desenvolvimento desta pesquisa. Em especial, à meteorologista Raquel, pela amizade e toda colaboração, sugestões e conversas durante a condução deste trabalho;

Agradeço em especial aos amigos da REDEMET, Cláudio e Reis, que me ajudaram em diversas ocasiões; e

Agradeço à minha turma de mestrado, de forma especial ao meu amigo Michell, que sempre me ajudou e incentivou no desenvolvimento desta pesquisa. Não poderia deixar de citar aqueles companheiros de CP que conheci durante esta jornada: Alan, Ernani, João, Marcos, Mateus, Raphael, Rafael, Tamires e Vinícius Couto.

RESUMO

Eventos de tempo severo podem impactar as atividades aeroportuárias e o gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo, além de levar a outros impactos socioeconômicos. Neste trabalho, para 3 casos de tempo severo ocorridos no Aeroporto Internacional de São Paulo – Guarulhos entre 2016 e 2017, avaliou-se o desempenho de simulações em alta resolução com o *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) utilizando *multiphysics ensemble*. Nos 3 casos, a condição sinótica foi comum e consistiu na atuação de um sistema frontal sobre a região. O número de membros do *ensemble* foi 9. As simulações foram executadas em dois domínios aninhados com espaçamento horizontal de 9 e 3 km aproximadamente centrados no aeroporto. As condições iniciais e de contorno foram provenientes de previsões do *Global Forecast System* (GFS). O prazo útil de previsão considerado foi de 24 h. A análise dos resultados enfocou duas variáveis: precipitação e vento a 10 m. Para a comparação entre simulações e observações, foram utilizadas, para a precipitação, estatísticas computadas com as informações contidas em uma caixa de 100 km x 100 km centrada no aeroporto; para o vento, valores no ponto de grade do aeroporto. As séries temporais observadas foram comparadas com as métricas do *ensemble* (mediana, dispersão e *outlier*) representadas em *boxplot*. Os resultados mostraram que o instante de ocorrência e a duração de precipitação forte são previstos em ambos os domínios pelos *outliers*. Para a intensidade de precipitação máxima, o valor e o instante de ocorrência podem ser previstos pelos *outliers* no domínio de 9 km e pela mediana no domínio de 3 km. O instante de ocorrência e a duração das rajadas de vento podem ser previstos pela dispersão dos membros em ambos os domínios. Todos esses resultados, por terem sido válidos para os 3 casos, podem ser considerados robustos. A metodologia utilizada no trabalho, por ser simples, poderá ser adaptada e implementada em centros operacionais, como o Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica (CIMAER), para assistir a previsão para o Aeroporto Internacional de São Paulo.

Palavras-chave: Alta resolução. *Ensemble*. WRF.

NUMBER SIMULATIONS FOR FORECASTING SEVERAL TIME EVENTS ABOUT SAO PAULO INTERNATIONAL AIRPORT

ABSTRACT

Severe weather events can affect airport activities and air traffic management, as well as other socioeconomic activities. In this work, for 3 severe weather cases that occurred in the International Airport of São Paulo – Guarulhos between 2016 and 2017, the performance of high resolution simulations with the Weather Research and Forecasting Model (WRF) using multiphysics ensemble was evaluated. In the 3 cases, there was a common synoptic condition: the presence of a frontal system over the region. The number of members in the ensemble was 9. The simulations were performed in two nested domains with 9 km and 3 km horizontal spacing approximately centered at the airport. Initial and boundary conditions were provided by Global Forecast System (GFS) forecasts. The forecast range was 24 h. The analysis of results focused on two variables: precipitation and wind at 10 m. To compare simulations with observations, for precipitation, statistics computed from information contained in a 100 km x 100 km box centered at the airport were used; for wind, values at the grid point closest to the airport were used. The time series for observations were compared with that for simulations by using ensemble metrics (median, dispersion and outlier) represented in boxplot. The results showed that the time of occurrence and the duration of heavy precipitation can be predicted in both domains by outliers. For the maximum precipitation intensity, the value and the time of occurrence can be predicted by outliers in the 9 km domain and the median in the 3 km domain. The time of occurrence and duration of wind gusts can be predicted by the dispersion in both domains. All these results, being valid for all 3 cases, can be regarded as robust. The methodology used in the work, due to its simplicity, can be adapted and implemented in operational centers, such as the Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica (CIMAER), to assist the weather forecasting activities for the International Airport of São Paulo.

Keywords: High Resolution. Ensemble. WRF.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

3.1 Localização da região de estudo (painel esquerdo) com mapa de elevação (painel direito) em metros. O ponto vermelho corresponde à localização do Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos. 10
3.2 Precipitação média mensal no estado de São Paulo, calculada série temporal média espacial de precipitação no período de 1991 a 2007. 11
3.3 Precipitação média na região Sudeste entre 1961 e 1990. 12
3.4 Temperaturas médias anuais da região Sudeste entre 1965 e 2005. 13

4.1 Descrição temporal de inicialização do modelo WRF e de ocorrência dos eventos. 18
4.2 Representação do domínio usado na avaliação das simulações, as caixas delimitando os domínios das simulações d01 e d02. Domínios aninhados centrado no Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos - 23° 26' 08" S e 046° 28' 23" W. Quadrado em vermelho: caixa do método DIST que será apresentado mais adiante. 19
4.3 Resumo de espaçamentos horizontais *versus* resolução verticais. 20
4.4 Esquematização das diferentes parametrizações utilizadas em estudos acadêmicos no Brasil. A categoria "x" indica que algum esquema específico não foi informado no trabalho. 22
4.5 Exemplo de como será montada a do estrutura do *boxplot* para cada passo de tempo (30 min). Os membros do *ensemble* são classificados em ordem decrescente de valores. 26

5.1 Série temporal com os dados automáticos da estação meteorológica de superfície de Guarulhos para os dias 10 e 11 de março de 2016: (a) Precipitação máxima e (b) Velocidade do vento máximo. 30
5.2 Carta Sinótica de Superfície elaborada para o dia 11 de março de 2016 às 12 UTC. 31
5.3 Imagens de satélite da América do Sul no canal Infravermelho (Ch.4) Temperatura de Brilho em °C: (a) 10-mar 2016 00 UTC, (b) 10-mar 2016 06 UTC, (c) 10-mar 2016 12 UTC, (d) 10-mar 2016 18 UTC, (e) 11-mar 2016 00 UTC e (f) 11-mar 2016 06UTC. Quadrado em vermelho: área DIST. 32

5.4 Campos de precipitação acumulada em 24 horas (CMORPH) para os dias 10, 11 e 12 de março de 2016 (região Sudeste). Região de estudo no *box* em vermelho (DIST) e aeroporto ao centro com o ponto em vermelho. 33
5.5 Campos de pressão ao nível médio do mar às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Unidade em hPa. 34
5.6 Campos de ômega em 500 hPa às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Unidade em Pa/s. 34
5.7 Campos de linhas de corrente em 250 hPa às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt. 35
5.8 Campos de linhas de corrente em 500 hPa às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt. 36
5.9 Campos de linhas de corrente em 850 hPa às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt. 36
5.10 Campos de umidade relativa em 925 hPa às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Unidade em % UR. 37
5.11 Campos de temperatura a 2 m às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Unidade em °C. 38
5.12 Imagens de satélite da Região Sudeste no canal Infravermelho IR entre os dias 10 e 11 de março de 2016. Temperatura de brilho GOES-13. a) 18 UTC 10-mar, b) 19 UTC 10-mar, c) 20 UTC 10-mar, d) 21 UTC 10-mar, e) 22 UTC 10-mar, f) 23 UTC 10-mar e g) 00 UTC 11-mar. Quadrado em vermelho: área do método DIST. Ponto em vermelho: aeroporto de GRU. 39
5.13 Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar de São Roque localizado em São Paulo. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 10 mar 2016 2100 UTC, (b) 10 mar 2016 2130 UTC, (c) 10 mar 2016 2200 UTC, (d) 10 mar 2016 2230 UTC, (e) 10 mar 2016 2300 UTC, (f) 10 mar 2016 2330 UTC, (g) 11 mar 2016 0030 UTC e (h) 11 mar 2016 0100 UTC. Radar do DECEA - CAPPI 3 km. Unidade em dBZ. 41

5.14 Campos que compõem a análise de mesoescala para o dia 10 mar 2016 às 1800 UTC: a) Cisalhamento do vento entre 0 - 6 km; b) Advecção de temperatura em 775 hPa; c) Ômega em 800 hPa; d) Levantamento em 4 camadas; e) Índice SA-MCS e f) Imagem de satélite GOES 13 IR Ch.4. Linha em vermelho: limiar que contribui para o índice. Caixa em vermelho: Área do método DIST. Ponto central: Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos. 43
5.15 Séries temporais da fração de pontos de grade com ocorrência de precipitação para limiares de chuva moderada e forte (FRAC). 45
5.16 Séries temporais dos valores de precipitação máxima na caixa centrada no aeroporto (GFS-linha azul), valores de intensidade coletados na estação do aeroporto (OBS-linha amarela) e valores observados utilizando o CMORPH (linha verde). 46
5.17 Série temporal utilizando o método DIST com valores de ocorrência de precipitação máxima (PMAX): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km. . . 48
5.18 Mapa de elevação com a região de estudo em metros (painel esquerdo). Campo com direção e magnitude do vento para a mesma região (painel direito). A caixa em azul representa o tamanho do domínio utilizado no método DIST. O ponto em azul ao centro representa a localização do Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos. 49
5.19 Série temporal utilizando o método DIST com valores de ocorrência de vento máximo (VMAX): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km. 50
5.20 Séries temporais para a variável vento: a) Ciclo diário da velocidade média e máxima do vento registrado na estação SBGR para o mês de março de 2016; e b) Série temporal observada na estação nos dias 10 e 11 de março de 2016. 51
5.21 Séries temporais com valores de DIF. DIF-MENSAL (linha amarela), DIF-OBS (valor pontual da estação - linha verde) e DIF-GFS (linha azul). 52
5.22 Série temporal do ponto de grade que contém as informações da estação meteorológica SBGR - (DIF): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km. . . . 54

6.1 Série temporal com os dados automáticos da estação meteorológica de superfície para os dias 06 e 07 de fevereiro de 2017: (a) Precipitação máxima e (b) Velocidade do vento máximo. 58
6.2 Carta Sinótica de Superfície elaborada para os dias 06 e 07 de fevereiro de 2017 às 00 UTC. 59

6.3 Imagens de satélite da América do Sul no canal Infravermelho (Ch.4) Temperatura de brilho em °C: (a) 06-fev 2017 00 UTC, (b) 06-fev 2017 06 UTC, (c) 06-fev 2017 12 UTC, (d) 06-fev 2017 18 UTC, (e) 07-fev 2017 00 UTC e (f) 07-fev 2017 06UTC. Quadrado em vermelho: área DIST. 60
6.4 Campos de precipitação acumulada em 24 horas (CMORPH) para os dias 05, 06 e 07 de fevereiro de 2017 (região Sudeste). Região de estudo no *box* em vermelho (DIST) e aeroporto ao centro com o ponto em vermelho. 61
6.5 Campos de pressão ao nível médio do mar às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em hPa. 62
6.6 Campos de ômega em 500 hPa às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em Pa/s. 62
6.7 Campos de linhas de corrente em 250 hPa às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt. 63
6.8 Campos de linhas de corrente em 500 hPa às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt. 64
6.9 Campos de linhas de corrente em 850 hPa às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt. 64
6.10 Campos de umidade relativa em 925 hPa às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em % UR. 65
6.11 Campos de temperatura a 2 m às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em °C. 66
6.12 Imagens de satélite da Região Sudeste no canal Infravermelho (IR) do dia 06 fevereiro de 2017. Temperatura de brilho GOES-13. a) 15 UTC 6-fev, b) 16 UTC 6-fev, c) 17 UTC 6-fev, d) 18 UTC 6-fev, e) 19 UTC 6-fev, f) 20 UTC 6-fev, g) 21 UTC 6-fev e h) 22 UTC 6-fev. Quadrado em vermelho: área do método DIST. Ponto em vermelho: aeroporto de GRU. 68

6.13 Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar de São Roque localizado em São Paulo. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 06 fev 2017 1830 UTC, (b) 06 fev 2017 1930 UTC, (c) 06 fev 2017 2030 UTC, (d) 06 fev 2017 2130 UTC, (e) 06 fev 2017 2230 UTC e (f) 06 fev 2017 2330 UTC. Radar do DECEA - CAPPI 3 km. Unidade em dBZ. 70
6.14 Campos que compõem a análise de mesoescala para o dia 06 fev 2017 às 1800 UTC: a) Cisalhamento do vento entre 0 - 6 km; b) Advecção de temperatura em 775 hPa; c) Ômega em 800 hPa; d) Levantamento em 4 camadas; e) Índice SA-MCS e f) Imagem de satélite GOES 13 IR Ch.4. Linha em vermelho: limiar que contribui para o índice. Caixa em vermelho: Área do método DIST. Ponto central: Aeroporto de Internacional São Paulo - Guarulhos. 72
6.15 Séries temporais da fração de pontos de grade com ocorrência de precipitação para limiares de chuva moderada e forte (FRAC). 74
6.16 Séries temporais dos valores de precipitação máxima na caixa centrada no aeroporto (GFS-linha azul), valores de intensidade coletados na estação do aeroporto (medida pontual-linha amarela) e valores observados utilizando o CMORPH (linha verde). 75
6.17 Série temporal utilizando o método DIST com valores de ocorrência de precipitação máxima (PMAX): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km. . . 77
6.18 Séries temporais para a variável vento: a) Ciclo diário da velocidade média e máxima do vento registrado na estação SBGR para o mês de fevereiro de 2017; e b) Série temporal observada na estação nos dias 06 e 07 de fevereiro de 2017. 78
6.19 Séries temporais com valores de DIF. DIF-MENSAL (linha amarela), DIF-OBS (valor pontual da estação - linha verde) e DIF-GFS (linha azul). 79
6.20 Série temporal do ponto de grade que contém as informações da estação meteorológica SBGR - (DIF): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km. . . . 80

7.1 Série temporal com os dados automáticos da estação meteorológica de superfície para os dias 17 e 18 de dezembro de 2017: (a) Precipitação máxima e (b) Velocidade do vento máximo. 84
7.2 Carta Sinótica de Superfície elaborada para os dias 17 e 18 de dezembro de 2017 às 00 UTC. 85

7.3 Imagens de satélite da América do Sul no canal Infravermelho (Ch.4) Temperatura de brilho em °C: (a) 17 dez 2017 00 UTC, (b) 17 dez 2017 06 UTC, (c) 17 dez 2017 12 UTC, (d) 17 dez 2017 18 UTC, (e) 18 dez 2017 00 UTC e (f) 18 dez 2017 06 UTC. Quadrado em vermelho: área DIST. 87
7.4 Campos de precipitação acumulada em 24 horas (MERGE) para os dias 17, 18 e 19 de dezembro de 2017 (região Sudeste). Região de estudo no *box* em vermelho (DIST) e aeroporto ao centro com o ponto em vermelho. 88
7.5 Campos de pressão ao nível médio do mar às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em hPa. 89
7.6 Campos de ômega em 500 hPa às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em Pa/s. 90
7.7 Campos de linhas de corrente em 250 hPa às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt. 91
7.8 Campos de linhas de corrente em 500 hPa às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt. 92
7.9 Campos de linhas de corrente em 850 hPa às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt. 93
7.10 Campos de umidade relativa em 925 hPa às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em % UR. 94
7.11 Campos de temperatura a 2m às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em °C. 94
7.12 Imagens de satélite da Região Sudeste no canal Infravermelho (IR) dos dias 17 e 18 dezembro de 2017. Temperatura de brilho GOES-13. a) 2030 UTC 17-dez, b) 2130 UTC 17-dez, c) 2230 UTC 17-dez, d) 2330 UTC 17-dez, e) 0030 UTC 18-dez, f) 0130 UTC 18-dez, g) 0230 UTC 18-dez, h) 0330 UTC 18-dez, e i) 0430 UTC 18-dez. Quadrado em vermelho: área do método DIST. Ponto em vermelho: aeroporto de GRU. 97

7.13 Campos que compõem a análise de mesoescala para o dia 17 dez 2017 às 1800 UTC: a) Cisalhamento do vento entre 0 - 6 km; b) Advecção de temperatura em 775 hPa; c) Ômega em 800 hPa; d) Levantamento em 4 camadas; e) Índice SA-MCS e f) Imagem de satélite GOES 13 IR Ch.4. Linha em vermelho: limiar que contribui para o índice. Caixa em vermelho: Área do método DIST. Ponto central: Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos. 99
7.14 Séries temporais da fração de pontos de grade com ocorrência de precipitação para limiares de chuva moderada e forte (FRAC). 101
7.15 Séries temporais dos valores de precipitação máxima na caixa centrada no aeroporto (GFS-linha azul), valores de intensidade coletados na estação do aeroporto (medida pontual-linha amarela) e valores observados utilizando o MERGE (linha verde). 102
7.16 Série temporal utilizando o método DIST com valores de ocorrência de precipitação máxima (PMAX): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km. . . 103
7.17 Séries temporais para a variável vento: a) Ciclo diário da velocidade média e máxima do vento registrado na estação SBGR para o mês de dezembro de 2017; e b) Série temporal observada na estação nos dias 17 e 18 de dezembro de 2017. 104
7.18 Séries temporais com valores de DIF. DIF-MENSAL (linha amarela), DIF-OBS (valor pontual da estação - linha verde) e DIF-GFS (linha azul).105
7.19 Série temporal do ponto de grade que contém as informações da estação meteorológica SBGR - (DIF): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km. . . . 106

9.1 Série temporal com as simulações no domínio de 9 km, dados do CMORPH e observados na estação. PMAX - *Outliers* 124
9.2 Estudo de caso 1 - Comparações entre os dados do CMORPH e as simulações no domínio de 9 km (WRF) - às 2030 UTC do dia 10 de março de 2016. PMAX - *Outliers*. 125
9.3 Série temporal com as simulações no domínio de 3 km, dados do CMORPH e observados na estação. PMAX - Mediana. 126
9.4 Estudo de caso 1 - Comparações entre os dados do CMORPH e as simulações no domínio de 3 km (WRF) - às 2030 UTC do dia 10 de março de 2016. PMAX - Mediana. 127
9.5 Série temporal com as simulações no domínio de 9 km, dados de DIF para o ponto centrado no aeroporto. DIF - Dispersão. 128
9.6 Série temporal com as simulações no domínio de 3 km, dados de DIFMAX para cada ponto de grade da caixa DIST. 129

LISTA DE TABELAS

Pág.

4.1 Esquematização das configurações das grades aninhadas do modelo WRF. 20
4.2 Esquematização dos processos físicos e o número de opções disponibilizados para implementação no modelo WRF. 21
4.3 Nomes das parametrizações utilizadas. 23
4.4 Configurações das parametrizações físicas utilizadas nas simulações do modelo WRF nas grades aninhadas d01 e d02. Os membros do *ensemble* de A1 até A6 representam as configurações utilizadas em diferentes centros operacionais e os membros A7, A8 e A9 são configurações escolhidas pelo autor depois de uma análise de estudos acadêmicos realizados no Brasil. 24

8.1 Resumo dos resultados obtidos nos 3 estudos de casos utilizando os modelos GFS, WRF 9 km e WRF 3 km. Análise de FRAC, instante e intervalo de ocorrência para os limiares de precipitação moderada, forte e PMAX. 110
8.2 Resumo dos resultados obtidos nos 3 estudos de casos utilizando os modelos GFS, WRF 9 km e WRF 3 km. Análise do valores de DIF, instante e intervalo de ocorrência para um evento de rajada. 111
8.3 Análise individual dos resultados obtidos em cada estudo de caso utilizando o *boxplot* através das medidas estatísticas dispersão, mediana e *outliers*. Precipitação forte - Domínio de 9 km. 113
8.4 Análise individual dos resultados obtidos em cada estudo de caso utilizando o *boxplot* através das medidas estatísticas dispersão, mediana e *outliers*. Precipitação forte - Domínio de 3 km. 114
8.5 Análise individual dos resultados obtidos em cada estudo de caso utilizando o *boxplot* através das medidas estatísticas dispersão, mediana e *outliers*. PMAX - Domínio de 9 km. 115
8.6 Análise individual dos resultados obtidos em cada estudo de caso utilizando o *boxplot* através das medidas estatísticas dispersão, mediana e *outliers*. PMAX - Domínio de 3 km. 116
8.7 Análise individual dos resultados obtidos em cada estudo de caso utilizando o *boxplot* através das medidas estatísticas dispersão, mediana e *outliers*. DIF - Domínio de 9 km. 118

8.8 Análise individual dos resultados obtidos em cada estudo de caso utilizando o *boxplot* através das medidas estatísticas dispersão, mediana e *outliers*. DIF - Domínio de 3 km. 119

A.1 Análise das parametrizações e espaçamento de grade utilizados em estudos científicos com o modelo WRF em diversas regiões do país. 146

B.1 Tempo de CPU das simulações do modelo WRF. 148

C.1 Variáveis utilizadas nos estudos de casos: dados observado, GFS e WRF. 149

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APP-SP	–	Controle de Aproximação de São Paulo
CIMAER	–	Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica
CLP	–	Camada limite planetária
CMORPH	–	*Climate prediction center MORPHing*
CNMA	–	Centro Nacional de Meteorologia Aeronáutica
CPTEC	–	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CU*p*	–	Parametrização de *Cumulus* (*cu_physics*)
DHN	–	Diretoria de Hidrografia e Navegação
DIF	–	Método da diferença
DIFMAX	–	Método da diferença em cada ponto de grade
DIST	–	Método de distribuição
DSA	–	Divisão de Satélites Ambientais
FUNCEME	–	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GFS	–	*Global Forecast System*
GOES 13	–	*Geostationary Operational Environmental Satellite* 13
GPT	–	Grupo de Previsão de Tempo
GRU	–	Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos
IAE	–	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IAG	–	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
ICEA	–	Instituto de Controle do Espaço Aéreo
INFRAERO	–	Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JST	–	Jato Subtropical
METAR	–	*METeorological Aerodrome Report*
MP*p*	–	Parametrização de microfísica (*mp_physics*)
MPE	–	*Multiphysics ensemble*
NCAR	–	*National Center for Atmospheric Research*
NCEP	–	*National Center for Environmental Prediction*
NOAA	–	*National Oceanic and Atmospheric Administration's*
PB*p*	–	Parametrização de Camada Limite Planetária (*bl_pbl_physics*)
PNT	–	Previsão Numérica do Tempo
RL*p*	–	Parametrização de Radiação de Onda Longa (*ra_lw_physics*)
RS*p*	–	Parametrização de Radiação de Onda Curta (*ra_sw_physics*)
SA-MCS	–	Índice de previsão de SCM para América do Sul
SAR	–	Simulações em alta resolução
SBGR	–	Estação Meteorológica de Superfície de Guarulhos
SCM	–	Sistema Convectivo de Mesoescala
SC*p*	–	Parametrização de Camada de Superficial (*sf_sfclay_physics*)
SF	–	Sistema Frontal
SF*p*	–	Parametrização de Superfície (*sf_surface_physics*)
SOS-CHUVA	–	Sistema de Observação e Previsão de Tempo Severo

TAF	–	*Terminal Aerodrome Forecast*
TB	–	Temperatura de brilho
TMA-SP	–	Área de Controle Terminal São Paulo
UTC	–	*Universal Time Coordinated*
WRF	–	*Weather Research and Forecasting*

LISTA DE SÍMBOLOS

dx	–	Espaçamento horizontal de grade - eixo x
dy	–	Espaçamento horizontal de grade - eixo y
h	–	Horas
hPa	–	Hectopascal
m	–	Metro
min	–	Minuto
mm	–	Milímetro
m/s	–	Metro por segundo
km	–	Quilômetro
km/h	–	Quilômetros por hora
kt	–	Velocidade em nó
s	–	Segundo

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO **1**
1.1 Objetivo geral 3
1.1.1 Objetivos específicos 3

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **5**
2.1 Simulação em alta resolução com modelos regionais 5
2.2 Previsão por conjuntos (*ensemble*) em simulações com modelos regionais 6

3 MATERIAL **9**
3.1 Região de estudo 9
3.2 Dados 13
3.2.1 Dados observacionais 13
3.2.2 Informações Sinóticas 14
3.2.3 Informações de Mesoescala 14
3.3 Modelo WRF 14

4 METODOLOGIA **17**
4.1 Escolha dos eventos 17
4.2 Simulações 18
4.3 Comparação entre previsões e observações 24

5 ESTUDO DE CASO 1 . . . . . **29**
5.1 Descrição do caso e análise sinótica 29
5.2 Análise de mesoescala 38
5.3 GFS e simulações com o WRF 43
5.3.1 Precipitação 43
5.3.2 Vento 48
5.4 Conclusões parciais 54

6 ESTUDO DE CASO 2 . . . . . **57**
6.1 Descrição do caso e análise sinótica 57
6.2 Análise de mesoescala 66
6.3 GFS e simulações com o WRF 72
6.3.1 Precipitação 72

6.3.2 Vento 77
6.4 Conclusões parciais 80

7 ESTUDO DE CASO 3 83
7.1 Descrição do caso e análise sinótica 83
7.2 Análise de mesoescala 95
7.3 GFS e simulações com o WRF 99
7.3.1 Precipitação 99
7.3.2 Vento 104
7.4 Conclusões parciais 107

8 ESTUDO DOS MEMBROS DO *ENSEMBLE* 109
8.1 Análise integrada 109
8.2 Análise individual dos membros 111
8.2.1 Precipitação 111
8.2.2 Vento 117
8.3 Discussão 120

9 ANÁLISES ADICIONAIS 123
9.1 Precipitação 123
9.2 Vento 128

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS 131

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 135

APÊNDICE A - ESTUDOS ACADÊMICOS COM O MODELO WRF 145
A.1 Resumo de estudos Acadêmicos com o modelo WRF. 145

APÊNDICE B - TEMPO DE PROCESSAMENTO DAS SIMULAÇÕES 147
B.1 Tempo de CPU utilizado nas simulações dos membros do modelo WRF. . 148

APÊNDICE C - VARIÁVEIS 149
C.1 Resumo das variáveis que foram utilizadas nos estudos de caso: observado, GFS e WRF. 149

APÊNDICE D - POTENCIAL DE OCORRÊNCIA DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA PARA A AMÉRICA DO SUL - ÍNDICE SA-MCS 151

1 INTRODUÇÃO

Diversas áreas têm sido beneficiadas com o avanço computacional verificado nas últimas décadas. Na previsão numérica do tempo (PNT), esse avanço tem tornado viável a execução de simulações em resoluções cada vez mais altas. Embora o aumento da resolução *per se* não garanta sempre um melhor desempenho da PNT (MASS et al., 2002), atualmente há o entendimento de que as simulações em alta resolução (SAR) têm o potencial de representar mais realisticamente aspectos relacionados a escalas locais, como circulações de brisa (p. ex., brisas fluviais; MATOS; COHEN, 2016) e o padrão espacial das células convectivas em tempestades (TAO et al., 2016).

Em eventos de tempestades severas, embora características das células convectivas simuladas (como extensão, intensidade e quantidade) sejam mais realistas em SAR, raramente a localização espacial e temporal das células simuladas coincide com as observações (NIELSEN; SCHUMACHER, 2016). Isso leva a uma dificuldade na interpretação adequada dos resultados das SAR, pois "*high-resolution models may produce wonderfully detailed, but inaccurate, features, making such forecasts unfit for direct public dissemination*" (ROEBBER et al., 2004, p. 941). A dificuldade também inclui a avaliação do desempenho das SAR, pois as métricas tradicionais de verificação espacial baseadas no acerto ou erro nos pontos de grade penalizam duplamente os erros de localização (EBERT, 2008). Logo, atualmente, pode-se notar uma situação contraditória: por um lado, da parte de gestores e desenvolvedores, são dispendidos esforços crescentes para implementar a PNT em alta resolução seguindo a tendência mundial; por outro lado, da parte dos meteorologistas previsores, existe cada vez mais a dificuldade em tornar os benefícios potenciais das SAR em realidade.

Um fator que contribui para essa situação contraditória é que poucos trabalhos científicos abordam o problema de testar ou avaliar metodologias que aproveitem as informações úteis das SAR (mesmo havendo erros de localização espacial e temporal) para condições e locais específicos no Brasil, pois a efetividade das metodologias não é uniforme. Nesse contexto, o presente trabalho enfoca o problema de verificar a utilidade de SAR na previsão da ocorrência de eventos de tempo severo sobre o Aeroporto Internacional de São Paulo – Guarulhos (GRU), que é um dos aeroportos mais importantes para o tráfego aéreo nacional. Escolhe-se abordar eventos de tempo severo por duas razões: primeiro, a ocorrência desses eventos interfere seriamente nas operações aeronáuticas (não somente no Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos, mas também em outros, como o de Campo de Marte, Congonhas e Viracopos), podendo acarretar riscos à segurança devido, por exemplo,

ao aumento da carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo (ROCHA et al., 2017); segundo, de acordo com a literatura (p. ex., DASARI et al., 2017), as SAR tem o potencial de representar de forma mais precisa a severidade do fenômeno em relação à intensidade das rajadas e da precipitação. Devido a essa segunda razão, restringe-se a análise do trabalho a duas variáveis: vento e precipitação. Por simplicidade, opta-se também por avaliar um número limitado de eventos (3 eventos recentes) sob a mesma condição sinótica (sistema frontal sobre GRU) para analisar cada evento de forma detalhada e minimizar o efeito das diferenças da condição sinótica no desempenho das simulações.

Um aspecto importante é a escolha da(s) metodologia(s) para extrair informações úteis das SAR. Para que as contribuições do trabalho possam ser posteriormente adaptadas ao ambiente operacional, opta-se pelo princípio de escolher metodologias mais simples, que possam ser implementadas de forma facilitada e entendidas diretamente.

Em relação aos erros de localização espacial em SAR, há vários métodos para diagnosticá-los ou atenuá-los (GILLELAND et al., 2010). Um dos mais simples consiste em suavizar os campos, o que é útil para fins de verificação em relação a campos observados em resolução mais baixa, mas contraria os motivos do uso de resoluções mais altas. Um outro método simples, chamado de DIST (MARSIGLI et al., 2008), consiste em fixar uma área retangular, chamada de caixa ("*box*"), centrada na localidade de interesse, e obter estatísticas dos valores contidos na caixa, como a fração de valores acima de um limiar, o valor máximo na caixa, etc. Essas estatísticas são adequadas por preservarem informações da alta resolução e são facilmente computadas; devido a isso, o método DIST é adotado neste trabalho.

Nas escalas da previsão do tempo, para melhorar o desempenho das simulações numéricas, em geral, e das SAR, em particular, há algumas possibilidades: aprimoramento dos esquemas de parametrização dos processos físicos (p. ex., ZHENG et al., 2016), assimilação de dados (p. ex., HERDIES et al., 2008) e uso da previsão por conjuntos (*ensemble*) (p. ex., SCHWARTZ; SOBASH, 2017). Dessas possibilidades, uma das mais simples em termos de desenvolvimento e implementação é o *multiphysics ensemble* (MPE), que consiste em gerar os diferentes membros por meio da mudança do conjunto de esquemas de parametrização utilizados nas simulações. Obviamente, a facilidade de implementação é válida para modelos que possuam mais de uma (ou algumas) opções de esquemas de parametrização para cada processo físico. Apesar das dificuldades na sua fundamentação teórica (HOUTEKAMER, 2011), o MPE é re-

conhecido como um método eficaz de aumento do desempenho das SAR (CLARK et al., 2008). Devido às suas vantagens, o MPE é adotado neste trabalho.

Além da facilidade de implementação e interpretação, as metodologias adotadas neste trabalho têm a vantagem de não excluírem outras melhorias no desempenho das SAR. Menores erros de localização devido à assimilação de dados (p. ex., FERREIRA et al., 2017) permitem a redução da caixa do método DIST, o que tornaria o produto mais preciso espacialmente. Aprimoramentos nos esquemas de parametrização (p. ex., TAO et al., 2016) poderiam ser incluídos como novos membros no *ensemble*.

1.1 Objetivo geral

Avaliar os eventos de tempo severo sobre a região do Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos sob condições sinóticas semelhantes.

1.1.1 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho das simulações em alta resolução utilizando a técnica do MPE;
- Estudar observacionalmente os 3 eventos de tempo severo, atentando-se às condições em escala regional favoráveis à formação dos núcleos convectivos associados ao evento; e
- Avaliar o desempenho das simulações por meio do método DIST para os 3 eventos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados brevemente alguns estudos sobre temas abordados no trabalho: simulações em alta resolução com modelos regionais e previsão por conjunto em modelos regionais. Cabe mencionar que a literatura sobre cada um dos temas é muito extensa. Por isso, a revisão apresenta somente alguns trabalhos que ilustram aspectos específicos dos temas.

2.1 Simulação em alta resolução com modelos regionais

Embora, em geral, a literatura mostre que o aumento da resolução horizontal leva a um melhor desempenho das simulações, isso não é uma regra (MASS et al., 2002). O trabalho realizado por Nogueira (2010) mostra que o aumento da resolução quando utilizando esquemas implícito e explícito tende a representar bem a intensidade da chuva (grade de 9 e 3 km). Porém, ocorre uma superestimação da extensão das áreas de precipitação. Quando utilizado somente esquemas explícitos, os resultados tende a limitar realisticamente a extensão das áreas de chuva em núcleos de precipitação. Observa-se nesse contexto que os eventos necessariamente não apresentam um melhor desempenho ao aumento da resolução e necessitam ser analisados caso a caso.

Para a precipitação, os dois trabalhos a seguir ilustram o desempenho de SAR.

Roberts e Lean (2008) verificaram em qual resolução o modelo regional do "*Unified Model*" do "*Met Office*" seria capaz de produzir as melhores previsões de precipitação. Simulações com espaçamentos horizontais de 12, 4 e 1 km foram comparadas. O melhor desempenho foi obtido com o espaçamento de 1 km, exceto para as menores escalas. Não houve ganho substancial ao se passar do espaçamento de 12 km para 4 km.

Basso et al. (2014) realizaram simulações com o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) para domínios com espaçamentos horizontais de 18, 6, 2 e 1 km. Os autores mostraram que, para 24 e 48 h, o modelo conseguiu representar a precipitação acumulada para a região sul do Brasil aumentando a resolução, mas não foi capaz de obter um bom desempenho para acumulados de 6 e 12 h.

Para o vento, os dois trabalhos a seguir ilustram o desempenho de SAR.

Pinto et al. (2014) realizaram simulações com o modelo WRF para domínios com espaçamentos horizontais de 8, 2 e 0,5 km para o Estado de Alagoas. Os resultados

apresentaram melhor desempenho com o aumento da resolução em estimativas de velocidade e direção do vento para a região do agreste.

Iriza et al. (2016) realizaram SAR utilizando o modelo WRF para a Romênia. Domínios com espaçamento horizontal de 3 e 1 km foram utilizados, e as variáveis temperatura de 2 m e velocidade do vento a 10 m foram analisadas. Os experimentos foram realizados em duas épocas (verão e inverno). Os valores simulados superestimaram as observações. O melhor desempenho ocorreu no verão. Em geral, o desempenho no domínio com espaçamento de 1 km foi ligeiramente superior.

Para a melhoria do desempenho, Zheng et al. (2016) realizaram mudanças nas configurações no esquema de parametrização convectiva *Kain-Fritsch* para uso em SAR com o modelo WRF. Os experimentos foram realizados para a região sul das Grandes Planícies dos EUA e foram utilizados espaçamentos horizontais de 9 e 3 km durante a época do verão. Os resultados indicaram que mudanças no esquema de *Kain-Fritsch* proporcionaram uma melhora nas SAR. Os autores ressaltaram também que os padrões de intensidade da precipitação tendem a ser mais próximos das observações utilizando o *Kain-Fritsch* modificado.

2.2 Previsão por conjuntos (*ensemble*) em simulações com modelos regionais

Em muitos estudos, o problema está em comparar a previsão por conjuntos em resolução mais baixa com a previsão determinística de uma única SAR. Os estudos a seguir ilustram que um *ensemble* em uma dada resolução produz resultados compatíveis (e até melhores) que uma previsão determinística em resolução mais alta.

Atger (2001) verificou a previsão de eventos de forte precipitação em aplicação com SAR e previsões por conjuntos. Os resultados demonstraram que as previsões por conjunto com baixa resolução são melhores que as previsões de modelos determinísticos em SAR. O autor mostra que não houve diferenças significativas no desempenho quando os membros variaram de 21 para 51. Esse é um fator importante na aplicabilidade em ambientes operacionais.

Grimit e Mass (2002) verificaram um melhor desempenho de modelos de baixa resolução que utilizam previsões por conjunto, quando comparado a previsões únicas de SAR. Os autores mostram que previsões em alta resolução e previsões por conjuntos podem complementar para maximizar o benefícios de cada um.

Roebber et al. (2004) verificaram a aplicação em ambientes operacionais de previsões por conjuntos (*ensemble*) em SAR. Em geral, a previsão por conjuntos em resolução mais baixa complementa as informações de SAR. O estudo indica que o grande volume de informações produzidos pela previsão por conjuntos necessitam ser adequadamente sintetizados para poderem ser empregados diretamente em ambientes operacionais. A apresentação das informações de forma probabilística teria o potencial para solucionar as incertezas associadas a SAR com um único modelo.

Schwartz et al. (2009) realizaram experimentos com um modelo determinístico de 2 km (resolução) comparando com um conjunto de 10 membros de 4 km. As saídas dos modelos de 2 e 4 km foram comparadas com as previsões de 12 km do modelo de mesoescala norte americano (NAM). Os autores demonstraram que as simulações de 2 e 4 km complementam as informações do modelo operacional de 12 km. Os resultados mostram que os modelos de 2 e 4 km têm uma melhor habilidade em prever localização e intensidade de eventos extremos de precipitação. Os autores concluíram que há um ganho quando se diminui o espaçamento de grade de 12 km para 4 km, mas que este ganho não é tão substancial quando comparado a diminuição de espaçamento 4 km para 2 km. Sendo assim, o modelo de 4 km apresenta-se mais disponível para implementação em ambientes operacionais considerando-se o custo-benefício.

Theis et al. (2005) apresentaram uma solução de baixo custo para o emprego em ambientes operacionais, que utiliza as saídas do modelo determinístico de PNT com previsões probabilísticas de precipitação. Os resultados mostraram que as previsões probabilísticas superam as informações do modelo determinístico.

Para o Brasil, Silveira et al. (2013) aplicaram uma técnica de previsão de tempo por conjunto (*ensemble*) para a região Nordeste. O método utilizado para gerar os membros do *ensemble* consiste em diferentes conjuntos de parametrizações e esquemas de relaxamento Newtoniano. Os resultados mostraram que não é possível definir a melhor opção de combinações de parametrização quando se considera todos os níveis de pressão e todas as variáveis. Os resultados mostraram que em níveis mais altos (250 e 500 hPa) encontra-se dificuldade de prever a temperatura. Os autores mostraram que, para o vento, a previsão por conjunto tem um bom desempenho. Analisando a precipitação, os resultados indicaram que o *ensemble* médio pode melhorar o prazo de validade das previsões e torná-las mais confiáveis.

3 MATERIAL

3.1 Região de estudo

A região de estudo corresponde ao leste do Estado de São Paulo, onde se encontra a localidade de interesse, o Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos (23° 26' 08" S, 046° 28' 23" W; Figura 3.1). O aeroporto está a uma altitude de 750 m. Ao norte do aeroporto, há a cadeia de montanhas, denominada Serra da Mantiqueira, que se estende sobre a divisa entre os Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro. A Serra da Mantiqueira possui áreas elevadas e, em alguns locais, a altitude ultrapassa 1750 m. Ao sul do aeroporto, encontra-se a Serra do Mar cobrindo uma extensa faixa próximo à costa. Em alguns locais, a elevação da Serra do Mar supera 800 m.

Para a região do aeroporto, elabora-se e emite-se operacionalmente o código *Terminal Aerodrome Forecast* (TAF). O código TAF é uma descrição completa das condições meteorológicas previstas em um aeródromo (corresponde a uma área centrada no aeroporto de 16 km de raio) durante o período de validade (Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos realiza TAF de 30 horas), incluindo qualquer mudança considerada significativa para as operações aéreas (FORÇA AÉREA BRASILEIRA - FAB, 2017a).

Figura 3.1 - Localização da região de estudo (painel esquerdo) com mapa de elevação (painel direito) em metros. O ponto vermelho corresponde à localização do Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos.

Fonte: Produção do autor.

O aeroporto é um dos maiores do país e com a maior movimentação de cargas e passageiros (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC, 2016), e é gerenciado pelo Controle de Aproximação de São Paulo (APP-SP), órgão que define o fluxo de aproximação das aeronaves dentro de uma região chamada de Controle de Terminal de São Paulo (TMA-SP). Os aeroportos que compõem a TMA-SP encontram-se muito próximos, sendo um dos motivos para a escolha da região de estudo. As condições de tempo adversas sobre a região de estudo levam à adoção de medidas cautelares não somente para o Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos, mas também para outros aeroportos controlados pelo APP-SP (Aeroporto de São Paulo - Campo de Marte, Aeroporto Internacional de Viracopos - Campinas e Aeroporto de São Paulo - Congonhas).

A Figura 3.2 mostra o ciclo anual médio da precipitação sobre o Estado de São Paulo. Os maiores acumulados ocorrem entre os meses de dezembro, janeiro e fevereiro (verão austral), com um valor médio mensal de 220 mm, e os menores valores pluviométricos, na ordem de 45 mm, ocorrem nos meses de junho, julho e agosto (inverno austral).

Figura 3.2 - Precipitação média mensal no estado de São Paulo, calculada série temporal média espacial de precipitação no período de 1991 a 2007.

Fonte: Adaptado de Prado (2010).

Espacialmente, a distribuição da precipitação sobre o Estado de São Paulo é influenciada pelos atributos geográficos e pela dinâmica dos sistemas atmosféricos que atuam na área (CAVALCANTI, 2016). A distribuição pluviométrica é caracterizada por três áreas com totais de precipitação bem distintos (Figura 3.3). A primeira estende-se sobre a faixa litorânea do estado, onde os índices pluviométricos atingem médias anuais superiores a 2500 mm. Nessa área, um fator para a ocorrência de médias anuais tão elevadas é a disposição da Serra do Mar margeando o litoral do estado. A segunda área apresenta médias anuais próximas a 1600 mm e encontra-se disposta na direção N/S desde o norte do estado de São Paulo até a Serra do Mar ao sul. No verão, os Sistemas Frontais (SF) que perduram por alguns dias sobre a área são um dos fatores que favorecem a ocorrência dos elevados índices de precipitação. A oeste do estado, região mais para o interior do continente, encontramos a terceira área com médias anuais de aproximadamente 1300 mm, ou seja, menores que as demais áreas. A atuação de SFs na área é também responsável pelas médias anuais na área. No geral, o Estado de São Paulo apresenta índices pluviométricos com valores bem elevados ao longo do ano e o papel da orografia da região é importante sobre o leste do estado.

Figura 3.3 - Precipitação média na região Sudeste entre 1961 e 1990.

Fonte: Cavalcanti (2016).

A Figura 3.4 mostra a variação espacial da temperatura média anual na região Sudeste. De acordo com Cavalcanti (2016) o Estado de São Paulo apresenta grande amplitude térmica, podendo chegar a valores superiores a 20 °C em 24 horas em alguns casos. Essa variação corresponde a regiões mais para interior do estado (continentalidade), pois no litoral o oceano tem um papel regulador e induz amplitudes menores (maritimidade). Em relação à temperatura média anual, o Estado de São Paulo apresenta três regiões distintas, sendo a primeira localizada a noroeste do Estado e litoral norte, onde as temperaturas médias anuais podem atingir valores entre 21 °C e 24 °C. A segunda região possui temperaturas médias anuais entre 19 °C e 21 °C e encontra-se na parte central do Estado e no litoral sul. Mais para o interior do estado (regiões mais elevadas próximas a Serra da Mantiqueira), as temperaturas um pouco mais baixas estão associadas à presença de áreas mais elevadas. Em relação ao ciclo anual, os menores valores de temperaturas médias mensais para o estado ocorrem no inverno.

Figura 3.4 - Temperaturas médias anuais da região Sudeste entre 1965 e 2005.

Fonte: Cavalcanti (2016).

3.2 Dados

3.2.1 Dados observacionais

Os dados meteorológicos de superfície usados neste trabalho foram disponibilizados pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO) que possui uma estação meteorológica de superfície no Aeroporto Internacional de São Paulo – Guarulhos. Diferentemente do informe *Meteorological Aerodrome Reports* (METAR), que possui informações horárias, os dados coletados na estação possuem alta frequência temporal (a cada minuto). A riqueza de informações no conjunto de dados contribui para verificação mais precisa dos intervalos de tempo com intensa precipitação e rajadas de ventos.

Os dados observacionais para comparação com as simulações do modelo WRF utilizaram as estimativas por satélite que consiste na técnica *Climate Prediction Center MORPHing technique* (CMORPH). Esses dados possuem resolução temporal de 30 min e resolução espacial de 8 km (JOYCE et al., 2004). Contudo, os dados brutos do CMORPH não estavam disponíveis para comparação com as simulações de um dos estudos de caso. Para esse estudo, os dados do produto MERGE disponibilizados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) / Instituto

Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) foram utilizados.

3.2.2 Informações Sinóticas

Para análise sinótica, utilizaram-se os boletins técnicos do Grupo de Previsão de Tempo (GPT) do CPTEC/INPE com as cartas sinóticas de superfície para os horários de 00 e 12 UTC. As imagens de satélites são disponibilizadas pela Divisão de Satélites Ambientais (DSA) do CPTEC/INPE. Essas informações são do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellites* 13 (GOES-13), posicionado no Equador em 75° W, em operação como "GOES East", com resolução temporal de 30 min e resolução espacial de 4 km.

As análises do *Global Forecast System* (GFS) foram utilizadas para confeccionar os campos de pressão ao nível médio do mar, ômega em 500 hPa, linhas de corrente em 250, 500 e 850 hPa, umidade relativa em 825 hPa e temperatura em 2 m. Com este conjunto de informações foi possível caracterizar os padrões sinóticos dos sistemas atuantes de grande escala nos eventos de tempo severo para cada estudo de caso.

3.2.3 Informações de Mesoescala

Com o objetivo de identificar as características meteorológicas de mesoescala, as imagens de satélite da região Sudeste (temperatura de brilho realçada - TB) disponibilizadas pela DSA foram utilizadas. Complementando as informações, os dados de radar de São Roque foram também utilizados. Os dados de radar foram obtidos do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA).

3.3 Modelo WRF

O modelo atmosférico que será utilizado é o modelo regional WRF na versão 3.9.1 (disponibilizado em 17 ago. 2017), sendo seu desenvolvimento de forma colaborativa entre os Centros de pesquisa *National Oceanic and Atmospheric Administration's* (NOAA) e o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Possui código aberto e de domínio público, sua plataforma flexível permite a implementação em computadores comuns e até em supercomputadores. Esses fatores fazem com que o modelo WRF seja muito utilizado na comunidade científica. No Brasil, destacam-se alguns centros que desenvolvem pesquisas ou executam operacionalmente o modelo WRF. São eles:

- Centro Nacional de Meteorologia Aeronáutica - CNMA (Comando da Aeronáutica);

- Instituto de Aeronáutica e Espaço - IAE (Comando da Aeronáutica);
- Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - IAG (Universidade de São Paulo);
- ICEA (Comando da Aeronáutica);
- Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN (Marinha do Brasil);
- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME (Governo do estado do Ceará); e
- Sistema de Observação e Previsão de Tempo Severo - SOS-CHUVA (CPTEC/INPE).

Uma documentação completa do modelo é descrita em Wang et al. (2017) e as informações técnicas podem ser consultadas em Skamarock et al. (2008).

4 METODOLOGIA

4.1 Escolha dos eventos

Na literatura, há definições distintas de tempo severo (PICOLO, 2018, pp. 32–33). Assim, para a escolha dos eventos, define-se como tempo severo a ocorrência de precipitação intensa e rajadas de vento. Por não incluir a ocorrência de granizo ou tornado, trata-se de uma definição menos restritiva que a adotada, por exemplo, por Johns e Doswell (1992).

Um levantamento preliminar dos eventos de tempo severo no Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos no período de 2016 e 2017 indicou que os eventos podem ocorrer sob condições sinóticas distintas, o que concorda com o trabalho de Picolo (2018). Assim, para haver certa uniformidade das condições sinóticas, opta-se por considerar somente os eventos de tempo severo que ocorreram sob a atuação de SFs. Normalmente, a mudança do tempo devido à atuação de SFs é bem prevista por modelos globais, como o GFS, com alguns dias de antecedência. Nessa situação, o desafio é prever a possibilidade de ocorrência de evento de tempo severo quando o SF atua.

Os eventos de tempo severo que ocorreram sob a atuação de SFs são então classificados, em ordem decrescente, qualitativamente conforme os danos reportados ao aeroporto (impacto no gerenciamento do fluxo de aeronaves) e cidades vizinhas, e quantitativamente pelo maior valor de intensidade de precipitação e rajada medidas no aeroporto. Dos classificados nas primeiras posições ao longo dos anos 2016 e 2017, escolhem-se 3 eventos: 10-mar-2016 (evento 1), 6-fev-2017 (evento 2) e 17-dez-2017 (evento 3).

Em muito casos, eventos de tempo severo estão associados a sistemas convectivos de mesoescala (SCM); assim, o índice de previsão de SCM para América do Sul (SA-MCS) elaborado por Rasera (2017) pode ser usado para diagnosticar evento de tempo severo, na fase de iniciação com antecedência de 6 horas. O índice elaborado para identificar eventos para a América do Sul é construído utilizando as análises do GFS com informações de 6 em 6 h (00, 06, 12 e 18 UTC) e os campos que compõem o índice de cisalhamento do vento de 0 - 6 km, advecção de temperatura em 775 hPa, ômega em 800 hPa e levantamento em 4 camadas foram gerados para calcular o potencial de ocorrência. O Apêndice D mostra como foi calculado cada variável na construção do índice SA-MCS.

4.2 Simulações

As simulações são realizadas no IAE em um microcomputador com as seguintes configurações: 64 bits, processador Intel Core I5-6500 3.20GHz com 4 núcleos, 8 GB de memória RAM e HD de 1 TB.

A Figura 4.1 ilustra como foram realizadas as simulações dos experimentos com o modelo WRF no domínio de 9 e 3 km. Inicialmente, nos três eventos as simulações têm início às 00 UTC e as primeiras 6 horas são descartadas como *spin-up* (PAI-MAZUMDER; MÖLDERS, 2009). As simulações possuem um período de integração de 48 h. Na figura, está mostrado o intervalo temporal em que os eventos severos com intensa precipitação e rajadas de vento foram registrados pela estação meteorológica do aeroporto, bem como as datas de ocorrência de cada evento. Os resultados serão mostrados de 12 h a 12 h UTC, pois os eventos ocorrem próximos à 00 UTC.

Figura 4.1 - Descrição temporal de inicialização do modelo WRF e de ocorrência dos eventos.

Fonte: Produção do autor.

As simulações ocorrem para a região leste do Estado de São Paulo com dois domínios aninhados no aeroporto, d01 (mais externo) e d02 (mais interno) (Figura 4.2). As informações do GFS foram utilizadas como condições iniciais e de fronteira no domínio de 9 km. Os dados do GFS possuem resolução horizontal de 0.25° por 0.25° (aproximadamente 27 x 27 km) e frequência temporal de 6 horas (00, 06, 12 e 18 UTC). Os dados são disponibilizados pelo *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION - NOAA, 2015)[1].

Figura 4.2 - Representação do domínio usado na avaliação das simulações, as caixas delimitando os domínios das simulações d01 e d02. Domínios aninhados centrado no Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos - 23° 26' 08" S e 046° 28' 23" W. Quadrado em vermelho: caixa do método DIST que será apresentado mais adiante.

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 4.1 mostra as configurações do modelo WRF para os domínios de 9 e 3

[1]Os dados provenientes do modelo global (GFS) estão disponibilizados no site: https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/

km. Foram utilizadas duas grades aninhadas e centradas em 23° 26' 08" S e 046° 28' 23" W. O tempo de simulações foi de 48 horas com inicialização às 00 UTC. As condições iniciais e de contorno foram obtidas nas análises do GFS, com espaçamento horizontal de 0.25° x 0.25°. A resolução temporal das saídas das simulações são de 30 min. A escolha das parametrizações constam na Tabela 4.4 onde foi realizado pesquisas em trabalhos científicos e centros que utilizam o modelo WRF no Brasil. Em relação ao número de níveis na vertical, como existe uma relação geral inversa entre o espaçamento horizontal e o número de níveis (SILVA, 2013; Figura 4.3), opta-se por utilizar 42 níveis (considerando o espaçamento do domínio mais interno, ou seja, de 3 km).

Tabela 4.1 - Esquematização das configurações das grades aninhadas do modelo WRF.

Parâmetros	Domínio d01	Domínio d02
Espaçamento horizontal	9 km	3 km
Pontos de grade dx e dy	80 x 80	79 x 82
Passo de tempo	30	10
Parametrização de *Cumulus*	Ligado	Desligado

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.3 - Resumo de espaçamentos horizontais *versus* resolução verticais.

Fonte: Adaptado de Silva (2013).

O número de esquemas de parametrização disponível para cada processo físico na versão 3.9.1 do modelo WRF está apresentado na Tabela 4.2 (WANG et al., 2017). Como o número de opções para cada processo é bastante grande, é necessário justificar a escolha da configuração dos membros do *multiphysics ensemble*. Por simplicidade, opta-se pelas configurações:

- usualmente encontradas em trabalhos acadêmicos ou científicos utilizando o modelo WRF para regiões do Brasil; ou
- utilizadas em simulações com o modelo WRF em centros operacionais de previsão do tempo.

Tabela 4.2 - Esquematização dos processos físicos e o número de opções disponibilizados para implementação no modelo WRF.

Parametrização	Opções	Variável
Microfísica	17	mp_physics
Radiação de Onda Longa	6	ra_lw_physics
Radiação de Onda Curta	8	ra_sw_physics
Camada Superficial	8	sf_sfclay_physics
Superfície	8	sf_surface_physics
Camada Limite Planetária	13	bl_pbl_physics
Cumulus	13	cu_physics

Fonte: Wang et al. (2017).

Os resultados do levantamento dos esquemas utilizados em trabalhos acadêmicos ou científicos está mostrado na Figura 4.4 (resultados completos na Tabela A.1). Os nomes das parametrizações utilizadas nos estudos acadêmicos e trabalhos científicos constam na Tabela 4.3. Na Figura 4.4a, nota-se que existe um maior número de trabalhos para as regiões Nordeste, Sudeste e Sul do país. As parametrizações de radiação de onda longa e curta não apresentam muita variação, pois mais de 80 % dos trabalhos utiliza a opção 1 (Figura 4.4c, d). As opções de camada superficial e processos de superfície mostram uma maior variação, mas mesmo assim houve um esquema dominante (mais de 50 % dos estudos): opções 1 e 2, respectivamente. As parametrizações com maior variação são as relacionadas à microfísica de nuvens, à Camada limite planetária (CLP) e à *cumulus*. Para essas parametrizações, há pelo

menos 2 opções com um grande número de trabalhos: para microfísica, opções 3 e 2; para CLP, 1 e 7; e para *cumulus*, 1 e 93. Para reduzir o número de membros, opta-se por variar somente os esquemas dos processos diretamente associados à produção de precipitação intensa: microfísica e *cumulus*. Formam-se, assim, 4 membros (microfísica: 2 e 3; *cumulus*: 1 e 93).

Figura 4.4 - Esquematização das diferentes parametrizações utilizadas em estudos acadêmicos no Brasil. A categoria "x" indica que algum esquema específico não foi informado no trabalho.

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.3 - Nomes das parametrizações utilizadas.

Físicas	Código de ativação	Nomes
Microfísica	3	WSM3
	8	Thompson
	2	Purdue Lin
	6	WSM6
	4	WSM5
Radiação de Onda Longa	1	RRTM
	4	RRTMG
Radiação de Onda Curta	1	Dudhia
	4	RRTMG
	2	Goddard
Camada Superficial	1	MM5
	7	Pleim-Xiu
	5	MYNN
	3	NCEP Global Forecast System
Superfície	2	Noah
	1	5-layer Thermal Diffusion
	7	Pleim-Xiu
CLP	1	Yonsei University
	8	Bougeault-Lacarrere
	12	Grenier-Bretherton-McCaa
	7	Asymmetric Convection
	2	Mellor-Yamada-janjic
	5	Mellor-Yamada Nakanichi Niino
Cumulus	1	Kain-Fritsch
	93	Grell-Devenyi
	2	Betts-Miller-Janjic
	3	Grell-Freitas
	6	Tiedtke

Fonte: Produção do autor.

Em relação às opções utilizadas em centros operacionais, são utilizadas as configurações dos seguintes centros: CNMA, SOS-CHUVA, DHN, FUNCEME, IAE e ICEA. Os esquemas de um dos centros (IAE) coincide com um dos membros da parte de trabalhos acadêmicos ou científicos. Assim, o número total de membros são 9 e os esquemas utilizados estão mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Configurações das parametrizações físicas utilizadas nas simulações do modelo WRF nas grades aninhadas d01 e d02. Os membros do *ensemble* de A1 até A6 representam as configurações utilizadas em diferentes centros operacionais e os membros A7, A8 e A9 são configurações escolhidas pelo autor depois de uma análise de estudos acadêmicos realizados no Brasil.

Variáveis	*A1*	*A2*	*A3*	*A4*	*A5*	*A6*	*A7*	*A8*	*A9*
mp_physics	10	6	4	4	3	10	3	2	2
ra_lw_physics	1	4	4	1	1	1	1	1	1
ra_sw_physics	1	4	4	1	1	1	1	1	1
sf_sfclay_physics	1	2	1	2	1	1	1	1	1
sf_surface_physics	2	2	2	2	2	2	2	2	2
bl_pbl_physics	1	2	12	2	1	1	1	1	1
cu_physics	93	3	1	3	1	1	93	93	1

Fonte: Produção do autor.

A1 - CNMA
A2 - SOS-CHUVA (Marcos Viana, comunicação pessoal, 2018)
A3 - DHN (Alexandre Gadelha, comunicação pessoal, 2018)
A4 - FUNCEME (Natanael Vieira de Sousa, comunicação pessoal, 2018)
A5 - IAE
A6 - ICEA
A7 - Pesquisa baseada na Figura 4.4
A8 - Pesquisa baseada na Figura 4.4
A9 - Pesquisa baseada na Figura 4.4

4.3 Comparação entre previsões e observações

Como os casos de tempo severo envolvem a ocorrência de valores altos de precipitação e velocidade do vento (conforme a definição de tempo severo adotada no trabalho), a comparação entre as previsões e as observações baseia-se nessas variáveis.

A avaliação dos produtos utilizando as métricas tradicionais de verificação espacial baseiam-se no acerto ou erro nos pontos de grade (ponto a ponto). Assim, devido à dificuldade de haver uma correspondência exata entre previsões e observações, as

métricas tradicionais penalizam duplamente os erros de localização. Por exemplo, se o sistema precipitante está deslocado em relação ao observado, há erro nos locais onde a precipitação foi prevista, mas não foi observado, e nos locais onde a precipitação não foi prevista, mas foi observada (EBERT, 2008). Como forma de atenuar a dupla penalização, utiliza-se para a variável de precipitação o método DIST. O método é muito simples e permite uma incerteza na correspondência entre as previsões e observações. Neste trabalho, para a precipitação, a comparação é feita em um domínio quadrado de 100 km de lado centrado no aeroporto, que é doravante chamado de caixa (Figura 4.2). Estatísticas das caixas correspondentes às saídas do modelo WRF a cada 30 min e observações são comparadas a cada membro do *ensemble*.

As estatísticas são descritas abaixo:

- Fração da área da caixa (FRAC) com precipitação moderada ou forte: área da caixa com intensidade maior que 1,25 mm/30 min dividido pela área total da caixa.
- FRAC com precipitação forte: área da caixa com intensidade maior que 5 mm/30 min dividido pela área total da caixa.
- Precipitação máxima na caixa (PMAX): maior valor de intensidade de precipitação na caixa.

Os limiares de 1,25 mm/30 min e 5 mm/30 min correspondem aos limiares de 2,5 mm/h e 10 mm/h utilizados pelo Comando da Aeronáutica (FORÇA AÉREA BRASILEIRA - FAB, 2017b). Para as observações, os valores de FRAC e PMAX são obtidos dos dados do CMORPH (casos 1 e 2) e do MERGE do CPTEC (caso 3, pois para esse caso não há dados do CMORPH disponíveis). Na comparação de PMAX, além dos valores provenientes do CMORPH e MERGE, utiliza-se também a série de intensidade medida no aeroporto.

No caso da velocidade do vento, a comparação é feita entre os valores previstos (GFS e WRF) no ponto de grade que contém o aeroporto e os valores medidos no aeroporto. A comparação na caixa não é realizada devido à aceleração do vento nos locais mais elevados da caixa (Subseção 5.3.2). Para minimizar o efeito do ciclo diário do vento (Subseção 5.3.2), a comparação é feita para a diferença (DIF) entre a velocidade do vento máximo no intervalo de 30 min (VMAX) e a velocidade do vento médio no intervalo (VMED). Velocidade do vento (VMAX) de 10 kt ou mais em relação ao VMED indicam ventos de rajada, ou seja, valores de DIF com 10 kt ou mais (FORÇA AÉREA BRASILEIRA - FAB, 2017b).

As variáveis específicas das saídas das previsões (GFS e WRF) e das variáveis disponibilizadas pela estação meteorológica de superfície de Guarulhos (SBGR) estão apresentadas no Apêndice C.

Para este estudo, aplicou-se o recurso gráfico *boxplot* na análise dos membros do *ensemble*. O gráfico do *boxplot* foi configurado na orientação vertical, com formato de "caixa e haste", permitindo a visualização da mediana, dispersão e *outliers*. No caso específico dos membros do *ensemble* deste estudo, os 9 valores referentes às simulações do WRF (membros) são integrados para criar um *boxplot* para cada passo de tempo de saída do modelo WRF (30 min). Vale ressaltar que o *boxplot* é um recurso gráfico que pode ser adaptado para um número maior de membros. Um exemplo está mostrado na Figura 4.5. Para um instante de tempo qualquer, os valores dos 9 membros são colocados em ordem decrescente e:

- A mediana é ocupada pela posição 5.
- A dispersão, em geral, é dada pelos membros nas posições 2, 3, 4, 6, 7 e 8.
- Os *outliers* (quando presentes) estão, em geral, nas posições 1 e 9. Como o interesse é pelos maiores valores de FRAC, PMAX e DIF, somente o *outlier* superior (posição 1) é analisado nos resultados. A simbologia que representa o *outlier* no *boxplot* é o simbolo "+".

Figura 4.5 - Exemplo de como será montada a do estrutura do *boxplot* para cada passo de tempo (30 min). Os membros do *ensemble* são classificados em ordem decrescente de valores.

Ordem decrescente	Membros do *Ensemble*	*Boxplot*
9	A6 = 43 kt	1 – V. Máx / *Outliers*
8	A3 = 19 kt	2 – Dispersão
7	A2 = 18 kt	3 – Dispersão
6	A7 = 12 kt	4 – Dispersão
5	A9 = 11 kt	5 – Mediana
4	A1 = 7 kt	6 – Dispersão
3	A4 = 4 kt	7 – Dispersão
2	A5 = 3 kt	8 – Dispersão
1	A8 = 1 kt	9 – V. Mín / *Outliers*

Fonte: Produção do autor.

Para ilustrar a forma de análise dos resultados, seja um aspecto específico (FRAC, PMAX ou DIF) de um evento estudado. As séries temporais dos valores observados, previstos pelo GFS e os *boxplot* do WRF estão plotados. O tempo severo ocorre em um intervalo (D_t) a partir de um instante (t_i), e isso aparece claramente como um pico na série observada. O valor do pico, D_t e t_i são bem representados pelas previsões do GFS ou pelos *boxplot* do WRF? Essa é a questão que norteia a análise dos resultados.

5 ESTUDO DE CASO 1

Neste capítulo, realiza-se o estudo observacional do evento de tempo severo que ocorreu entre os dias 10 e 11 de março de 2016 e afetou a região do Aeroporto Internacional São Paulo - Guarulhos.

5.1 Descrição do caso e análise sinótica

O evento consistiu na ocorrência de ventos fortes e intensa precipitação no Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos, que ficou fechado para pousos e decolagens durante seis horas a partir das 0250 UTC do dia 11 de março de 2016. A intensa precipitação alagou uma subestação de energia e algumas luzes da pista de pouso foram apagadas por medida de segurança. No total, segundo a administradora do aeroporto, seis voos foram cancelados e outros doze foram remanejados para outros aeroportos (GRU *Airport*[1]) .

O informe meteorológico da estação de Guarulhos registrou precipitação de moderada a forte das 2200 UTC do dia 10-mar às 0400 UTC do dia 11-mar. De um modo geral, os acumulados de precipitação durante esse intervalo de tempo são superiores a 1,25 mm/30 min, indicando precipitação intensa durante um grande intervalo de tempo no aeroporto. O que chama atenção nesse caso em particular são os dois picos de intensa precipitação às 2330 UTC dia 10-mar e 0030 UTC 11-mar (Figura 5.1a). Próximo a esse intervalo de tempo, a velocidade do vento alcançou picos de velocidade máxima superiores a 22 kt (Figura 5.1b). Os impactos atingiram outras localidades sob o mesmo evento, como o registrado na cidade de São Paulo, a chuva intensa e os ventos fortes destelharam casas, provocaram deslizamentos e inundações, e deixaram diversas regiões em estado de atenção. Houve o registro de uma vítima fatal na cidade de Guarulhos e outras 9 na Grande São Paulo (Veja *Online*[2]).

[1] Reportagem: site GRU *Airport*
[2] Reportagem: site Veja *Online*

Figura 5.1 - Série temporal com os dados automáticos da estação meteorológica de superfície de Guarulhos para os dias 10 e 11 de março de 2016: (a) Precipitação máxima e (b) Velocidade do vento máximo.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.2 mostra a carta sinótica de superfície traçada para o dia 11-mar 2016 às 12 UTC. No litoral do Estado de São Paulo verifica-se a presença de um SF associado a uma área de baixa pressão de 1004 hPa em 33° S/46° W. Nota-se que o ramo frio associado ao SF estende-se em direção ao litoral de São Paulo, porém sem penetrar no continente. No continente, verifica-se um canal de umidade passando pelos estados do Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais e leste de São Paulo. Esse canal que vem da Amazônia dá suporte às áreas de instabilidade no interior do estado de São Paulo fornecendo calor e umidade.

Figura 5.2 - Carta Sinótica de Superfície elaborada para o dia 11 de março de 2016 às 12 UTC.

Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE - Ministério da Ciência e Tecnologia - Brasil (2018).

A sequência de imagens de satélite (TB realçada do satélite GOES-13 no canal infravermelho) para a América do Sul das 0000 UTC do dia 10-mar a 0600 UTC do dia 11-mar de 2016 estão mostradas na Figura 5.3 para ilustrar o padrão de grande escala da nebulosidade associada ao SF. Às 0000 UTC do dia 10, nota-se uma extensa área de nebulosidade associada ao SF com muitos sistemas convectivos no seu interior (Figura 5.3a). Entre 0600 e 1200 UTC, há um enfraquecimento da nebulosidade e dos sistemas convectivos, e um lento deslocamento do SF para nordeste (Figura 5.3b, c). Às 1800 UTC, a nebulosidade reorganiza-se e atua sobre o Estado de São Paulo (Figura 5.3d), onde se nota a presença de alguns sistemas convectivos ainda esparsos. Essa banda de nebulosidade estende-se desde a região Norte, Centro-Oeste e atinge a região Sudeste do Brasil, configurando uma orientação NW/SE característico de SFs. Às 0000 UTC (11-mar), o SF afeta o estado de São Paulo e há claramente sistemas convectivos intensos e extensos atuando sobre a região de estudo (Figura 5.3e). Na sequência (0600 UTC do dia 11), há o enfraquecimento da nebulosidade e o seu deslocamento para leste (oceano) (Figura 5.3f).

Figura 5.3 - Imagens de satélite da América do Sul no canal Infravermelho (Ch.4) Temperatura de Brilho em °C: (a) 10-mar 2016 00 UTC, (b) 10-mar 2016 06 UTC, (c) 10-mar 2016 12 UTC, (d) 10-mar 2016 18 UTC, (e) 11-mar 2016 00 UTC e (f) 11-mar 2016 06UTC. Quadrado em vermelho: área DIST.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE - Ministério da Ciência e Tecnologia - Brasil (2018).

A Figura 5.4 mostra o acumulado diário estimado pela técnica CMORPH entre os dias 10 e 12 de março de 2016. Os maiores acumulados deslocam-se para nordeste, seguindo a propagação do SF. Sobre a região de interesse, acumulados superiores a 40 mm são registrados nos dias 11 e 12 de março. Esses valores refletem o evento de tempo severo que ocorreu na região do aeroporto entre os dias 10 e 11 de março.

Figura 5.4 - Campos de precipitação acumulada em 24 horas (CMORPH) para os dias 10, 11 e 12 de março de 2016 (região Sudeste). Região de estudo no *box* em vermelho (DIST) e aeroporto ao centro com o ponto em vermelho.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

No dia 9 às 1200 UTC, o campo de pressão ao nível médio do mar apresenta um centro de baixa pressão de 1002 hPa em 40° W e 33° S (ciclone) que está associado ao SF sobre a região Sul do país (Figura 5.5a). Um centro de alta pressão de 1040 hPa na retaguarda do SF (anticiclone) desloca-se para nordeste sobre o continente. No dia 10 às 1200 UTC, o SF atinge a região Sudeste (sul de SP), o centro de baixa pressão desloca-se para sudeste e o centro de alta pressão na retaguarda do SF enfraquece (1028 hPa). A massa de ar frio que se desloca para a região Sudeste no dia 10 contribui para o desenvolvimento de nebulosidade convectiva profunda à vanguarda do SF (Figura 5.5b). No dia 11 às 1200 UTC (Figura 5.5c), o sistema desloca-se para nordeste em direção ao Estado do Rio de Janeiro, e o anticiclone pós-frontal enfraquece-se ainda mais.

Figura 5.5 - Campos de pressão ao nível médio do mar às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Unidade em hPa.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.6 mostra os movimentos verticais em 500 hPa. Há movimento ascendente expressivo sobre o cavado associado ao SF que se desloca para nordeste entre os dias 9 e 11. Esse movimento ascendente está relacionado às áreas com convecção profunda observadas nas imagens de satélite.

Figura 5.6 - Campos de ômega em 500 hPa às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Unidade em Pa/s.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.7 mostra a circulação em altos níveis (250 hPa) para os dias 09, 10 e 11 de março de 2016. Na sequência de campos, nota-se o deslocamento do Jato Subtropical (JST) para leste, onde contribui para a convergência de umidade em baixos níveis e formação de áreas de instabilidades quando alcança o interior de São Paulo (dia 11-mar).

Figura 5.7 - Campos de linhas de corrente em 250 hPa às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

Em 500 hPa (Figura 5.8), o máximo de vento destacado nas áreas com ventos superiores a 30 kt sobre áreas do sul e sudeste do país está associado à corrente de jato presente em altos níveis. O eixo do cavado observado sobre a região central da Argentina mostra o desenvolvimento do SF em superfície, pois a advecção de ar frio abaixo do eixo do cavado em 500 hPa tende a aprofundá-lo.

Figura 5.8 - Campos de linhas de corrente em 500 hPa às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

Em baixos níveis (850 hPa), a Figura 5.9 mostra o padrão de circulação dos ventos oriundos da região Norte e contribui para a convergência do ar quente e úmido da Amazônia sobre a região sudeste do país. O cavado em baixos níveis sobre a região sudeste/sul do país está associado ao SF.

Figura 5.9 - Campos de linhas de corrente em 850 hPa às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.10 mostra o campo de umidade relativa em 925 hPa. Há valores elevados de umidade em grande parte do território do Brasil, e o SF separa a massa de ar mais úmida da mais seca. A presença de umidade mais elevada no SF favorece a formação de nuvens convectivas.

Figura 5.10 - Campos de umidade relativa em 925 hPa às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Unidade em % UR.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.11 mostra o campo de temperatura a 2 m. Há um claro gradiente de temperatura transversalmente ao SF. Esse gradiente no oeste do estado de São Paulo possui valores superiores a 8 °C.

Figura 5.11 - Campos de temperatura a 2 m às 12 UTC para os dias: a) 09 mar 2016; b) 10 mar 2016; e c) 11 mar 2016. Dados de análise do GFS. Unidade em °C.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

5.2 Análise de mesoescala

Às 18 UTC do dia 10-mar, a região de interesse encontra-se sob um padrão de nebulosidade bem organizado (Figura 5.12), que se estende do oceano e adentra o estado de São Paulo, associado ao SF descrito na seção 5.1. Sobre o estado, a nebulosidade contém vários sistemas convectivos com alguns núcleos mais intensos (TB < -70 °C) no seu extremo noroeste (letra B na Figura 5.12a). Próximo à região de estudo, há um sistema menos intenso e alongado na direção SO-NE (letra A na Figura 5.12a) que pode estar associado às elevações da Serra da Mantiqueira.

Nas 5 horas subsequentes, no Estado de São Paulo, os sistemas convectivos existentes intensificam-se, expandem-se, deslocam-se e eventualmente se unem (*MERGE*), e ocorre também a iniciação de novos sistemas. Às 20 UTC, nota-se que houve o deslocamento dos núcleos do noroeste do estado para leste/sudeste (letra C na Figura 5.12c), o surgimento de núcleos convectivos no interior do estado (letra D na Figura 5.12c) e o surgimento de sistemas convectivos sobre o leste do estado. Às 21 UTC, ocorre a união do sistema convectivo proveniente do noroeste com o que se encontra no interior do Estado de São Paulo (letra E da Figura 5.12d). O sistema resultante possui núcleos intensos e horizontalmente extensos. De 21 a 23 UTC, esse sistema expande-se para norte, alongando-se na direção meridional e desloca-se para sudeste, atingindo a sua máxima extensão horizontal às 23 UTC (letra F na Figura 5.12f). Nesse horário, o sistema contém um núcleo convectivo extenso e com forma bem

arredondada sobre a região de interesse. A partir de 00 UTC de 11-mar (por exemplo, Figura 5.12g), observa-se o deslocamento de todo o padrão de nebulosidade para leste/sudeste e o enfraquecimento dos sistemas e dos núcleos convectivos.

Figura 5.12 - Imagens de satélite da Região Sudeste no canal Infravermelho IR entre os dias 10 e 11 de março de 2016. Temperatura de brilho GOES-13. a) 18 UTC 10-mar, b) 19 UTC 10-mar, c) 20 UTC 10-mar, d) 21 UTC 10-mar, e) 22 UTC 10-mar, f) 23 UTC 10-mar e g) 00 UTC 11-mar. Quadrado em vermelho: área do método DIST. Ponto em vermelho: aeroporto de GRU.

Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE - Ministério da Ciência e Tecnologia - Brasil (2018).

As imagens de radar mostram que, entre 2100 e 0100 UTC, as células convectivas com maior refletividade deslocam-se do interior do estado para sudeste, acompanhando o sentido de propagação do sistema convectivo identificado nas imagens de satélite (Figura 5.13). As células convectivas atingem a região do aeroporto às 2230 UTC (Figura 5.13d), e o alto valor de refletividade das células (entre 40 e 50 dBZ) indica uma condição de tempo severo sobre o aeroporto e o seu entorno (QUEIROZ, 2008). A atuação dessa célula explica o pico de precipitação em torno de 23 UTC. Às 0030 UTC, quando o sistema encontra-se em dissipação, a região do aeroporto é atingida novamente por uma célula convectiva com alta refletividade (Figura 5.13g). Nesse momento, ocorre o máximo de intensidade de precipitação no aeroporto (≈15 mm em 30 min).

Figura 5.13 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar de São Roque localizado em São Paulo. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 10 mar 2016 2100 UTC, (b) 10 mar 2016 2130 UTC, (c) 10 mar 2016 2200 UTC, (d) 10 mar 2016 2230 UTC, (e) 10 mar 2016 2300 UTC, (f) 10 mar 2016 2330 UTC, (g) 11 mar 2016 0030 UTC e (h) 11 mar 2016 0100 UTC. Radar do DECEA - CAPPI 3 km. Unidade em dBZ.

Fonte: Produção do autor.

Uma condição antecedente imprescindível para a atuação do núcleo convectivo sobre a região de interesse por volta de 23 UTC – e que causou o evento de tempo severo – consistiu na iniciação de sistemas convectivos de mesoescala no interior do estado entre 18 e 20 UTC do dia 10 mar 2016. O campo do índice SA-MCS (Figura 5.14e) mostra que, às 18 UTC, havia condições favoráveis à formação do SCM em grande parte do Estado de São Paulo. Os máximos do índice ocorrem sobre o litoral sul do estado e próximo à Serra da Mantiqueira. Sobre o litoral sul, o máximo do índice pode estar relacionado ao sistema convectivo que se desenvolve entre 21 e 23 UTC (Letra F - 23 UTC - Figura 5.12f) com menor extensão horizontal (esse sistema une-se ao proveniente do interior do continente às 00 UTC). Sobre a Serra da Mantiqueira, o máximo do índice pode estar relacionado aos sistemas convectivos que se iniciam entre 18 e 20 UTC. No interior do estado de São Paulo, os valores do índice são menores, mas indicam maior potencial de iniciação de SCM bem próximo à região onde, de fato, ocorreu a iniciação às 20 UTC (Letra D - Figura 5.12c). Esse maior potencial provém de dois fatores: valores muito negativos do índice de levantamento em 4 camadas, indicando a presença de condições instáveis, e valores negativos do índice ômega, indicando a presença de uma forçante de levantamento em baixos níveis. Como os valores muito negativos do índice do levantamento em 4 camadas abrangem uma área muito extensa (todo o Estado de São Paulo), a localização dos maiores valores do índice SA-MCS no interior do estado depende da distribuição espacial dos valores mais negativos do índice ômega. Assim, sobre o interior do estado de São Paulo, a presença de condições instáveis e forçamento vertical em baixos níveis no meio da tarde (18 UTC) favoreceu a iniciação de sistemas convectivos de mesoescala no início da noite (20 UTC - Figura 5.12c).

Figura 5.14 - Campos que compõem a análise de mesoescala para o dia 10 mar 2016 às 1800 UTC: a) Cisalhamento do vento entre 0 - 6 km; b) Advecção de temperatura em 775 hPa; c) Ômega em 800 hPa; d) Levantamento em 4 camadas; e) Índice SA-MCS e f) Imagem de satélite GOES 13 IR Ch.4. Linha em vermelho: limiar que contribui para o índice. Caixa em vermelho: Área do método DIST. Ponto central: Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos.

Fonte: Produção do autor.

5.3 GFS e simulações com o WRF

5.3.1 Precipitação

A Figura 5.15 mostra as séries temporais de FRAC para os dois domínios (9 e 3 km) e os dois limiares (1,25 e 5 mm/30 min). Durante o caso, os valores observados

de FRAC são elevados, podendo chegar a 100 % em alguns horários. Nota-se o bom desempenho do GFS: apesar da menor frequência temporal (saídas a cada 3 h), o GFS consegue estimar bem a FRAC utilizando o limiar de 1,25 mm/30 min e o intervalo temporal de ocorrência (mais de 80 % da caixa às 00 UTC do dia 11-mar). Quando se verifica o desempenho dos membros do *ensemble*, as simulações com o WRF subestimam FRAC de forma expressiva, sendo que o domínio de 3 km apresenta os maiores erros. Por exemplo, para o limiar de 1,25 mm/30 min (precipitação moderada ou forte), a FRAC observada atinge 100 % às 0100 UTC do dia 11-mar em ambos os domínios (Figura 5.15a, b). Nesse horário, no domínio de 3 km, os *outliers* chegam a 20 %, mas a mediana do *ensemble* fica abaixo de 5 %; no domínio de 9 km, a mediana do *ensemble* encontra-se entre 10 e 20 %, e como há muita dispersão, alguns membros podem chegar a quase 40 %. Mas esses valores são muito inferiores aos observados. Apesar do erro na FRAC, as simulações com o WRF são capazes de indicar o intervalo temporal em que ocorre a precipitação acima de 1,25 mm/30 min: quando ocorre precipitação desse tipo, há maior dispersão dos membros no domínio de 9 km e maiores valores dos *outliers* no domínio de 3 km. Os picos de dispersão e dos *outliers*, no entanto, estão antecipados em algumas horas em relação ao instante em que há o pico observado de FRAC.

Para o limiar de 5 mm/30 min (precipitação forte), os valores do GFS subestimam as observações de FRAC, mas conseguem indicar o intervalo temporal de ocorrência de precipitação forte. Nas simulações, a FRAC simulada pelo WRF em ambos os domínios é quase nula, o que difere muito da FRAC observada de quase 100 % em torno de 0100 UTC (Figura 5.15c, d). No entanto, as simulações indicam o intervalo temporal de ocorrência de precipitação forte por meio da presença de *outliers* em ambos os domínios.

Portanto, as simulações com o modelo WRF não foram capazes de representar os valores observados de FRAC durante o caso, tendo o GFS um desempenho melhor para os dois limiares. Por outro lado, as simulações são capazes de indicar o intervalo temporal de ocorrência de precipitação moderada a forte por meio da maior dispersão entre os membros ou dos maiores *outliers*.

Figura 5.15 - Séries temporais da fração de pontos de grade com ocorrência de precipitação para limiares de chuva moderada e forte (FRAC).

(a)

(b)

(c)

(d)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.16 mostra as séries temporais de PMAX com valores de intensidade coletados na estação (medida pontual - OBS), valores observados na caixa utilizando o CMORPH e valores previstos no modelo GFS. No aeroporto, ocorre precipitação de maior intensidade de 2330 UTC até 0130 UTC, com um pico principal de 16 mm/30 min às 0100 UTC. Na caixa, precipitação de maior intensidade é encontrada em um intervalo temporal maior. O pico principal ocorre às 2100 UTC e valores de intensidade altos (próximos a 15 mm/30 min) mantêm-se de 2330 a 0200 UTC. O GFS mostra valores de PMAX muito suavizados, atingindo às 0000 UTC um pico em torno de 6 mm/30 min. Esse valor é muito abaixo do observado (tanto na estação quanto no domínio), o que mostra uma limitação do GFS. No entanto, o GFS é capaz de indicar o intervalo temporal em que ocorre o pico de PMAX (às 0000 UTC). Desta forma, para este caso específico, o GFS não obteve um bom desempenho em estimar o pico de PMAX, mas indicou corretamente o intervalo temporal de ocorrência do pico.

Figura 5.16 - Séries temporais dos valores de precipitação máxima na caixa centrada no aeroporto (GFS-linha azul), valores de intensidade coletados na estação do aeroporto (OBS-linha amarela) e valores observados utilizando o CMORPH (linha verde).

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.17 mostra as séries temporais de PMAX observada (CMORPH-MAX), medida pontual da estação (OBS-MAX) e simuladas com o WRF para os dois domínios (9 e 3 km). Os dados do CMORPH mostram valores elevados de PMAX na caixa no final da tarde do dia 10-mar até o início da madrugada do dia 11-mar. Esse intervalo temporal é o de interesse e, nele, PMAX atinge o máximo de $\approx$ 18 mm/30 min às 2030 UTC, enquanto a maior intensidade de precipitação ($\approx$ 16 mm/30 min) é registrada no aeroporto às 0100 UTC. Os valores de PMAX simulados no domínio

de 9 km subestimam os observados no intervalo de interesse (os valores simulados não ultrapassam 5 mm/30 min no intervalo), embora as maiores medianas e a maior dispersão do *ensemble* ocorram no intervalo (Figura 5.17a). Por outro lado, a simulação no domínio de 3 km representa muito bem o *timing* e o valor de PMAX quando ocorre o pico com os dados do CMORPH. A maior mediana simulada ocorre às 2000 UTC, 30 min antes do máximo do CMORPH, e o seu valor é $\approx$ 21 mm/30 min, ou seja, pouco maior que o máximo observado (Figura 5.17b). A simulação no domínio de 3 km não é capaz, no entanto, de representar o PMAX observado no restante do intervalo de interesse, ou seja, durante a noite até o início da madrugada. Assim:

- o intervalo temporal contendo as precipitações mais intensas (maior PMAX) poderia ser prognosticado pelo intervalo contendo as maiores medianas de PMAX e a maior dispersão do *ensemble* no domínio de 9 km;
- a magnitude das precipitações mais intensas poderia ser prognosticado pela maior mediana de PMAX no domínio de 3 km e pelos *outliers* no domínio de 9 km dentro do intervalo que se encontra; e
- a defasagem entre a maior mediana de PMAX no domínio de 3 km e o maior valor observado de PMAX no intervalo é de 30 min.

A principal conclusão é que, diferentemente de FRAC, PMAX é bem representado nas simulações com o WRF.

Figura 5.17 - Série temporal utilizando o método DIST com valores de ocorrência de precipitação máxima (PMAX): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

5.3.2 Vento

O relevo da região de estudo está mostrado na Figura 5.18a. O aeroporto encontra-se entre duas regiões montanhosas, a Serra da Mantiqueira e a Serra do Mar. A caixa contém áreas das duas serras: na parte noroeste, áreas da Serra da Mantiqueira; no extremo sudeste, áreas da Serra do Mar.

Uma ilustração do campo de vento a 10 m está mostrada na Figura 5.18b. Sobre ambas as serras, o vento é acelerado, ou seja, as áreas onde a velocidade é maior corresponde às maiores elevações. Esse comportamento ocorre frequentemente, ou

seja, não está limitado ao exemplo mostrado na Figura 5.18b. Assim, a presença de ventos intensos na caixa pode estar relacionada à aceleração devido à elevação (topografia) e não à atuação de sistemas convectivos.

Figura 5.18 - Mapa de elevação com a região de estudo em metros (painel esquerdo). Campo com direção e magnitude do vento para a mesma região (painel direito). A caixa em azul representa o tamanho do domínio utilizado no método DIST. O ponto em azul ao centro representa a localização do Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos.

(a) (b)

Fonte: Produção do autor.

A aplicação da técnica DIST leva às séries de VMAX mostradas na Figura 5.19, onde observa-se a média do *ensemble* (linha azul) e hachurado em cinza desvio padrão. Para ambos os domínios, as simulações mostram uma pequena variação de VMAX ao longo do tempo. Por outro lado, no aeroporto, os valores observados de VMAX variam bastante, sendo nítido o pico ocorrido às 2300 UTC do dia 10-mar devido à atuação do sistema convectivo. A relativa constância de VMAX nas simulações pode ser atribuída à presença de ventos mais intensos nas áreas mais elevadas da caixa, o que mascara a ocorrência de picos de velocidade sobre o aeroporto devido à atuação de sistemas convectivos. Assim, a aplicação da técnica DIST para o vento não se mostra adequada à região de estudo. Para essa variável, opta-se por utilizar os valores no ponto de grade que contém o aeroporto.

Figura 5.19 - Série temporal utilizando o método DIST com valores de ocorrência de vento máximo (VMAX): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

No aeroporto, o ciclo diário médio observado de VMED (vento médio no intervalo de 30 min) e o de VMAX (vento máximo no intervalo de 30 min) em março de 2016 estão mostrados na Figura 5.20a. Para ambas as variáveis, os maiores valores ocorrem durante a tarde; os menores, durante a madrugada. Portanto, fixar um limiar único de VMAX para definir vento intenso privilegiaria os picos vespertinos. Para evitar isso, adota-se o método de utilizar a diferença entre VMAX e VMED, chamada aqui de DIF. Essa variável tem relação com as rajadas de vento. Embora DIF seja maior durante a tarde (em torno de 8 kt) e menor durante a madrugada (em torno de 5 kt), a amplitude do seu ciclo diário é menor que a dos ciclos de

VMED e VMAX.

A Figura 5.20b mostra as séries observadas de VMED e VMAX nos dias 10 e 11 de março de 2016. No pico de interesse ocorrido às 2300 UTC do dia 10-mar, nota-se que DIF (≈14 kt) é bem maior que o valor médio para o horário (≈7 kt). Isso ocorre também nos demais picos. Assim, a ocorrência de rajadas, por exemplo devido à atuação de sistemas convectivos, levaria a valores de DIF superiores à média do horário.

Figura 5.20 - Séries temporais para a variável vento: a) Ciclo diário da velocidade média e máxima do vento registrado na estação SBGR para o mês de março de 2016; e b) Série temporal observada na estação nos dias 10 e 11 de março de 2016.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

As séries temporais de DIF – observada na estação, média do mês e do GFS – estão mostradas na Figura 5.21. Os valores observados na estação e da média no mês mostram o mesmo comportamento geral, similar ao ciclo diário do vento (menores valores durante a madrugada e maiores à tarde). O limiar de 10 kt é ultrapassado, indicando a ocorrência de rajada, às 2300 UTC, quando houve o evento de tempo

severo. Nota-se que o limiar é também ultrapassado em outros momentos, como às 1100 UTC do dia 10-mar e no final da tarde e inicio da noite do dia 11-mar. A série de DIF do GFS, embora mostre a possibilidade de ocorrência de rajada de vento durante o evento severo com valores próximos do observado, considera um intervalo de tempo muito grande em que as rajadas podem ocorrer. Trata-se de uma imprecisão na localização temporal que torna a previsão pouco útil (como se houvesse a possibilidade de rajada em todos os instantes). Dessa forma, o GFS tem um bom desempenho em indicar a magnitude das rajadas, mas não consegue delimitar o intervalo temporal em que as rajadas podem ocorrer.

Figura 5.21 - Séries temporais com valores de DIF. DIF-MENSAL (linha amarela), DIF-OBS (valor pontual da estação - linha verde) e DIF-GFS (linha azul).

Fonte: Produção do autor.

As séries temporais de DIF - observada na estação e média do mês - são mostradas na Figura 5.22. Para ambos os domínios, as séries simuladas mostram uma variabilidade temporal mais realista (diferentemente da constância temporal das séries com o uso da técnica DIST), embora sejam bastante suavizadas em relação às observações. No domínio de 9 km, o valor das medianas de DIF é semelhante à média do mês, mas o comportamento temporal é bastante suavizado, o que não permite obter a intensidade das rajadas e nem o instante da sua ocorrência (Figura 5.22a). No domínio de 3 km, o valor da mediana de DIF é irrealisticamente inferior ao observado, mas os pequenos picos simulados (limitados a 3 kt) indicam a possibilidade de prognosticar o instante e o intervalo temporal de ocorrência de picos (Figura 5.22b). Devido a essa suavização, a mediana das séries simuladas não consegue representar, em geral, os picos observados de DIF (por exemplo, acima de 15 kt). Embora o pico observado às 2300 UTC do dia 10-mar também não seja representado pela mediana em ambos os domínios, nota-se que a dispersão do *ensemble* (diferença entre os limites máximo

e mínimo do *boxplot*) aumenta nos horários próximos à ocorrência do pico, particularmente no domínio de 9 km (entre 2200 e 0000 UTC - 10-mar) (Figura 5.22a). No domínio de 3 km, *outliers* com maior valor estão presentes algumas horas antes do horário do pico (entre 1730 e 2100 UTC - 10-mar) (Figura 5.22b). Como o aumento da dispersão ou a existência de *outliers* com maior valor podem ocorrer também sem a ocorrência de rajadas – por exemplo, entre 0600 e 0930 UTC (11-mar) no domínio de 9 km (dispersão) e às 0630 do dia 11-mar no domínio de 3 km (*outlier*) – pode-se concluir que essas condições somente indicam a possibilidade de ocorrência de picos (rajadas) com uma incerteza temporal de algumas horas.

Portanto, em relação ao vento, as simulações com o WRF não foram capazes de representar a intensidade das rajadas, mas os horários (intervalo temporal) e instante de ocorrência em que há possibilidade de ocorrência de rajadas podem ser estimados pela maior dispersão do *ensemble* (no domínio de 9 km) ou existência de *outliers* com maior valor (no domínio de 3 km) nas séries simuladas de DIF.

Figura 5.22 - Série temporal do ponto de grade que contém as informações da estação meteorológica SBGR - (DIF): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

5.4 Conclusões parciais

Para precipitação acima do limiar de 1,25 mm/30 min, o GFS tem um bom desempenho em relação ao valor de FRAC e o intervalo temporal de ocorrência. O intervalo temporal pode ser confirmado por picos de dispersão dos membros no domínio de 9 km e picos de *outliers* no domínio de 3 km.

Para precipitação forte (ou seja, acima do limiar de 5 mm/30 min), tanto o GFS quanto as simulações com o WRF não são capazes de prognosticar o valor de FRAC. Os valores são muito subestimados pelo GFS, e mais ainda pelas simulações com o

WRF. Em uma postura conservadora, considerando que possa ocorrer FRAC alto, o intervalo temporal de ocorrência pode ser estimado considerando o pico de FRAC do GFS e a presença de *outliers* em ambos os domínios.

Para PMAX, o GFS não possui um bom desempenho. As simulações com o WRF fornecem informações muito úteis. O intervalo temporal contendo as precipitações mais intensas (maior PMAX) poderia ser prognosticado pelo intervalo contendo as maiores medianas de PMAX e a maior dispersão do *ensemble* no domínio de 9 km, enquanto a magnitude das precipitações mais intensas, pela maior mediana de PMAX no domínio de 3 km que se encontra dentro do intervalo.

Em relação ao vento, o valor da rajada (DIF) pode ser estimado com o GFS, enquanto o intervalo temporal de ocorrência (com incerteza de algumas horas), pela maior dispersão do *ensemble* no domínio de 9 km ou pela existência de *outliers* com maior valor no domínio de 3 km. fvel

6 ESTUDO DE CASO 2

Neste capítulo, realiza-se um estudo observacional do evento de tempo severo que ocorreu entre os dias 06 e 07 de fevereiro de 2017 e afetou a região do Aeroporto Internacional São Paulo - Guarulhos.

6.1 Descrição do caso e análise sinótica

O evento consistiu na ocorrência de ventos fortes e intensa precipitação no final da tarde e início da noite do dia 06 de fevereiro de 2017 que deixou as cidades de São Paulo e Guarulhos em estado de atenção. Vários foram os transtornos provocados pela tempestade nas cidades: ruas alagadas, congestionamentos no tráfego de veículos, árvores derrubadas, falta de energia, etc (Folha-Uol[1]). O fluxo de aeronaves teve que ser remanejado, com voos ao Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos desviados para outros aeroportos do Estado de São Paulo.

A estação meteorológica de superfície de Guarulhos registrou precipitação moderada a forte de 2000 a 2130 UTC do dia 6-fev (Figura 6.1a), com pico de ≈9 mm / 30 min às 2130 UTC. Os ventos registrados na estação foram moderados ($\geq$ 11 kt) desde às 1400 UTC do dia 6-fev e houve um pico com intensidade forte ($\geq$ 22 kt) às 2200 UTC do dia 6-fev. No dia 07, registra-se picos de intensidade moderada durante a madrugada e novamente a partir das 1700 UTC (Figura 6.1b).

[1] Reportagem: site Folha-Uol

Figura 6.1 - Série temporal com os dados automáticos da estação meteorológica de superfície para os dias 06 e 07 de fevereiro de 2017: (a) Precipitação máxima e (b) Velocidade do vento máximo.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 6.2 mostra as cartas sinóticas de superfície dos dias 06 e 07 fevereiro de 2017 às 0000 UTC. No dia 06 às 0000 UTC (Figura 6.2a), há um SF com seu ramo frio sobre o Estado do Rio Grande do Sul e estendendo-se até o ciclone extratropical de 996 hPa. No dia 07 às 0000 UTC (Figura 6.2b), nota-se um avanço do SF e seu ramo frio sobre Santa Catarina e Sul do Paraná. O centro do ciclone extratropical apresenta-se mais a leste.

Figura 6.2 - Carta Sinótica de Superfície elaborada para os dias 06 e 07 de fevereiro de 2017 às 00 UTC.

(a) (b)

Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE - Ministério da Ciência e Tecnologia - Brasil (2018).

A sequência de imagens de satélite (TB realçada do satélite GOES-13 no canal infravermelho) para a América do Sul das 0000 UTC do dia 6-fev às 0600 UTC do dia 7-fev de 2017 estão mostradas na Figura 6.3 para ilustrar o padrão de grande escala da nebulosidade associada ao SF. Às 0000 UTC do dia 06, nota-se pouca nebulosidade associada ao SF sobre o Estado de Santa Catarina. Porém, em grande parte do Brasil, há muitos núcleos convectivos com intensa atividade (Figura 6.3a). Entre 0600 e 1200 UTC, em geral, nota-se que as células convectivas enfraquecem-se e, eventualmente, dissipam-se (Figura 6.3b, c). Às 1800 UTC, o SF passa a afetar o sul do Estado de São Paulo (Figura 6.3d). Nesse momento, núcleos convectivos intensificam-se em grande parte do país. Sobre o sudoeste do Estado de São Paulo, nota-se a presença de um núcleo bastante intenso e extenso. No decorrer das próximas 6 horas (Figura 6.3e), sobre a região de estudo e parte da região leste do Estado de São Paulo, passa a atuar uma nebulosidade convectiva bem organizada e associada ao núcleo no sudoeste do Estado que se formou no início da tarde do dia 06. Na sequência, nota-se o deslocamento do SF deixando a região de estudo (Figura 6.3f).

Figura 6.3 - Imagens de satélite da América do Sul no canal Infravermelho (Ch.4) Temperatura de brilho em °C: (a) 06-fev 2017 00 UTC, (b) 06-fev 2017 06 UTC, (c) 06-fev 2017 12 UTC, (d) 06-fev 2017 18 UTC, (e) 07-fev 2017 00 UTC e (f) 07-fev 2017 06UTC. Quadrado em vermelho: área DIST.

Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE - Ministério da Ciência e Tecnologia - Brasil (2018).

A Figura 6.4 mostra o acumulado diário (de 0000 a 2359 UTC) de precipitação utilizando a técnica CMORPH para os dias 05, 06 e 07 de fevereiro de 2017. No dia 05 (Figura 6.4a), as áreas com precipitação intensa ocorrem a sudoeste do Estado de Santa Catarina. Nas 24 horas subsequentes (Figura 6.4b), o avanço do SF em direção ao sul do Estado de São Paulo leva a valores superiores a 60 mm na região de interesse e no sudoeste do Estado. Esse padrão concorda com a intensa atividade convectiva sobre essas duas regiões encontrada na sequência de imagens de satélite. No dia 07 (Figura 6.4c), com o avanço do SF, há menores acumulados sobre o Estado de São Paulo e, sobre a área de interesse, os acumulados são baixos (< 9 mm).

Figura 6.4 - Campos de precipitação acumulada em 24 horas (CMORPH) para os dias 05, 06 e 07 de fevereiro de 2017 (região Sudeste). Região de estudo no *box* em vermelho (DIST) e aeroporto ao centro com o ponto em vermelho.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 6.5 mostra o campo de pressão ao nível médio do mar para os dias 05, 06 e 07 de fevereiro de 2017 às 1200 UTC. No dia 5-fev, há um cavado sobre o Oceano Atlântico que se estende em direção ao continente nas proximidades do Estado de Santa Catarina (Figura 6.5a). Esse cavado está associado a um ciclone de 1002 hPa em torno de 38° S/43° W. Um anticiclone com características pós-frontais pode ser observado sobre a Argentina e Uruguai (1020 hPa). No dia 6-fev (Figura 6.5b), o centro de alta pressão ganha força e avança com intensidade maior na retaguarda do SF, e o centro de baixa pressão aprofunda-se (998 hPa) e desloca-se para Leste. No dia 07 fevereiro (Figura 6.5c), o centro de baixa pressão desloca-se bem para leste (fora da figura) e ocorre o avanço do anticiclone pós-frontal sobre a região Sudeste. Nota-se que o cavado não se estende para o interior do continente.

Figura 6.5 - Campos de pressão ao nível médio do mar às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em hPa.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 6.6 mostra movimentos verticais 500 hPa. Na região Sul, há movimentos verticais mais intensos sobre a área que corresponde ao posicionamento do SF (Figura 6.6a). No dia 07 de fevereiro, as áreas com movimentos verticais mais intensos encontram-se sobre o Oceano Atlântico na região associada à banda de nebulosidade convectiva do SF (Figura 6.6c).

Figura 6.6 - Campos de ômega em 500 hPa às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em Pa/s.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A circulação em altos níveis (250 hPa) é mostrada na Figura 6.7 para os dias 05, 06 e 07 de fevereiro de 2017. Na sequência de campos observa-se a configuração do JST próximo ao Rio Grande do Sul dando suporte ao SF em superfície. O JST com velocidades superiores a 75 kt desloca-se pelo continente e atinge transversalmente ao sul do Estado de São Paulo no dia 7-fev. Esse posicionamento do JST dá suporte em altos níveis para a intensificação de áreas de instabilidades em superfície na região de interesse.

Figura 6.7 - Campos de linhas de corrente em 250 hPa às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

No nível de 500 hPa (Figura 6.8), a configuração da circulação está associada a presença da corrente de jato em altos níveis. Nota-se um fluxo com ventos intensos (57 kt) no nível de 500 hPa contribuindo para a divergência em superfície e a intensificação das áreas com precipitação.

Figura 6.8 - Campos de linhas de corrente em 500 hPa às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

Em baixos níveis (850 hPa), a Figura 6.9 mostra o escoamento, na qual observa-se um cavado sobre São Paulo e estendendo-se até o oceano Atlântico (Figura 6.9c). O posicionamento do cavado está consoante com o SF observado em superfície.

Figura 6.9 - Campos de linhas de corrente em 850 hPa às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 6.10 mostra o campo de umidade relativa em 925 hPa. Notam-se valores elevados de umidade (85 %) em grande parte do território do Brasil. Sobre o Rio Grande do Sul, nota-se a presença de duas massas de ar diferentes. A primeira massa de ar seca mais ao sul e a segunda massa de ar mais úmida ao norte, ambas associadas ao SF em superfície. O avanço do SF é observado também, pelo deslocamento da massa de ar seca pós-frontal.

Figura 6.10 - Campos de umidade relativa em 925 hPa às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em % UR.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 6.11 mostra o campo de temperatura a 2 m. As imagens evidenciam o gradiente térmico presente na região Sul do país, bem condizente com o SF já mencionado sobre a região.

Figura 6.11 - Campos de temperatura a 2 m às 12 UTC para os dias: a) 05 fev 2017; b) 06 fev 2017; e c) 07 fev 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em °C.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

6.2 Análise de mesoescala

Às 1500 UTC do dia 6-fev (Figura 6.12a), a banda de nebulosidade associada ao SF possui orientação NO-SE e localiza-se entre os Estados do Paraná e de São Paulo. Essa banda em geral é composta por nebulosidade de topo baixo, mas nela há áreas contendo nuvens convectivas isoladas. Uma delas localiza-se no litoral norte do Paraná (A na Figura 6.12a). Fora da banda associada ao SF, no Estado de São Paulo, nuvens convectivas ocorrem sobre uma área pequena na porção central do litoral paulista (B na Figura 6.12a).

Durante a tarde, a convecção continental intensifica-se.

- De 1500 a 1600 UTC (Figura 6.12a), sobre as áreas A e B, as nuvens convectivas organizam-se e levam à iniciação de um sistema convectivo em cada área (a e b, respectivamente, na Figura 6.12b). No interior do Estado de São Paulo, surgem nuvens convectivas em uma pequena área próximo à represa de Barra Bonita (C na Figura 6.12c).
- De 1600 a 1700 UTC (Figura 6.12b), os sistemas a e b expandem-se horizontalmente e aprofundam-se, e as nuvens convectivas sobre a área C organizam-se e levam à iniciação de um sistema convectivo (c na Figura 6.12d).
- De 1800 a 1900 UTC (Figura 6.12d e Figura 6.12e), os sistemas a e c con-

tinuam a se expandir e se aprofundar, aproximando-se. Ambos os sistemas passam a fazer parte de uma extensa banda convectiva que acompanha o deslocamento do SF. Devido à sua proximidade, a partir de 1900 UTC, consideraremos os sistemas a e c como um único, doravante chamado de a+c (Figura 6.12e). O sistema b enfraquece, passa sobre a região do Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos, provocando uma discreta precipitação em torno de 1800 UTC no aeroporto (Figura 6.1a da análise sinótica), e começa a se dissipar.

- De 2000 UTC a 2200 UTC (Figura 6.12f, Figura 6.12g e Figura 6.12h), o sistema a+c expande-se e desloca-se para nordeste (acompanhando a banda convectiva associada ao SF), passando a afetar diretamente a região do Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos. Nesse intervalo, ocorrem os picos de precipitação forte no aeroporto (Figura 6.1a da análise sinótica).

A partir de 2200 UTC, ocorre enfraquecimento e dissipação do sistema a+c (não mostrado). Nessa fase, houve ainda uma discreta precipitação no aeroporto em torno de 2300 UTC associada ao sistema (Figura 6.1a da análise sinótica).

Figura 6.12 - Imagens de satélite da Região Sudeste no canal Infravermelho (IR) do dia 06 fevereiro de 2017. Temperatura de brilho GOES-13. a) 15 UTC 6-fev, b) 16 UTC 6-fev, c) 17 UTC 6-fev, d) 18 UTC 6-fev, e) 19 UTC 6-fev, f) 20 UTC 6-fev, g) 21 UTC 6-fev e h) 22 UTC 6-fev. Quadrado em vermelho: área do método DIST. Ponto em vermelho: aeroporto de GRU.

Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE - Ministério da Ciência e Tecnologia - Brasil (2018).

As imagens de radar no dia 06 de fevereiro de 2017 (Figura 6.13) mostram que,

entre 1830 e 2330 UTC, células convectivas com refletividade alta (p. ex., acima de 50 dBZ), associadas ao sistema convectivo a+c (conforme a análise das imagens de satélite), deslocam-se de sudoeste para nordeste em direção à região do Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos. Às 2030 UTC (Figura 6.13c), células com refletividade alta atingem o aeroporto, levando ao pico secundário de intensidade de precipitação (em torno de 6 mm/30 min) (Figura 6.1a da análise sinótica). Às 2130 UTC (Figura 6.13d), forma-se uma linha meridionalmente orientada, estendendo-se desde a região do aeroporto até o litoral, que contém os máximos de refletividade (crista de refletividade). Nesse horário, ocorre o pico principal de intensidade de precipitação (em torno de 9 mm/30 min) (Figura 6.1a da análise sinótica), ou seja, o evento de tempo severo. Nos horários subsequentes (Figura 6.13e e Figura 6.13f), a crista de refletividade desloca-se para nordeste, deixando sobre o aeroporto células com menor refletividade.

A análise das imagens de satélite e de radar mostra que o evento de tempo severo sobre a região do aeroporto de Guarulhos esteve associada:

- à atuação de SCM que se deslocou de SO para NE ao longo do leste do Estado de São Paulo; e
- à passagem de células com refletividade alta, organizadas como uma linha meridionalmente orientada (crista de refletividade), sobre a região do aeroporto.

Figura 6.13 - Imagens de refletividade das nuvens geradas pelo radar de São Roque localizado em São Paulo. Os campos referem-se aos seguintes horários (UTC), nesta ordem: (a) 06 fev 2017 1830 UTC, (b) 06 fev 2017 1930 UTC, (c) 06 fev 2017 2030 UTC, (d) 06 fev 2017 2130 UTC, (e) 06 fev 2017 2230 UTC e (f) 06 fev 2017 2330 UTC. Radar do DECEA - CAPPI 3 km. Unidade em dBZ.

Fonte: Produção do autor.

A iniciação do SCM ocorreu no extremo sul do Estado de São Paulo no início da tarde, e a sua maturação, ao longo do leste paulista, durante a tarde. O índice SA-MCS (Figura 6.14e) mostra que, às 1800 UTC, havia condições favoráveis à iniciação de SCM ao longo do leste paulista, ou seja, ao longo da trajetória de fato seguida pelo SCM até atingir a região do aeroporto. Logo, o potencial de iniciação de SCM indicado pelo índice SA-MCS é coerente com o que foi observado. O maior potencial apontado pelo índice no leste paulista provém de dois fatores: condições mais instáveis na vertical sobre o Estado de São Paulo (valores negativos do índice de levantamento em 4 camadas, Figura 6.14d) e ascendência em 800 hPa (valores negativos de ômega, Figura 6.14c) ao longo do leste paulista, sendo esse último fator o que apresenta padrão espacial muito semelhante ao do índice SA-MCS. Portanto, a presença de ascendência em baixos níveis ao longo do leste paulista e de condições mais instáveis na vertical no Estado favoreceram a iniciação do SCM (durante a tarde) que ocasionou o evento de tempo severo na região do aeroporto.

Figura 6.14 - Campos que compõem a análise de mesoescala para o dia 06 fev 2017 às 1800 UTC: a) Cisalhamento do vento entre 0 - 6 km; b) Advecção de temperatura em 775 hPa; c) Ômega em 800 hPa; d) Levantamento em 4 camadas; e) Índice SA-MCS e f) Imagem de satélite GOES 13 IR Ch.4. Linha em vermelho: limiar que contribui para o índice. Caixa em vermelho: Área do método DIST. Ponto central: Aeroporto de Internacional São Paulo - Guarulhos.

Fonte: Produção do autor.

6.3 GFS e simulações com o WRF

6.3.1 Precipitação

A Figura 6.15 mostra as séries temporais de FRAC para os dois domínios (9 e 3 km) e os dois limiares (1,25 e 5 mm/30 min). Os valores observados de FRAC para

o limiar de 1,25 mm/30 min (precipitação moderada) atingem um pico de 100 % às 2230 UTC. O GFS subestima de forma expressiva o pico de FRAC (≈10 %) e adianta a sua ocorrência em ≈4 h (vale ressaltar que a frequência temporal das saídas do GFS é de 3 h). Ao analisar o desempenho das simulações com o WRF, observa-se que os membros do *ensemble* em ambos os domínios (Figura 6.15a e Figura 6.15b), também subestimam de forma bem expressiva os valores observados de FRAC. Durante o caso, no domínio de 9 km, o valor máximo da mediana do *ensemble* fica abaixo de 19 %. Contudo, apresenta um valor de pico às 1930 UTC que antecipa o observado em 3 horas; no domínio de 3 km, os valores indicam no instante máximo verificado no CMORPH (2230 UTC) mediana abaixo de 6 %. Apesar dos erros em identificar a área correspondente em FRAC, a dispersão dos membros, em ambos os domínios, possibilita identificar o intervalo de ocorrência de precipitação superior a 1,25 mm/30 min. Portanto, as simulações com o WRF e o GFS não são capazes de identificar a área correspondente à precipitação observada e o instante de ocorrência desse máximo observado no CMORPH, mas as simulações com o WRF podem indicar o intervalo temporal aproximado de ocorrência acima de 1,25 mm/30 min.

Segundo as observações (CMORPH), ocorre precipitação forte (limiar de 5 mm/30 min) na caixa entre 1900 e 0030 UTC, com pico de FRAC em torno de 50 % por volta de 2130 UTC. O GFS não registra precipitação forte na caixa. As simulações com o WRF subestimam de forma expressiva os valores de FRAC em ambos os domínios (Figura 6.15c e Figura 6.15d). No domínio de 9 km, os maiores *outliers* conseguem representar o intervalo temporal de ocorrência de precipitação forte (entre 1730 e 2130, ou seja, 4 h), mas adianta o seu início em 2 h (1730 UTC em vez de 1930 UTC). No domínio de 3 km, a maior dispersão (embora pequena) ocorre no intervalo em que ocorre a precipitação forte. Assim, embora o valor do pico de FRAC e o instante de ocorrência não seja representado tanto pelo GFS quanto pelas simulações com o WRF, o intervalo de ocorrência de precipitação forte estaria relacionada à presença dos maiores *outliers* (no domínio de 9 km) ou da pequena dispersão do membros (no domínio de 3 km) nas simulações com o WRF.

Portanto, verifica-se que as simulações com o modelo WRF não são capazes de representar os valores observados de FRAC durante o caso, tendo o GFS um desempenho também ruim ou não representativo em ambos os limiares. No entanto, as simulações são capazes de indicar o intervalo temporal de ocorrência de precipitação forte por meio dos *outliers* no domínio de 9 km e pela pequena dispersão no domínio de 3 km.

Figura 6.15 - Séries temporais da fração de pontos de grade com ocorrência de precipitação para limiares de chuva moderada e forte (FRAC).

(a)

(b)

(c)

(d)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 6.16 mostra as séries temporais dos valores de precipitação máxima na caixa centrada no aeroporto (PMAX): valores de intensidades coletados na estação (medida pontual), valores observados na caixa utilizando a técnica CMORPH e valores observados no modelo GFS. No aeroporto, observam-se dois picos, o primeiro às 2000 UTC com intensidade de ≈6 mm/30 min e o segundo com intensidade de ≈10 mm/30 min às 2130 UTC. Na caixa (CMORPH), observam-se também dois picos de maior intensidade quase nos mesmos horários: o primeiro às 1930 UTC com intensidade de ≈14 mm/30 min e o segundo com intensidade de ≈31 mm/30 min às 2130 UTC. O GFS mostra valores muito suavizados de PMAX e inferiores aos observados – os valores máximos de PMAX do GFS não ultrapassam 4 mm/30 min. Além disso, os valores máximos verificados pelo GFS adiantam em mais de 3 h os valores das observações (máximos do GFS entre 15 e 18 UTC). Ao analisar o intervalo de ocorrência de PMAX (1930 e 2130 UTC), verifica-se que não tem correspondência com GFS, pois o mesmo apresenta o intervalo máximo entre 1500 e 1800 0UTC.

Figura 6.16 - Séries temporais dos valores de precipitação máxima na caixa centrada no aeroporto (GFS-linha azul), valores de intensidade coletados na estação do aeroporto (medida pontual-linha amarela) e valores observados utilizando o CMORPH (linha verde).

Fonte: Produção do autor.

A Figura 6.17 mostra as séries temporais de PMAX observada (CMORPH-MAX), medida pontual da estação (OBS-MAX) e simuladas com o WRF para os dois domínios (9 e 3 km). As simulações no domínio de 9 km subestimam os valores de PMAX, pois os valores não ultrapassam 5 mm/30 min no intervalo de tempo em que foi registrado os maiores picos (mediana). Contudo, é válido destacar que um dos membros do *ensemble* (*outliers*) estima o valor de PMAX. Ao analisar o ins-

tante e intervalo de ocorrência, os *outliers* apresentam uma antecipação do evento em 1 h. Os resultados com as simulações no domínio de 3 km também apresentam bons resultados. O valor de PMAX através da mediana do *ensemble* às 2200 UTC 6-fev apresenta um pico próximo ao observado no CMORPH de ≈26 mm/30 min. Do mesmo modo, os *outliers* conseguem resultados melhores às 2030 UTC apresentando valores iguais aos observados. Ao analisar o instante e intervalo de ocorrência, ambos mediana e *outliers* indicam uma assertividade inferior a 1 h. Logo:

- o GFS não teve um bom desempenho em estimar o valor de pico apresentado na caixa, o instante de ocorrência fica muito distante do observado às 2130 UTC e o intervalo temporal é inferior ao intervalo de tempo observado em PMAX;
- a magnitude de PMAX por sua vez pode ser especificada por ambos os domínios: no domínio de 9 km o valor é expresso pelos *outliers* e no domínio de 3 km o valor pode ser definido pela mediana do *ensemble* e pelos *outliers*;
- o instante de tempo de ocorrência de PMAX, em ambos os domínios, é definido com um intervalo de tempo inferior a uma hora. Mas, vale destacar que os domínios de 9 km e 3 km identificam de formas diferentes os valores de PMAX; e
- o intervalo temporal de ocorrência pode ser especificado com assertividade inferior a 1 hora através dos *outliers* no domínio de 9 km e pela dispersão dos membros do *ensemble* no domínio de 3 km.

Assim, os resultados obtidos permitem concluir que nesse caso específico, o GFS não apresenta bons resultados em estimar a área de precipitação (FRAC) e nem os valores de PMAX. Diferentemente, as simulações indicam dois resultados distintos: O primeiro que as simulações não são capazes de identificar os valores de FRAC e o segundo que as simulações indicam bons resultados em estimar o valor, instante e intervalo de ocorrência de PMAX.

Figura 6.17 - Série temporal utilizando o método DIST com valores de ocorrência de precipitação máxima (PMAX): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

6.3.2 Vento

A Figura 6.18a mostra o ciclo diário médio observado de VMED (vento médio no intervalo de 30 min) e o de VMAX (vento máximo no intervalo de 30 min) em fevereiro de 2017. Adotando-se o método DIF (diferença entre VMAX e VMED), observa-se uma maior diferença das variáveis no período da tarde com valores superiores a ≈17 kt em alguns horários e no período noturno com valores de DIF inferiores a 5 kt.

A Figura 6.18b mostra a série temporal observada de VMAX e VMED nos dias 6 e 7 de fevereiro de 2017. No horário de interesse (pico que pode indicar uma rajada de

vento) às 2200 UTC do dia 6-fev, verifica-se valores de DIF (15 kt) superior (cerca de 4 kt acima) ao valor médio para o horário. Valores de DIF superiores a média do horário representa a ocorrência de rajadas intensas de vento, como por exemplo, quando da presença de sistemas convectivos.

Figura 6.18 - Séries temporais para a variável vento: a) Ciclo diário da velocidade média e máxima do vento registrado na estação SBGR para o mês de fevereiro de 2017; e b) Série temporal observada na estação nos dias 06 e 07 de fevereiro de 2017.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

As séries temporais de DIF – observada na estação, média do mês e do GFS – estão mostradas na Figura 6.19. As séries mostram que os valores observados na estação e a média no mês apresentam o mesmo comportamento diário, ou seja, valores menos intensos durante a madrugada e intensificando no período da tarde. Em dois momentos o limiar de rajada é ultrapassado, às 2130 e 2200 UTC, e coincide com o momento que ocorre o evento de tempo severo de acordo com o observado. Um outro pico na madrugada do dia 7-fev é registrado na estação (10 kt). Na série de DIF do GFS, os valores não indicam a possibilidade de uma rajada no momento em

que observou rajada na estação (2130 e 2200 UTC), pois os valores de DIF nesse instante são inferiores a 4 kt. Desta forma, acompanhando toda a série, não teríamos o indicativo através da velocidade de ocorrência de rajada. Contudo, às 2100 UTC, nota-se um pico, já mencionado que não é rajada, mas pode dar um indicativo de um vento de rajada às 2130 UTC do dia 6-fev.

Figura 6.19 - Séries temporais com valores de DIF. DIF-MENSAL (linha amarela), DIF-OBS (valor pontual da estação - linha verde) e DIF-GFS (linha azul).

Fonte: Produção do autor.

A Figura 6.20 mostra as séries de DIF nos domínios de 9 e 3 km. As simulações mostram que para ambos os domínios os valores de DIF são subestimados, não indicando valores de vento de rajada na série temporal. No domínio de 9 km (Figura 6.20a), os valores da mediana são inferiores aos observados na estação. No entanto, a maior dispersão dos membros entre 18 e 21 UTC indicaria a possibilidade de ocorrência de rajada nesse intervalo. No domínio de 3 km (Figura 6.20b), a série apresenta valores quase nulos de DIF e os valores das medianas subestimam muito o valor de DIF observado. Contudo, a série indica um intervalo de tempo com maior dispersão entre os membros (e também maiores medianas), que pode ser utilizado para indicar a possibilidade de ocorrência de rajada entre 18 e 21 UTC.

Portanto, neste caso específico, as simulações não indicam a intensidade e o instante de ocorrência de um vento de rajada. Mas há possibilidade de inferir, em ambos os domínios, o intervalo de tempo em que poderia ocorrer um evento de rajada através da dispersão ou dos maiores valores de mediana dos membros do *ensemble*.

Assim, os resultados para a variável vento permitem concluir que o modelo global (GFS) não teve um bom desempenho em indicar a magnitude das rajadas, mas

consegue dar um indicativo do intervalo temporal em que possa ocorrer. Da mesma forma, as simulações do WRF também podem indicar a possibilidade de um evento de rajada em um intervalo de tempo. Porém, as simulações delimitam em um espaço temporal menor que o modelo global.

Figura 6.20 - Série temporal do ponto de grade que contém as informações da estação meteorológica SBGR - (DIF): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

6.4 Conclusões parciais

Para precipitação acima de 1,25 mm/30 min (precipitação moderada a forte), o GFS e as simulações não conseguem identificar a fração de área com precipitação (FRAC).

Mas as simulações do WRF indicam que o instante temporal pode ser prognosticado pela maior dispersão dos membros do *ensemble* em ambos os domínios.

Para precipitação com limiar acima de 5 mm/30 min (precipitação forte), o GFS tem um desempenho ruim ou não representativo. As simulações também não são capazes de prognosticar a área correspondente ao FRAC. Contudo, as simulações indicam a possibilidade de prognosticar com diferença de poucas horas o intervalo temporal de provável ocorrência no domínio de 9 km (*outliers*) e no domínio de 3 km (mediana).

Para PMAX, o GFS não apresenta um bom desempenho. Em contrapartida, as simulações apresentam bons resultados. A magnitude e o instante de PMAX pode ser prognosticada utilizando os *outliers* no domínio de 9 km e no domínio de 3 km utilizando os maiores valores de mediana ou *outliers* dos membros. O intervalo de ocorrência de PMAX pode ser prognosticado através dos *outliers* e dos maiores valores de dispersão dos membros, respectivamente no domínio de 9 e 3 km.

Quanto ao vento, o GFS dá uma indicação do intervalo de tempo de uma provável ocorrência de rajada. Contudo, as simulações conseguem delimitar em um intervalo temporal mais preciso que o modelo GFS o provável intervalo de tempo em que possa ocorrer a rajada, utilizando a dispersão ou os maiores valores das medianas dos membros do *ensemble*.

7 ESTUDO DE CASO 3

Neste capítulo, realiza-se um estudo observacional de um evento de tempo severo que ocorreu entre os dias 17 e 18 de dezembro de 2017 e e afetou a região do Aeroporto Internacional São Paulo - Guarulhos e o seu entorno.

7.1 Descrição do caso e análise sinótica

O evento consistiu em ventos fortes e intensa precipitação na madrugada do dia 18 de dezembro de 2017. De acordo com o site Guarulhos Web[1], a Defesa Civil da cidade de Guarulhos recebeu nove chamadas de intercorrência devido a intensa precipitação e rajadas de vento. A cidade apresentou áreas que precisaram ser isoladas devido ao risco iminente de queda de árvores ou alagamentos.

No Aeroporto, houve atrasos significativos em alguns voos e os dados coletados na estação SBGR indicam um pico com intensa precipitação de ≈24 mm/30 min observado às 0300 UTC de 18-dez (Figura 7.1a). Próximo a esse horário, há dois picos de vento que chamam a atenção pela sua intensidade: o primeiro mais intenso às 0230 UTC com valor de ≈37 kt e o segundo às 0330 UTC com ≈23 kt (Figura 7.1b).

[1] Reportagem: site GuarulhosWeb

Figura 7.1 - Série temporal com os dados automáticos da estação meteorológica de superfície para os dias 17 e 18 de dezembro de 2017: (a) Precipitação máxima e (b) Velocidade do vento máximo.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 7.2 mostra as cartas sinóticas de superfície para os dias 17 e 18 de dezembro de 2017 às 0000 UTC. No dia 17, na parte central da Argentina, atua um SF que se estende do interior do continente em direção ao oceano Atlântico até uma área de baixa pressão com centro em 972 hPa próximo a 56° S/35° W. Após 24 horas, o SF chega ao Rio Grande do Sul estendendo-se a leste pelo norte da Argentina e o sul da Bolívia, e a oeste pelo oceano Atlântico até uma área de baixa pressão de 988 hPa em 48° S/37° W. Nota-se que o SF avança rapidamente pelo oceano. No litoral do estado de São Paulo, verifica-se a presença de um cavado bem pronunciado que contribui para organizar a convecção no leste do Estado.

Figura 7.2 - Carta Sinótica de Superfície elaborada para os dias 17 e 18 de dezembro de 2017 às 00 UTC.

(a) (b)

Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE - Ministério da Ciência e Tecnologia - Brasil (2018).

A Figura 7.3 mostra a sequência de imagens de satélite (TB realçada do satélite GOES-13 no canal infravermelho) para a América do Sul das 0000 UTC do dia 17-dez UTC às 0600 UTC do dia 18-dez de 2017 a cada 6 h (aproximadamente). Às 00 UTC do dia 17-dez (Figura 7.3a), há núcleos convectivos oriundos da convecção diurna na metade norte da América do Sul e uma banda de nebulosidade de grande extensão centrada no Uruguai e associada ao SF. Nessa banda, as áreas com topos altos indicam a presença de sistemas convectivos com grande desenvolvimento vertical e possivelmente associados a ventos fortes e chuvas intensas. Às 0600 UTC (Figura 7.3b), o SF avança em direção ao sul do Brasil e os núcleos convectivos na metade norte da América do Sul enfraquecem-se, ocorrendo apenas sobre áreas isoladas. Às 1200 UTC (Figura 7.3c), a convecção continental enfraquece ainda mais, inclusive a banda de nebulosidade associada ao SF. Contudo, nas próximas 6 horas (1800 UTC, Figura 7.3d), a atividade convectiva volta a se intensificar devido ao aquecimento diurno. Sobre a região Sul, a banda de nebulosidade associada ao SF encontra-se intensa e bem organizada no continente. No Norte e Nordeste do Brasil, iniciam-se núcleos convectivos. O Estado de São Paulo não apresenta nebulosidade convectiva e, assim, encontra-se na região que separa as áreas de convecção ao norte e ao sul. Nas

primeiras 06 horas do dia 18 (Figura 7.3e e Figura 7.3f), ocorre uma intensificação da nebulosidade associada ao SF sobre o continente, e o SF atinge o litoral da região Sudeste. Sobre o norte da Argentina, o Paraguai e o sul da Bolívia, formam-se vários SCM. No leste do Estado de São Paulo, há a formação de um sistema convectivo que deve estar associado ao evento de tempo severo.

Figura 7.3 - Imagens de satélite da América do Sul no canal Infravermelho (Ch.4) Temperatura de brilho em °C: (a) 17 dez 2017 00 UTC, (b) 17 dez 2017 06 UTC, (c) 17 dez 2017 12 UTC, (d) 17 dez 2017 18 UTC, (e) 18 dez 2017 00 UTC e (f) 18 dez 2017 06 UTC. Quadrado em vermelho: área DIST.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE - Ministério da Ciência e Tecnologia - Brasil (2018).

A Figura 7.4 mostra o acumulado diário utilizando a técnica MERGE entre os dias 17 e 19 de dezembro de 2017. No Estado de São Paulo, de forma coerente com o padrão de nebulosidade mostrado nas imagens de satélite (Figura 7.3), o acumulado aumenta do dia 17 ao 19 acompanhando a passagem do SF sobre a região. Sobre a região de interesse, no acumulado do dia 19 na caixa (Figura 7.4c), de ≈11 mm/24 h, é muito inferior ao observado na estação SBGR (≈24 mm/30 min). Mas há um máximo expressivo de precipitação, em torno de 51 mm/24 h, deslocado espacialmente (a noroeste) da região de interesse.

Figura 7.4 - Campos de precipitação acumulada em 24 horas (MERGE) para os dias 17, 18 e 19 de dezembro de 2017 (região Sudeste). Região de estudo no *box* em vermelho (DIST) e aeroporto ao centro com o ponto em vermelho.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 7.5 mostra os campos de pressão ao nível médio do mar entre os dias 16-dez e 18-dez (às 1200 UTC). A Figura 7.5a mostra um cavado sobre o oceano Atlântico que se estende continente adentro nas proximidades do Estado do Paraná. Esse cavado está associado a um ciclone extratropical de 998 hPa em torno de 52° S/47° W. Um anticiclone com características pós-frontais pode ser observado sobre a parte central da Argentina e Uruguai (1032 hPa). Na Figura 7.5b verifica-se que o ciclone avança para Nordeste e nota-se um pequeno avanço do anticiclone pós-frontal. O anticiclone avança na retaguarda do SF pelo sul do continente com núcleo de 1040 hPa. No dia 18-dez (Figura 7.5c), verifica-se que o anticiclone não avança e o ciclone presente no Atlântico desloca-se para sudeste.

Figura 7.5 - Campos de pressão ao nível médio do mar às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em hPa.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 7.6 mostra o movimento vertical em 500 hPa. No dia 16-dez (Figura 7.6a), na parte central da Argentina, do Uruguai e da região Sul do país, há movimentos ascendentes intensos associados à atuação do SF. Após 24 h (Figura 7.6b), os movimentos associados ao SF ficam menos intensos sobre o continente, mas ocorre um movimento vertical maior no litoral do Paraná associado ao deslocamento do SF para nordeste. No dia 18 (Figura 7.6c), os movimentos ascendentes associados ao SF tornam-se muito fracos.

Figura 7.6 - Campos de ômega em 500 hPa às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em Pa/s.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 7.7 mostra a circulação em altos níveis para os dias 16, 17 e 18 de dezembro de 2017. No dia 17, o JST está acoplado ao cavado que se estende pelo continente sobre o leste da Argentina e o Uruguai (Figura 7.7a). No dia 17 (Figura 7.7b), a leste do Uruguai, o JST com curvatura anticiclônica desloca-se mais a norte e atinge a região Sul do país. Nas próximas 24 horas (Figura 7.7c), o JST observado sobre o Uruguai apresenta-se mais zonal e o cavado associado ao SF encontra-se fora da carta.

Figura 7.7 - Campos de linhas de corrente em 250 hPa às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

Na análise da carta de 500 hPa (Figura 7.8a), o cavado frontal atua com o eixo estendido sobre o oeste do Rio Grande do Sul, Uruguai e leste da Argentina, onde ocorrem os ventos mais intensos de ≈60 kt. Na Figura 7.8b, o cavado associado ao SF alcança o litoral da região Sudeste e desloca-se para leste. Nas próximas 24 h (figura 7.8c), uma grande região influenciada por um sistema anticiclônico, que inibe a formação de instabilidade, encontra-se sobre a região Sul do país.

Figura 7.8 - Campos de linhas de corrente em 500 hPa às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 7.9 mostra a circulação em baixos níveis (850 hPa). No dia 16 (Figura 7.9a), há um escoamento desde da região Amazônica, contribuindo para o transporte de calor e umidade a partir dessa região e causando forte convecção na região do Rio Grande do Sul. Os ventos de sul observados estão associados ao sistema de alta pressão pós-frontal. O cavado frontal atua sobre o Uruguai e se estende até o oceano Atlântico. No dia 17 (Figura 7.9b), o cavado frontal desloca-se para nordeste alcançando o sul do Estado de São Paulo. Sobre o leste da Argentina, o sistema anticiclônico avança sobre o continente inibindo a formação de nebulosidade na região. Nas próximas 24 horas (Figura 7.9c), observa-se que o cavado frontal encontra-se bem afastado do continente e o deslocamento do sistema de alta pressão avança para leste.

Figura 7.9 - Campos de linhas de corrente em 850 hPa às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Velocidade em kt.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 7.10 mostra o campo de umidade relativa em 925 hPa. Entre o norte da Argentina e o sul do Uruguai, observamos duas massas de ar com características diferentes: uma massa de ar seca mais ao sul e outra mais úmida ao norte. A presença dessas duas massas de ar bem diferentes, úmida e seca, está associada ao SF. Entre os dias 17 e 18, nota-se um aumento da umidade no leste do Estado de São Paulo.

Figura 7.10 - Campos de umidade relativa em 925 hPa às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em % UR.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 7.11 mostra o campo de temperatura a 2 m. Nota-se um forte gradiente de temperatura entre a parte central da Argentina e a região Sul do Brasil. Esse gradiente térmico é observado na Figura 7.11a e em algumas regiões é superior a 8 °C. Nos dias subsequentes, com o deslocamento do SF mais para o oceano, esse gradiente se reduz.

Figura 7.11 - Campos de temperatura a 2m às 12 UTC para os dias: a) 16 dez 2017; b) 17 dez 2017; e c) 18 dez 2017. Dados de análise do GFS. Unidade em °C.

(a) (b) (c)

Fonte: Produção do autor.

7.2 Análise de mesoescala

Às 2030 UTC do dia 17-dez, a banda de nebulosidade associada ao SF apresenta um padrão de nebulosidade bem organizado e orientação de NO-SE. A banda de nebulosidade estende-se do oceano e adentra sobre a divisa dos Estados de Santa Catarina e Paraná (Figura 7.12a). Essa banda de nebulosidade em geral é bem extensa e composta por nebulosidade convectiva que apresenta núcleos convectivos bem intensos (TB < -60 °C) (A na Figura 7.12a). Fora dessa banda de nebulosidade associada ao SF, núcleos convectivos numerosos mas menos extensos podem ser observados no extremo leste do Estado de São Paulo (B na Figura 7.12a).

Durante o início da noite do dia 17-dez, a convecção chega ao Estado de São Paulo e intensifica-se.

- Entre 2030 e 2130 UTC (Figura 7.12b), as nuvens convectivas associadas ao SF intensificam-se e deslocam-se para nordeste atingindo o sul do Estado de São Paulo (a na 7.12b). A nebulosidade convectiva no extremo leste de São Paulo expande-se e desloca-se lentamente no sentido sudoeste (b na Figura 7.12b).
- Entre 2130 e 2230 UTC (Figura 7.12c), o sistema convectivo "b" continua a se expandir e se aprofundar, com deslocamento para sudoeste em direção à região de estudo. O sistema convectivo "a" divide-se em dois: o sistema mais ao norte ("c") tem uma maior intensificação, os topos atingem TB < -70 °C e desloca-se acompanhando a banda de nebulosidade convectiva do SF (deslocamento para nordeste; c na Figura 7.12c); o sistema mais ao sul ("d") enfraquece-se no horário posterior e desloca-se para sudeste.
- Entre 2230 e 2330 UTC (Figura 7.12d), os três sistemas convectivos (b, c & d) parecem se enfraquecer e cada sistema continua na mesma localização da hora anterior. No interior do sistema convectivo "d", nota-se um núcleo que se destaca. Esse núcleo é doravante chamado de "e" (letra e na Figura 7.12d).
- Entre 2330 (17-dez) e 0030 (18-dez) UTC (Figura 7.12e), ocorre o enfraquecimento e dissipação dos núcleos "c" e "d". O sistema "e" continua expandindo-se horizontalmente, aprofundando-se e deslocando para nordeste. O núcleo convectivo que não está associado ao SF (letra b na Figura 7.12e) continua deslocando-se no sentido sudoeste e margendo a Serra da Mantiqueira. O sistema "c" dissipa-se mas origina um padrão de convecção organizado linearmente (linha de instabilidade) que se desloca para

nordeste (letra f na Figura 7.12e).

- Entre 0030 e 0130 UTC (Figura 7.12f), o sistema "b" continua deslocando-se paralelo a Serra. Nota-se que o sistema "e" começa a se enfraquecer, mas expande horizontalmente. A linha de instabilidade "f" desloca-se na direção ao Aeroporto.
- Entre 0130 e 0230 UTC (Figura 7.12g), o núcleo convectivo "b" intensifica-se ao chegar próximo à região do Aeroporto. A linha de instabilidade "f" também se intensifica e fica bem próximo do núcleo "b". O sistema convectivo "e" mantém-se, mas seu deslocamento continua para leste e, devido a isso, o sistema irá afetar o litoral sul do Estado de São Paulo.
- Entre 0230 e 0330 UTC (Figura 7.12h), ocorre a união do núcleo com deslocamento para Sudoeste (letra b na Figura 7.12h) e a linha de instabilidade com deslocamento para Nordeste (letra f na Figura 7.12h), gerando o sistema que leva ao evento de tempo severo sobre o Aeroporto. É precisamente nesse intervalo de horários que ocorre o pico de precipitação na estação (conforme Figura 7.1a da análise sinótica).

A partir das 0430 UTC, observa-se que os núcleos na região do Aeroporto entram em um processo de enfraquecimento e dissipação.

Figura 7.12 - Imagens de satélite da Região Sudeste no canal Infravermelho (IR) dos dias 17 e 18 dezembro de 2017. Temperatura de brilho GOES-13. a) 2030 UTC 17-dez, b) 2130 UTC 17-dez, c) 2230 UTC 17-dez, d) 2330 UTC 17-dez, e) 0030 UTC 18-dez, f) 0130 UTC 18-dez, g) 0230 UTC 18-dez, h) 0330 UTC 18-dez, e i) 0430 UTC 18-dez. Quadrado em vermelho: área do método DIST. Ponto em vermelho: aeroporto de GRU.

Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE - Ministério da Ciência e Tecnologia - Brasil (2018).

A análise das imagens de satélite mostra que o evento de tempo severo decorreu da

iniciação de dois sistemas com origem e deslocamento diferentes. Ambos iniciaram-se no final da tarde, entre 18 e 20 UTC do dia 17-dez 2017, porém, enquanto o sistema associado ao SF deslocou-se para Nordeste acompanhando o SF, o sistema iniciado no extremo leste paulista (na divisa dos Estados do Rio de Janeiro e São Paulo) deslocou-se para sudoeste, ou seja, em sentido contrário ao anterior. Esses dois sistemas encontram-se justamente sobre o Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos e causaram o evento de tempo severo entre 0230 e 0330 UTC do dia 18-dez 2017. O índice SA-MCS (Figura 7.13e) mostra que, às 1800 UTC, havia condições favoráveis para a iniciação dos sistemas. Os máximos do índice acompanham o litoral desde Santa Catarina até o Rio de Janeiro. No litoral de Santa Catarina e Paraná, os máximos do índice podem estar relacionados à atuação do SF. Sobre o Vale do Paraíba, os valores do índice também são elevados e explicam a iniciação do sistema no extremo leste paulista. Portanto, o valor indicado pelo índice SA-MCS é coerente com os sistemas observados que causaram o evento de tempo severo no aeroporto. O maior valor do índice SA-MCS ao longo do litoral está relacionado a três fatores: levantamento em baixos níveis, indicados por valores negativos de ômega (Figura 7.13c), a presença de instabilidade na coluna vertical, indicado por valores negativos do índice de levantamento em 4 camadas (Figura 7.13d) e valores negativos de advecção de temperatura (Figura 7.13b). Vale ressaltar que os valores negativos do índice de levantamento em 4 camadas ocupam uma grande extensão, abrangendo uma grande área. Diferentemente, os campos que apresentam uma melhor correspondência espacial com o índice SA-MCS são ômega e advecção de temperatura. Desta forma, as áreas no continente próximas ao litoral da região Sul e Sudeste, sobre as quais havia condições instáveis, movimento vertical ascendente em baixos níveis e advecção negativa no final da tarde de 18-dez 2017 (19 – 20 UTC), favoreceram a iniciação dos SCM que levaram ao evento de tempo severo na região do aeroporto.

Figura 7.13 - Campos que compõem a análise de mesoescala para o dia 17 dez 2017 às 1800 UTC: a) Cisalhamento do vento entre 0 - 6 km; b) Advecção de temperatura em 775 hPa; c) Ômega em 800 hPa; d) Levantamento em 4 camadas; e) Índice SA-MCS e f) Imagem de satélite GOES 13 IR Ch.4. Linha em vermelho: limiar que contribui para o índice. Caixa em vermelho: Área do método DIST. Ponto central: Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos.

Fonte: Produção do autor.

7.3 GFS e simulações com o WRF

7.3.1 Precipitação

A Figura 7.14 mostra as séries temporais de FRAC para os dois domínios (9 e 3 km) e dois limiares (1,25 e 5 mm/30 min). Durante o evento, para o limiar de 1,25 mm/30

min (precipitação moderada ou forte), FRAC (MERGE) atinge ≈61 % às 0300 UTC do dia 18-dez. A previsão do modelo GFS mostra um pico de 100 % às 2100 UTC do dia 17-dez. Logo, a previsão do modelo GFS, além de superestimar em cerca de 40 p.p. o pico de FRAC observado, adianta a ocorrência do pico em mais de 6 horas. As simulações com o WRF também adiantam o instante de ocorrência do pico, mas, ao contrário da previsão do GFS, subestimam o valor de FRAC. No domínio de 9 km (Figura 7.14a), o pico da mediana dos membros do *ensemble* é de cerca 20 % e ocorre às 2100 UTC do dia 17-dez, ou seja, subestima em cerca de 40 p.p. o pico observado e adianta a ocorrência do pico da mesma forma que o GFS. Por outro lado, os *outliers* representam melhor as observações que a mediana. Os máximos de *outliers* possuem valores em torno de 35 % (subestimativa de 25 p.p.) e ocorrem em torno de 0000 UTC do dia 18 (adiantamento de 3 h). Logo, os máximos dos *outliers* subestimam menos e adiantam menos que o pico de mediana. No domínio de 3 km (Figura 7.14b), os valores da mediana são muito baixos (menores que 10 %). Por outro lado, de forma semelhante ao domínio de 9 km, os máximos de *outliers* (≈17 %) ocorrem às 0200 UTC do dia 18-dez, ou seja, somente 1 h adiantado em relação ao pico observado. Portanto, para FRAC considerando o limiar de precipitação moderada ou forte (1,25 mm/30 min), os máximos de *outliers* das simulações com o WRF são capazes de indicar com menor adiantamento – 3 h no domínio de 9 km e 1 h no domínio de 3 km – o instante de ocorrência do pico observado.

De acordo com as observações (MERGE), ocorre precipitação forte (limiar de 5mm/30 min) na caixa entre 0100 e 0300 UTC do dia 18-dez, com pico de FRAC de ≈14 % às 0200 UTC (Figura 7.14c). A previsão com o modelo GFS mostra um pico de FRAC de 100 % às 2100 UTC. Esse pico superestima em muito o valor do pico observado (em cerca de 86 p.p.) e adianta em 5 horas a sua ocorrência. Nas simulações com o WRF, como os valores da mediana são muito baixos – quase nulos – em ambos os domínios, enfocam-se os *outliers*. No domínio de 9 km (Figura 7.14c), os máximos de *outliers* atingem ≈5 % às 0000 UTC do dia 18-dez. Apesar da subestimativa (de 9 p.p.) em relação ao pico observado, a sua ocorrência está adiantada em somente 2 h. No domínio de 3 km (Figura 7.14d), os máximos de *outliers* aproximam-se mais do pico observado, pois atingem ≈11 % (subestimativa de somente 3 p.p.) no mesmo horário em que ocorre o pico observado (0200 UTC). Portanto, para FRAC considerando o limiar de precipitação forte (5 mm/30 min), os máximos de *outliers* das simulações com o WRF no domínio de 3 km são capazes de representar o valor do pico observado (com pequena subestimativa) e o horário da sua ocorrência. No domínio de 9 km, os máximos de *outliers* conseguem representar o horário da ocorrência do pico com adiantamento de 2 h.

Figura 7.14 - Séries temporais da fração de pontos de grade com ocorrência de precipitação para limiares de chuva moderada e forte (FRAC).

(a)

(b)

(c)

(d)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 7.15 mostra as séries temporais dos valores de precipitação coletados no aeroporto e de precipitação máxima na caixa (PMAX) observada (MERGE) e prevista pelo modelo GFS. No aeroporto, nota-se um pico de ≈24 mm/30 min às 0300 UTC do dia 18-dez 2107. Na caixa (MERGE), há três picos mais intensos dentro de um intervalo temporal associado à ocorrência do evento de tempo severo (entre 0000 e 0430 UTC no dia 18-dez). Nesse intervalo, o pico principal ocorreu às 0200 UTC do dia 18-dez com intensidade de ≈16 mm/30 min. Trata-se de um pico relacionado ao observado no aeroporto. Na previsão do modelo GFS, verifica-se que há uma dificuldade em representar os valores intensos observados, pois os valores de PMAX previstos são muito suavizados e inferiores a 2 mm/30 min. Há também dificuldade em precisar o horário de ocorrência do pico de PMAX, pois os maiores valores previstos encontram-se em um intervalo temporal ≈6 h (entre 0000 e 0600 UTC do dia 18).

Figura 7.15 - Séries temporais dos valores de precipitação máxima na caixa centrada no aeroporto (GFS-linha azul), valores de intensidade coletados na estação do aeroporto (medida pontual-linha amarela) e valores observados utilizando o MERGE (linha verde).

Fonte: Produção do autor.

As séries temporais de PMAX para as simulações com o WRF estão mostradas na Figura 7.16. No domínio de 9 km (Figura 7.16a), a mediana dos membros do *ensemble* subestimam os valores observados de PMAX, pois não ultrapassam ≈4 mm/30 min, e o pico da mediana ocorre horas antes dos picos observados. Por outro lado, os máximos de *outliers* (≈15 mm/30 min) apresentam valores próximos aos observados e ocorrem algumas horas antes (cerca de 3 horas) dos picos observados. No domínio de 3 km (Figura 7.16b), o pico de mediana (17 mm/30 min) é bem próximo em magnitude dos picos observados, mas ocorre horas antes (o pico da

mediana ocorre às 2100 UTC do dia 17-dez, ou seja, bem antes dos picos observados às 0000 e 0200 UTC do dia 18-dez). Portanto, para PMAX, os valores dos máximos de *outliers* das simulações com o WRF no domínio de 9 km e do pico da mediana no domínio de 3 km são comparáveis aos valores dos picos observados, e os máximos de *outliers* no domínio de 9 km encontram-se cerca de 3 h adiantados em relação ao horário de ocorrência dos picos observados.

Figura 7.16 - Série temporal utilizando o método DIST com valores de ocorrência de precipitação máxima (PMAX): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

7.3.2 Vento

A Figura 7.17a mostra o ciclo diário médio observado de VMED (vento médio no intervalo de 30 min) e VMAX (vento máximo no intervalo de 30 min) para dezembro de 2017. A diferença entre VMAX e VMED (DIF) mostra um pico noturno de ≈10 kt e períodos diurnos (por exemplo, final da manhã) com valores também de ≈10 kt. Nos demais horários, os valores são inferiores a 10 kt, ou seja, não representam rajadas de vento.

A Figura 7.17b mostra a série temporal de VMAX e VMED para os dias 17 e 18 de dezembro de 2017. O pico de interesse (relativo ao evento de tempo severo) é a rajada ocorrida às 0230 UTC do dia 18-dez. Nesse horário, o valor de DIF (≈23 kt) supera em ≈13 kt a média para o horário em dezembro de 2017.

Figura 7.17 - Séries temporais para a variável vento: a) Ciclo diário da velocidade média e máxima do vento registrado na estação SBGR para o mês de dezembro de 2017; e b) Série temporal observada na estação nos dias 17 e 18 de dezembro de 2017.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

A Figura 7.18 mostra as séries temporais de DIF observadas na estação para os dias 17 e 18, e para a média do mês de dezembro de 2017, e as previstas pelo modelo GFS. Em relação às séries observadas, o comportamento geral de DIF nos dias 17 e 18 é semelhante à média: valores de DIF menores na madrugada e maiores no início da tarde. Nos dias 17 e 18, em quatro horários o valor de DIF ultrapassa o limiar de rajada (0200 UTC de 17-dez e 0230, 0400 e 2100 UTC de 18-dez). Os dois picos mais intensos de DIF, ocorridos às 0230 e 0400 UTC do dia 18-dez), estão associados ao evento de tempo severo no aeroporto. A previsão do GFS mostra um ciclo diário de DIF defasado do observado, com maiores valores no início da manhã (0900 UTC) e menores durante a tarde (1500 a 2100 UTC). Os valores de DIF superam o limiar de rajada em dois horários: 0900 UTC de 17-dez (não mostrado) e 0900 UTC de 18-dez. Nesses horários, que estão muito defasados (> 6 h) em relação ao horário em que ocorre o evento de tempo severo, o valor de DIF é muito inferior ao observado no momento de ocorrência do evento (0230 UTC do dia 18-dez). Assim, a previsão do GFS, para o evento do dia 18, não é capaz de prever a intensidade da rajada e o seu horário de ocorrência.

Figura 7.18 - Séries temporais com valores de DIF. DIF-MENSAL (linha amarela), DIF-OBS (valor pontual da estação - linha verde) e DIF-GFS (linha azul).

Fonte: Produção do autor.

A Figura 7.19 mostra as séries de DIF simuladas com o WRF nos domínios de 9 e 3 km. Em geral, a mediana dos membros do *ensemble* subestimam os valores observados de DIF, particularmente no domínio de 3 km. Em nenhum horário, a mediana supera o limiar de rajada. No domínio de 9 km, onde a subestimativa de DIF é menor, o ciclo diário da mediana pode ser mais claramente identificado e apresenta um comportamento semelhante ao ciclo observado; no entanto, o ciclo simulado não apresenta os picos na madrugada encontrados nas observações. Por

outro lado, os máximos de *outliers* no domínio de 3 km (em torno de 2200 UTC do dia 17-dez) indicam um valor de rajada que se aproxima do valor observado (embora ainda haja uma expressiva subestimativa). Além disso, a maior dispersão entre os membros no domínio de 9 km entre 0000 e 0200 UTC do dia 18-dez pode indicar com menor erro o horário de ocorrência da rajada. Portanto, nas simulações com o WRF, os máximos de *outliers* no domínio de 3 km podem indicar a intensidade da rajada (embora subestimando), enquanto a maior dispersão no domínio de 9 km podem indicar o seu horário de ocorrência (com erro de poucas horas).

Figura 7.19 - Série temporal do ponto de grade que contém as informações da estação meteorológica SBGR - (DIF): a) grade de 9 km e b) grade de 3 km.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

7.4 Conclusões parciais

Nas simulações de FRAC, verifica-se que o GFS tem um desempenho ruim em representar os instantes, intervalos e valores observados de FRAC durante o estudo de caso. Diferentemente, as simulações obtiveram um bom desempenho em ambos os domínios. Apresentando o domínio de 3 km melhores resultados em relação ao domínio de 9 km.

Para precipitação acima de 1,25 mm/30 min, o GFS e as simulações dos membros no domínio de 9 km aproximam-se dos valores de FRAC observados, mesmo superestimando e subestimando os valores, respectivamente. No domínio de 3 km, as simulações têm um bom desempenho em identificar o instante de ocorrência de FRAC na região de estudo (*box*). Para precipitação acima do limiar 5 mm/30 min, o GFS tem um desempenho muito ruim. No domínio de 9 km, as simulações através dos *outliers* conseguem estimar o instante de ocorrência de FRAC em duas horas. No domínio de 3 km, apresenta um desempenho melhor, pois é possível através dos *outliers* prognosticar a área, o instante e o intervalo de ocorrência de FRAC.

Para PMAX, utilizando o modelo GFS não é possível estimar a intensidade, pois apresenta valores muito inferiores ao observado e o intervalo de ocorrência desses valores estende-se por um longo período de tempo (6 horas). Assim, a utilização do modelo GFS para prognosticar PMAX é muito ruim. Com as simulações do modelo WRF, no domínio de 9 km, utilizando os *outliers* é possível prognosticar o valor de PMAX e o instante de ocorrência do evento extremo. No domínio de 3 km, com a mediana do *ensemble* é possível prognosticar o valor de PMAX, o instante e o intervalo de ocorrência.

Analisando o vento, verifica-se que o GFS e as simulações com o modelo WRF não conseguem estimar a magnitude da rajada, os valores são muito subestimados. No entanto, a dispersão dos membros do *ensemble*, no domínio de 3 km, pode ser usada para estimar o instante de uma probabilidade de ocorrência de um evento extremo. Um fato que chama atenção no domínio de 3 km é o comportamento dos *outliers*, não estima intensidade ou instante de provável ocorrência de rajada. Mas, nota-se que consegue estimar a velocidade de DIF-OBS em grande parte da série. Portanto, as simulações não são capazes de estimar a intensidade e o instante de um provável evento de rajada. Mas, podem indicar através da dispersão dos membros, melhor no domínio de 9 km, um provável intervalo de tempo que possa ter a possibilidade de ocorrer um evento de rajada.

8 ESTUDO DOS MEMBROS DO *ENSEMBLE*

Neste capítulo, busca-se integrar os resultados obtidos na análise das previsões do GFS e do *downscaling* com o WRF nos três estudos de caso. O foco consiste, inicialmente, em obter uma síntese dos erros e acertos das previsões (análise integrada). Em seguida, restringindo-se aos aspectos em que o *downscaling* do WRF possui bom desempenho em todos os casos, verificar a possibilidade de diminuir o número de membros do *ensemble* para reduzir o custo computacional (análise individual dos membros). O tempo de simulações dos membros são apresentados no Apêndice B.

8.1 Análise integrada

A Tabela 8.1 sintetiza o desempenho das simulações numéricas (GFS, WRF 9 km e WRF 3 km) para as variáveis associadas à precipitação nos 3 casos: FRAC com precipitação moderada ou forte, FRAC com precipitação forte e PMAX. Para cada variável, o valor, o instante (t_i) e o intervalo de ocorrência (D_t) são analisados. Para as simulações com o WRF, o desempenho é avaliado com base nas medidas estatísticas do *ensemble*: mediana, dispersão ou *outliers*. Em geral, as células sombreadas indicam que a simulação numérica consegue representar a observação.

O bom desempenho do modelo GFS concentra-se no caso 1: FRAC com precipitação moderada ou forte (valor, instante e intervalo de ocorrência), FRAC com precipitação forte (instante e intervalo de ocorrência) e PMAX (instante de ocorrência com erro de 3,5 h). O instante de ocorrência é estimado pelo pico que ocorre na série temporal do modelo GFS. Nos demais casos, em geral, o GFS não tem um bom desempenho (exceto em relação a aspectos pontuais) ou não pode ser avaliado. Uma limitação importante é que, para todos os casos, o valor de PMAX é muito subestimado pelo GFS.

Para o WRF de 9 km, nota-se um grupo maior de aspectos com um bom desempenho (células sombreadas). Os resultados indicam que o instante de ocorrência de precipitação moderada ou forte pode ser previsto pela mediana (caso 1) ou pelos *outliers* (casos 2 e 3) com erro inferior a 3 h. Para precipitação forte, os *outliers* podem ser utilizados para prever o instante e intervalo de ocorrência, com erro inferior a 2 h. Para PMAX, o valor, o instante de ocorrência (erro < 1 h) e o intervalo de ocorrência (erro $< 2{,}5$ h) podem ser previstos pelos *outliers*.

Para o WRF de 3 km, nota-se uma semelhança com os resultados obtidos para o WRF de 9 km. Porém, além dos *outliers*, a mediana também pode ser usada para

a previsão. Para precipitação forte, nota-se que o valor de FRAC é previsto com pouca subestimativa no caso 3 – trata-se de um desempenho isolado, mas digno de nota porque foi o único caso em que FRAC simulado aproximou-se do observado, e o intervalo de ocorrência pode ser previsto pelos *outliers* com erro inferior a 2 h. Para PMAX, o valor, o instante de ocorrência (erro < 1 h) e intervalo de ocorrência (erro $< 4{,}5$ h no caso 3) podem ser previstos pela mediana.

Tabela 8.1 - Resumo dos resultados obtidos nos 3 estudos de casos utilizando os modelos GFS, WRF 9 km e WRF 3 km. Análise de FRAC, instante e intervalo de ocorrência para os limiares de precipitação moderada, forte e PMAX.

PRECIPITAÇÃO	GFS			WRF 9 KM			WRF 3 KM		
	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 1	CASO 2	CASO 3
% - ÁREA MODERADA	=	SUBESTIMA (-) (-)	SUPERESTIMA (+)	MEDIANA SUBESTIMA (-) (-)	MEDIANA SUBESTIMA (-) (-)	OUTLIERS SUBESTIMA (-) (-)	OUTLIERS SUBESTIMA (-) (-)	OUTLIERS SUBESTIMA (-) (-)	OUTLIERS SUBESTIMA (-) (-)
ti - ÁREA MODERADA	=	ADIANTA 4 h	ADIANTA 6 h	MEDIANA 3 h	OUTLIERS 2 h	OUTLIERS 3 h	OUTLIERS 2 h	RUIM	OUTLIERS 1 h
Dt - ÁREA MODERADA	=	RUIM	RUIM	DISPERSÃO =	DISPERSÃO =	RUIM	DISPERSÃO 7,5 h	DISPERSÃO =	OUTLIERS 1 h
% - ÁREA FORTE	SUBESTIMA (-) (-)	X	SUPERESTIMA (+) (+)	SUBESTIMA (-) (-)	OUTLIERS SUBESTIMA (-) (-)	OUTLIERS SUBESTIMA (-) (-)	OUTLIERS SUBESTIMA (-) (-)	OUTLIERS (-) (-)	OUTLIERS SUBESTIMA (-)
ti - ÁREA FORTE	PICO 1 h	X	RUIM	OUTLIERS 1 h	OUTLIERS 1,5 h	OUTLIERS 2 h	OUTLIERS 3 h	RUIM	OUTLIERS =
Dt - ÁREA FORTE	=	X	RUIM	OUTLIERS =	OUTLIERS 2 h	OUTLIERS 2 h	OUTLIERS 2 h	MEDIANA = OUTLIERS	OUTLIERS =
PMAX	SUBESTIMA (-) (-)	SUBESTIMA (-) (-)	SUBESTIMA (-) (-)	OUTLIERS =	OUTLIERS =	OUTLIERS =	MEDIANA =	MEDIANA = OUTLIERS	MEDIANA =
ti - PMAX	PICO 3,5 h	PICO 4,5 h	RUIM	MEDIANA 30 min OUTLIERS	OUTLIERS 1 h	OUTLIERS =	MEDIANA 30 min	MEDIANA 30 min OUTLIERS	MEDIANA 1 h OUTLIERS
Dt - PMAX	SUPERESTIMA (+) (+)	RUIM	RUIM	OUTLIERS 1 h	OUTLIERS 1 h	OUTLIERS 2,5 h	MEDIANA = DISPERSÃO	MEDIANA = OUTLIERS	MEDIANA 4,5 h OUTLIERS

(-) - SUBESTIMA POUCO
(-) (-) - SUBESTIMA MUITO
(+) - SUPERESTIMA POUCO
(+) (+) - SUPERESTIMA MUITO

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 8.2 mostra os resultados para o vento (DIF) utilizando o GFS e WRF. Em relação ao GFS, os resultados apresentam bom desempenho em prever o valor de DIF somente no caso 1; nos demais casos, os valores são muito subestimados. O instante de ocorrência pode ser previsto com erro < 1 h nos casos 1 e 2. Para esses casos, o intervalo de ocorrência pode ser previsto, sendo que para o caso 1 o intervalo é um pouco superestimado.

As simulações com o WRF nos domínios 9 e 3 km não conseguem prever o valor de DIF (subestima muito) em todos os casos. Por outro lado, utilizando a dispersão dos membros do *ensemble*, é possível prever o instante e o intervalo de ocorrência de rajada com erro de algumas horas (conforme o caso) em ambos os domínios.

Tabela 8.2 - Resumo dos resultados obtidos nos 3 estudos de casos utilizando os modelos GFS, WRF 9 km e WRF 3 km. Análise do valores de DIF, instante e intervalo de ocorrência para um evento de rajada.

VENTO	GFS			WRF 9 KM			WRF 3 KM		
	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 1	CASO 2	CASO 3
DIF	=	SUBESTIMA (-) (-)	SUBESTIMA (-) (-)	SUBESTIMA (-) (-)	SUBESTIMA (-) (-)	SUBESTIMA (-) (-)	SUBESTIMA (-) (-)	SUBESTIMA (-) (-)	SUBESTIMA (-) (-)
ti - DIF	ATRASADO 1 h	PICO 30 min	PICO 6 h	DISPERSÃO =	DISPERSÃO 1 h	DISPERSÃO 2,5 h	DISPERSÃO 1 h	DISPERSÃO =	DISPERSÃO 4 h
Dt - DIF	SUPERESTIMA (+)	PICO =	RUIM	DISPERSÃO =	DISPERSÃO 1 h	DISPERSÃO 2 h	DISPERSÃO 2 h	DISPERSÃO =	DISPERSÃO 3 h

(-) - SUBESTIMA POUCO
(-) (-) - SUBESTIMA MUITO
(+) - SUPERESTIMA POUCO
(+) (+) - SUPERESTIMA MUITO

Fonte: Produção do autor.

8.2 Análise individual dos membros

Nesta seção, avalia-se o desempenho individual de cada membro do *ensemble* do modelo WRF. Enfocam-se os aspectos em que, na seção anterior (análise integrada), houve um bom desempenho para os 3 casos. A seguinte metodologia é adotada. Para o caso 1, analisa-se o intervalo temporal entre 2030 10-mar e 0100 11-mar UTC; para o caso 2, entre 1730 e 2100 UTC 6-fev; e para o caso 3, entre 1900 UTC 17-dez e 0200 UTC 18-dez. Para cada horário dos intervalos, classificam-se em ordem decrescente os valores dos 9 membros. A posição 1 corresponde aos *outliers*, a 5, à mediana; e a dispersão decorre dos membros nas posições 2, 3, 7 e 8. Para um dado caso, considerando todos os horários no intervalo temporal, é possível verificar, por exemplo, quais membros são mais frequentes na posição 1, ou seja, quais membros estão associados aos *outliers*. De forma análoga, é possível verificar quais membros estão associados à mediana e à dispersão.

8.2.1 Precipitação

A Tabela 8.3 mostra os resultados para FRAC com precipitação forte no domínio de 9 km. Foi visto que os *outliers* podem ser utilizados para prever o instante e intervalo

de ocorrência nos 3 casos. Para o caso 1, nota-se que o membro A2 aparece na posição 1 em um número muito maior (14 vezes) que os demais membros. Para o caso 2, novamente o membro A2 aparece na posição 1 em um número maior (5 vezes), mas outros membros, A4 e A7, também aparecem na posição 1 com um número próximo (3 vezes). Para o caso 3, de forma semelhante ao caso 1, o membro A2 aparece na posição 1 em um número muito maior (9 vezes) que os demais. Considerando todos os casos (soma), nota-se que o membro A2 tem um número muito superior aos demais membros na posição 1.

Tabela 8.3 - Análise individual dos resultados obtidos em cada estudo de caso utilizando o *boxplot* através das medidas estatísticas dispersão, mediana e *outliers*. Precipitação forte - Domínio de 9 km.

PRECIPITAÇÃO FORTE 9 km – Estudo de caso 1									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	0	14	0	2	0	0	0	2	0
2-DISPERSÃO	0	1	4	6	0	0	0	0	0
3-DISPERSÃO	1	0	1	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5-MEDIANA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7-DISPERSÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8-DISPERSÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9-OUTLIERS	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PRECIPITAÇÃO FORTE 9 km – Estudo de caso 2									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	0	5	0	3	0	0	3	0	0
2-DISPERSÃO	0	2	0	5	0	0	0	0	0
3-DISPERSÃO	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5-MEDIANA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7-DISPERSÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8-DISPERSÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9-OUTLIERS	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PRECIPITAÇÃO FORTE 9 km – Estudo de caso 3									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	0	9	0	1	0	0	0	0	0
2-DISPERSÃO	0	0	3	3	0	0	1	0	0
3-DISPERSÃO	1	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5-MEDIANA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7-DISPERSÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8-DISPERSÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9-OUTLIERS	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PRECIPITAÇÃO FORTE 9 km – SOMA TOTAL									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	0	28	0	6	0	0	3	2	0
2-DISPERSÃO	0	3	7	14	0	0	1	0	0
3-DISPERSÃO	3	0	2	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5-MEDIANA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7-DISPERSÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8-DISPERSÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9-OUTLIERS	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 8.4 mostra os resultados para FRAC com precipitação forte no domínio de 3 km. Foi visto que os *outliers* podem ser usados para identificar o intervalo de ocorrência de precipitação forte. Os resultados são semelhantes aos encontrados no domínio de 9 km: o membro A2 aparece na primeira posição em um número muito superior aos demais membros.

Tabela 8.4 - Análise individual dos resultados obtidos em cada estudo de caso utilizando o *boxplot* através das medidas estatísticas dispersão, mediana e *outliers*. Precipitação forte - Domínio de 3 km.

PRECIPITAÇÃO FORTE 3 km – Estudo de caso 1									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	0	24	0	5	0	0	0	0	0
2-DISPERSÃO	0	5	0	20	0	0	0	0	1
3-DISPERSÃO	2	0	3	1	0	3	0	7	6
4	3	0	6	0	0	3	1	4	2
5-MEDIANA	3	0	2	0	0	2	0	2	2
6	1	0	1	0	0	3	0	0	2
7-DISPERSÃO	1	0	1	0	0	1	1	1	1
8-DISPERSÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9-OUTLIERS	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PRECIPITAÇÃO FORTE 3 km – Estudo de caso 2									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	0	8	0	2	0	0	0	0	0
2-DISPERSÃO	0	0	0	6	0	0	1	3	0
3-DISPERSÃO	3	1	0	0	1	2	1	2	0
4	5	0	0	1	0	1	1	1	1
5-MEDIANA	1	1	0	1	3	0	4	0	0
6	0	0	0	0	0	4	1	4	1
7-DISPERSÃO	1	0	1	0	5	0	2	0	1
8-DISPERSÃO	0	0	4	0	0	3	0	0	3
9-OUTLIERS	0	0	5	0	1	0	0	0	4

PRECIPITAÇÃO FORTE 3 km – Estudo de caso 3									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	1	14	1	0	0	0	1	0	0
2-DISPERSÃO	2	1	5	1	0	2	0	2	0
3-DISPERSÃO	0	0	1	4	2	1	1	2	2
4	0	0	1	3	1	3	2	3	0
5-MEDIANA	3	0	0	2	1	2	2	1	2
6	0	1	3	1	1	2	1	2	2
7-DISPERSÃO	1	0	1	2	3	1	3	1	1
8-DISPERSÃO	2	1	1	0	1	2	2	2	2
9-OUTLIERS	4	0	0	0	4	0	1	0	4

PRECIPITAÇÃO FORTE 3 km – SOMA TOTAL									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	1	46	1	7	0	0	1	0	0
2-DISPERSÃO	2	6	5	27	0	2	1	5	1
3-DISPERSÃO	5	1	4	5	3	6	2	11	8
4	8	0	7	4	1	7	4	8	3
5-MEDIANA	7	1	2	3	4	4	6	3	4
6	1	1	4	1	1	9	2	6	5
7-DISPERSÃO	3	0	3	2	8	2	6	2	3
8-DISPERSÃO	2	1	5	0	1	5	2	2	5
9-OUTLIERS	4	0	5	0	5	0	1	0	8

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 8.5 mostra os resultados de PMAX para o domínio de 9 km. Foi visto que os *outliers* podem ser usados para prever o valor, instante e intervalo de ocorrência de PMAX. Para o caso 1, os membros A2, A4 e A8 aparecem em um maior número de vezes na posição 1; para o caso 2, o membro A4; e para o caso 3, o membro A2. Considerando a soma de todos os casos, os membros A2 e A4 aparecem mais vezes.

Tabela 8.5 - Análise individual dos resultados obtidos em cada estudo de caso utilizando o *boxplot* através das medidas estatísticas dispersão, mediana e *outliers*. PMAX - Domínio de 9 km.

PMAX 9 km – Estudo de caso 1									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	4	17	3	8	1	2	1	7	0
2-DISPERSÃO	3	3	16	9	3	2	2	2	3
3-DISPERSÃO	2	3	14	2	3	3	3	4	9
4	4	0	5	2	3	12	3	3	11
5-MEDIANA	5	1	5	3	8	7	1	3	10
6	3	1	0	7	10	14	5	1	2
7-DISPERSÃO	6	4	0	4	8	2	3	12	4
8-DISPERSÃO	7	9	0	3	5	1	8	7	3
9-OUTLIERS	9	5	0	5	2	0	17	4	1

PMAX 9 km – Estudo de caso 2									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	1	2	2	6	0	0	3	0	1
2-DISPERSÃO	1	5	2	2	1	0	1	2	1
3-DISPERSÃO	4	0	1	0	3	1	2	3	1
4	1	2	1	1	0	4	4	2	0
5-MEDIANA	0	1	2	1	2	2	4	1	2
6	2	2	1	1	4	1	0	0	4
7-DISPERSÃO	2	1	3	0	3	2	1	2	1
8-DISPERSÃO	3	1	1	1	2	1	0	3	3
9-OUTLIERS	1	1	2	3	0	4	0	2	2

PMAX 9 km – Estudo de caso 3									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	0	5	1	1	0	0	0	0	0
2-DISPERSÃO	0	1	3	2	0	0	1	0	0
3-DISPERSÃO	1	1	1	2	0	0	1	1	0
4	1	0	0	0	0	0	1	4	1
5-MEDIANA	1	0	1	1	0	3	1	0	0
6	1	0	1	0	1	1	0	1	2
7-DISPERSÃO	0	0	0	1	4	1	0	1	0
8-DISPERSÃO	0	0	0	0	0	2	3	0	2
9-OUTLIERS	3	0	0	0	2	0	0	0	2

PMAX 9 km – SOMA TOTAL									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	5	24	6	15	1	2	4	7	1
2-DISPERSÃO	4	9	21	13	4	2	4	4	4
3-DISPERSÃO	7	4	16	4	6	4	6	8	10
4	6	2	6	3	3	16	8	9	12
5-MEDIANA	6	2	8	5	10	12	6	4	12
6	6	3	2	8	15	16	5	2	8
7-DISPERSÃO	8	5	3	5	15	5	4	15	5
8-DISPERSÃO	10	10	1	4	7	4	11	10	8
9-OUTLIERS	13	6	2	8	4	4	17	6	5

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 8.6 mostra os resultados de PMAX para o domínio de 3 km. Foi visto que a mediana do *ensemble* pode ser utilizada para prever o valor, instante e intervalo de ocorrência de PMAX. Para o caso 1, a posição 5 é ocupada mais vezes pelos membros A1, A6, A8 e A9; para o caso 2, pelos membros A1, A7 e A9; e para o caso 3, pelos membros A4 e A5. Considerando a soma de todos os casos, a posição 5 é ocupada mais vezes pelos membros A1, A5, A6 e A9. Assim, esses 4 membros são

recomendados para prever o valor, instante e intervalo de ocorrência de PMAX no domínio de 3 km.

Tabela 8.6 - Análise individual dos resultados obtidos em cada estudo de caso utilizando o *boxplot* através das medidas estatísticas dispersão, mediana e *outliers*. PMAX - Domínio de 3 km.

PMAX 3 km – Estudo de caso 1									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	0	0	0	0	7	1	5	0	0
2-DISPERSÃO	2	0	2	0	4	0	4	0	1
3-DISPERSÃO	4	0	1	0	1	2	3	1	1
4	1	0	4	0	0	3	1	1	3
5-MEDIANA	3	0	0	0	1	3	0	3	3
6	2	1	1	1	0	2	0	3	3
7-DISPERSÃO	1	0	5	1	0	2	0	3	1
8-DISPERSÃO	0	6	0	5	0	0	0	1	1
9-OUTLIERS	0	6	0	6	0	0	0	1	0

PMAX 3 km – Estudo de caso 2									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	0	2	7	0	3	7	0	1	1
2-DISPERSÃO	3	2	2	0	3	5	3	0	3
3-DISPERSÃO	1	0	3	0	3	2	2	5	5
4	5	1	1	2	1	1	5	2	3
5-MEDIANA	4	0	2	0	2	2	4	2	5
6	2	0	3	2	3	4	3	3	1
7-DISPERSÃO	4	4	1	0	3	0	2	5	2
8-DISPERSÃO	1	6	1	8	1	0	2	2	0
9-OUTLIERS	1	6	1	9	2	0	0	1	1

PMAX 3 km – Estudo de caso 3									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	5	1	0	0	6	1	0	2	2
2-DISPERSÃO	3	0	1	0	3	2	3	1	4
3-DISPERSÃO	1	0	2	1	2	4	3	1	3
4	2	2	1	1	1	7	3	0	0
5-MEDIANA	2	2	2	3	4	2	0	1	1
6	0	0	2	3	0	0	5	4	3
7-DISPERSÃO	2	3	2	4	1	0	3	1	1
8-DISPERSÃO	2	3	4	5	0	1	0	0	2
9-OUTLIERS	0	6	3	0	0	0	0	7	1

PMAX 3 km – SOMA TOTAL									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1-OUTLIERS	5	3	7	0	16	9	5	3	3
2-DISPERSÃO	8	2	5	0	10	7	10	1	8
3-DISPERSÃO	6	0	6	1	6	8	8	7	9
4	8	3	6	3	2	11	9	3	6
5-MEDIANA	9	2	4	3	7	7	4	6	9
6	4	1	6	6	3	6	8	10	7
7-DISPERSÃO	7	7	8	5	4	2	5	9	4
8-DISPERSÃO	3	15	5	18	1	1	2	3	3
9-OUTLIERS	1	18	4	15	2	0	0	9	2

Fonte: Produção do autor.

8.2.2 Vento

A Tabela 8.7 mostra os resultados do vento (DIF) para o domínio de 9 km. No caso 1, os membros do *ensemble* que se destacam com um maior número de vezes nas posições 2 e 3 são A1, A2, A4, e os membros que se destacam nas posições 7 e 8 são A5 e A9. Para a dispersão do caso 1, portanto, podem-se utilizar 5 membros para obter a dispersão. Para o caso 2, o número de membros necessário para obter a dispersão aumenta. Os membros A2, A3 e A4 ocupam as posições 2 e 3. Uma quantidade maior de membros ocupa as posições 7 e 8: A1, A5, A8 e A9. Para o caso 3, membros diferentes dos anteriores levam à dispersão. Nas posições 2 e 3, os membros A3, A4 e A6 aparecem mais vezes; e nas posições 7 e 8, os membros A1, A7 e A8. Considerando a soma de todos os casos, os membros A1, A2, A3 e A4 ocupam as posições 2 e 3 mais vezes, enquanto os membros A1, A5, A7 A8 e A9 ocupam as posições 7 e 8. Assim, levando-se também em conta o tempo de simulação (Tabela B.1), o conjunto envolvendo as configurações A1, A4, A8 e A9 poderia ser suficiente para representar a dispersão. Obviamente, a inclusão dos membros A2 e A3 no conjunto melhoraria a representação da dispersão, mas o tempo de simulação desses membros é muito alto.

Tabela 8.7 - Análise individual dos resultados obtidos em cada estudo de caso utilizando o *boxplot* através das medidas estatísticas dispersão, mediana e *outliers*. DIF - Domínio de 9 km.

DIF 9 km – Estudo de caso 1									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1- OUTLIERS	0	18	0	10	1	1	0	2	0
2-DISPERSÃO	2	9	3	13	2	0	0	3	0
3-DISPERSÃO	11	0	4	3	1	3	6	4	0
4	4	2	4	3	3	0	3	10	3
5-MEDIANA	2	2	8	3	6	2	8	1	0
6	1	1	7	0	4	9	4	4	2
7-DISPERSÃO	2	0	0	0	10	3	6	2	9
8-DISPERSÃO	3	0	2	0	4	5	2	4	12
9-OUTLIERS	7	0	4	0	1	9	3	2	6

DIF 9 km – Estudo de caso 2									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1- OUTLIERS	0	10	1	8	0	0	0	0	0
2-DISPERSÃO	0	7	3	5	1	0	1	1	1
3-DISPERSÃO	3	1	6	1	0	3	1	2	2
4	3	0	3	0	3	7	2	0	1
5-MEDIANA	2	0	3	0	3	0	3	2	6
6	2	1	1	4	1	4	1	4	1
7-DISPERSÃO	4	0	0	1	5	1	0	4	4
8-DISPERSÃO	2	0	2	0	3	3	4	3	2
9-OUTLIERS	3	0	0	0	3	1	7	3	2

DIF 9 km – Estudo de caso 3									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1- OUTLIERS	0	12	0	1	0	0	0	0	0
2-DISPERSÃO	0	1	3	7	0	2	0	0	0
3-DISPERSÃO	0	0	6	1	1	3	0	1	1
4	0	0	0	0	4	4	0	0	5
5-MEDIANA	0	0	0	1	3	2	0	0	7
6	0	0	3	3	4	2	0	1	0
7-DISPERSÃO	1	0	1	0	1	0	5	5	0
8-DISPERSÃO	5	0	0	0	0	0	4	4	0
9-OUTLIERS	7	0	0	0	0	0	4	2	0

DIF 9 km – SOMA TOTAL									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1- OUTLIERS	0	40	1	19	1	1	0	2	0
2-DISPERSÃO	2	17	9	25	3	2	1	4	1
3-DISPERSÃO	14	1	16	5	2	9	7	7	3
4	7	2	7	3	10	11	5	10	9
5-MEDIANA	4	2	11	4	12	4	11	3	13
6	3	2	11	7	9	15	5	9	3
7-DISPERSÃO	7	0	1	1	16	4	11	11	13
8-DISPERSÃO	10	0	4	0	7	8	10	11	14
9-OUTLIERS	17	0	4	0	4	10	14	7	8

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 8.8 mostra os resultados do vento (DIF) para o domínio de 3 km. No caso 1, os membros A2, A4 e A6 ocupam mais vezes as posições 2 e 3; os membros A1, A7, A8 e A9, as posições 7 e 8. No caso 2, os membros têm em geral um comportamento oposto ao do caso 1: os membros A7, A8 e A9 ocupam as posições 2 e 3; os membros A3 e A6, as posições 7 e 8. No caso 3, os membros A2, A4 e A8 ocupam mais vezes as posições 2 e 3; os membros A5, A6 e A9, as posições 7 e 8. Considerando

a soma de todos os casos, o número de membros pode ser reduzido para seis: A2, A4 e A8 (posições 2 e 3), e A3, A6 e A9 (posições 7 e 8). Se os membros A2 e A3 forem retirados devido ao maior tempo de simulação, o conjunto reduz-se para quatro membros: A4, A8 (posições 2 e 3), A6 e A9 (posições 7 e 8).

Tabela 8.8 - Análise individual dos resultados obtidos em cada estudo de caso utilizando o *boxplot* através das medidas estatísticas dispersão, mediana e *outliers*. DIF - Domínio de 3 km.

DIF 3 km – Estudo de caso 1									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1- OUTLIERS	1	10	3	5	1	1	0	2	3
2-DISPERSÃO	2	5	1	7	3	6	2	0	0
3-DISPERSÃO	2	5	5	3	1	1	1	4	4
4	1	1	5	3	4	1	3	4	4
5-MEDIANA	6	2	0	4	3	3	4	2	2
6	6	2	4	1	3	2	2	2	4
7-DISPERSÃO	2	0	4	2	2	1	5	5	5
8-DISPERSÃO	5	1	0	1	4	4	5	3	3
9-OUTLIERS	1	0	4	0	5	7	4	4	1

DIF 3 km – Estudo de caso 2									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1- OUTLIERS	0	3	3	2	2	2	1	3	4
2-DISPERSÃO	1	4	0	1	1	1	2	6	4
3-DISPERSÃO	5	1	2	3	1	0	5	0	3
4	2	3	1	3	3	2	1	4	1
5-MEDIANA	1	2	1	6	3	3	1	2	1
6	4	1	1	1	5	2	3	0	3
7-DISPERSÃO	5	2	3	0	1	5	0	1	3
8-DISPERSÃO	0	2	5	0	3	4	3	2	1
9-OUTLIERS	2	2	4	4	1	1	4	2	0

DIF 3 km – Estudo de caso 3									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1- OUTLIERS	20	1	0	0	0	0	0	0	0
2-DISPERSÃO	0	6	0	4	0	1	4	5	1
3-DISPERSÃO	0	7	0	5	0	3	1	4	1
4	0	3	5	4	3	0	1	4	1
5-MEDIANA	0	1	2	2	3	1	8	3	1
6	1	1	4	0	2	3	2	2	6
7-DISPERSÃO	0	1	2	1	7	6	0	0	4
8-DISPERSÃO	0	1	5	2	1	2	3	2	5
9-OUTLIERS	0	0	3	3	5	5	2	1	2

DIF 3 km – SOMA TOTAL									
POSIÇÃO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1- OUTLIERS	21	14	6	7	3	3	1	5	7
2-DISPERSÃO	3	15	1	12	4	8	8	11	5
3-DISPERSÃO	7	13	7	11	2	4	7	8	8
4	3	7	11	10	10	3	5	12	6
5-MEDIANA	7	5	3	12	9	7	13	7	4
6	11	4	9	2	10	7	7	4	13
7-DISPERSÃO	7	3	9	3	10	12	5	6	12
8-DISPERSÃO	5	4	10	3	8	10	11	7	9
9-OUTLIERS	3	2	11	7	11	13	10	7	3

Fonte: Produção do autor.

8.3 Discussão

O trabalho baseia-se na hipótese de que o *downscaling* com o modelo WRF é capaz de atenuar limitações das previsões do GFS em relação à precipitação e ao vento em eventos de tempo severo. Essas limitações decorrem de diversos fatores e, em particular, do espaçamento de grade do modelo. O aumento da resolução horizontal nas simulações com o WRF, ao resolver os processos de menor escala, tenderia a levar a um melhor desempenho (YAN; GALLUS JUNIOR, W. A., 2016).

De fato, os resultados mostram que as simulações com o WRF nos domínios de 9 e 3 km utilizando a técnica de *ensemble* melhoram o desempenho. Por exemplo, PMAX é bem prevista em ambos os domínios para todos os casos, ao contrário das previsões de GFS, que subestimam muito o valor de PMAX. No entanto, nem todas as limitações das previsões do GFS são atenuadas. Por exemplo, a magnitude da rajada (DIF) é em geral subestimada tanto nas previsões do GFS quanto mas simulações com o WRF.

O trabalho utiliza um *ensemble* de 9 membros. Do ponto de vista operacional, esse número pode ser muito custoso computacionalmente. Surge, então, a seguinte questão: para reproduzir as medidas estatísticas do *ensemble* (mediana, dispersão e *outliers*), seria possível reduzir o número de membros?

A escolha de membros específicos precisa levar em conta que o custo computacional varia conforme o membro. Em geral, os membros A2 e A3 consomem muito tempo computacional – quase o triplo em relação aos outros membros (Tabela B.1). Esses membros diferem dos demais em relação aos esquemas de parametrização de radiação de onda longa e de onda curta (*ra_lw_physics* = RRTMG e *ra_sw_phisics* = RRTMG, respectivamente). Vale ressaltar que esses esquemas são recomendados para simulações operacionais com o modelo WRF entre 1 e 4 km (WANG et al., 2017).

Em relação aos aspectos da precipitação que são bem previstos pelos *outliers* nos domínios de 9 e 3 km, o membro A2 destaca-se. Esse membro difere dos demais em relação ao esquema de microfísica de nuvens (*mp_phisics* = WSM6). Esse esquema é adequado para simulações de alta resolução (WANG et al., 2017). No entanto, como o custo computacional relativo ao membro A2 é alto, quando os recursos computacionais são modestos, as simulações podem ser restritas a somente esse membro em um único domínio (9 km). Havendo maior oferta computacional, as simulações nos domínios de 9 e 3 km podem ser confrontadas para uma melhor robustez dos resultados.

Especificamente para PMAX, podem-se executar somente os membros A1, A5, A6 e A9 no domínio de 3 km. Esses membros têm menor custo computacional e sua mediana tem um bom desempenho para PMAX.

Em relação ao vento (DIF), a dispersão dos membros nos domínios de 9 e 3 km pode ser obtida pelos membros A1, A4, A6, A8 e A9 (5 membros). Esse conjunto, por não conter os membros A2 e A3, pode levar a bons resultados com menor custo computacional.

9 ANÁLISES ADICIONAIS

Os resultados obtidos neste estudo mostram um bom desempenho do *downscaling* de previsões numéricas globais utilizando um *ensemble* de simulações de alta resolução com o modelo WRF. Ebert (2008) afirma que simulações em alta resolução podem apresentar resultados muito realistas e, assim, constituir-se em uma informação efetivamente útil ao previsor meteorologista. Metodologicamente, a aplicação do método DIST permite reduzir a exigência de correspondências exatas (para cada ponto de grade) entre as simulações e a observação, enquanto a utilização das métricas de *ensemble* (integradas em *boxplot* e dispostas em séries temporais) é útil na previsão de aspectos específicos, como mostrado anteriormente.

Nesta seção, em vez da série temporal de métricas de *ensemble*, abordam-se os campos de cada membro em relação ao padrão espacial observado. Por simplicidade, somente o caso 1 é analisado.

9.1 Precipitação

A Figura 9.1 mostra a série temporal de PMAX no domínio de 9 km para cada membro. Para esse domínio, os *outliers* de PMAX são úteis para a previsão (Subseção 5.3.1). No momento do pico de interesse (2030 UTC do dia 10-mar de 2016), o membro A2 claramente é um *outlier* em relação aos demais membros. A Figura 9.2 mostra o campo de precipitação às 2030 UTC para cada membro. Nesse horário, as observações (Figura 9.2a) mostram sistemas precipitantes a oeste e noroeste da caixa (valores ≈20 mm/30 min). Enquanto a maioria dos membros apresenta valores muito baixos de precipitação dentro da caixa, o membro A2 (Figura 9.2c) é o único que apresenta um padrão espacial de precipitação coerente com o observado. A intensidade, também, é bem representada pelo membro.

Figura 9.1 - Série temporal com as simulações no domínio de 9 km, dados do CMORPH e observados na estação. PMAX - *Outliers*

Fonte: Produção do autor.

Figura 9.2 - Estudo de caso 1 - Comparações entre os dados do CMORPH e as simulações no domínio de 9 km (WRF) - às 2030 UTC do dia 10 de março de 2016. PMAX - *Outliers*.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 9.3 mostra a série temporal de PMAX para cada membro no domínio de 3 km. Para esse domínio, a mediana de PMAX é útil para a previsão (Subseção 5.3.1). No entanto, não é possível escolher o membro que melhor representa a mediana. A Figura 9.4 mostra os campos de precipitação de cada membro para o domínio de 3 km. Diferentemente do que ocorre no domínio de 9 km (em que todos, exceto o membro A2, simulam pouca precipitação na caixa), para o domínio de 3 km mais da metade dos membros simula altos valores de precipitação na caixa (A1, A2, A4, A6 e A9), enquanto os demais simulam pouca precipitação. Para quase metade dos membros, o padrão espacial assemelha-se ao observado, com altos valores de precipitação a oeste e noroeste da caixa. Em geral, como a metade dos membros superestima PMAX, enquanto a outra metade subestima, a média (mediana) representaria melhor a observação. Isso ajuda a entender por que a mediana do *ensemble* é útil na previsão de PMAX.

Figura 9.3 - Série temporal com as simulações no domínio de 3 km, dados do CMORPH e observados na estação. PMAX - Mediana.

Fonte: Produção do autor.

Figura 9.4 - Estudo de caso 1 - Comparações entre os dados do CMORPH e as simulações no domínio de 3 km (WRF) - às 2030 UTC do dia 10 de março de 2016. PMAX - Mediana.

Fonte: Produção do autor.

9.2 Vento

A Figura 9.5 mostra as séries temporais de DIF para cada membro nos domínios de 9 e 3 km. Como concluído anteriormente (Subseção 5.3.2), as métricas de *ensemble* não são capazes de prever o valor de DIF observados, ou seja, a magnitude da rajada. De fato, nenhum membro é capaz de reproduzir os picos de DIF observados (Figura 9.5a) e, inclusive, os resultados para o domínio de 3 km (Figura 9.5b) são piores que o domínio de 9 km (Figura 9.5a).

Figura 9.5 - Série temporal com as simulações no domínio de 9 km, dados de DIF para o ponto centrado no aeroporto. DIF - Dispersão.

(a)

(b)

Fonte: Produção do autor.

O fato de usar somente o ponto de grade do aeroporto pode ser uma razão da dificuldade das simulações em prever a magnitude rajada. Assim, para utilizar a técnica DIST também para o vento, foram realizados vários testes com diferentes tamanhos de caixas do método DIST (não mostrado). A Figura 9.6 mostra o resultado com o melhor desempenho. Esse resultado é obtido da seguinte forma. Para um dado horário e um dado membro, computa-se DIF para cada ponto de grade da caixa, e então somente o maior valor de DIF na caixa (DIFMAX, análogo a PMAX) é utilizado para o cálculo das métricas de *ensemble*. Para o caso 1, o uso de DIFMAX no domínio de 3 km apresenta o melhor desempenho: a mediana do *ensemble* é capaz de reproduzir a intensidade de DIF. Nota-se na série que as simulações indicam um valor de rajada às 2030 UTC 10-mar e sua intensidade de 10,5 kt que é próximo do valor observado (13 kt). Outro fator importante é que o instante e intervalo de ocorrência é verificado também pela mediana do *ensemble*.

Figura 9.6 - Série temporal com as simulações no domínio de 3 km, dados de DIFMAX para cada ponto de grade da caixa DIST.

(a)

Fonte: Produção do autor.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho avaliou o desempenho de simulações numéricas utilizando o modelo WRF em 3 eventos de tempo severo ocorridos entre 2016 e 2017 na região do Aeroporto Internacional de São Paulo – Guarulhos. A escolha dessa região foi motivada pelo fato de que a ocorrência de tempo severo (precipitação intensa e rajadas de vento) interfere diretamente no tráfego aéreo do aeroporto, além da possibilidade de levar a outros impactos socioeconômicos na região. No 3 casos, a condição sinótica foi comum e consistiu na atuação de um SF sobre a região. Usualmente, os SFs são bem previstos por modelos globais, tal como o GFS. Assim, seria possível prever, com antecedência de alguns dias, a mudança do tempo devido à entrada de SFs. No entanto, um aspecto mais desafiador é prever a ocorrência de tempo severo quando da atuação de SFs. O trabalho procurou contribuir a esse aspecto, restringindo-se à previsão útil de 24 horas (curto prazo). A hipótese foi de que simulações com um modelo regional, o WRF, seriam capazes de prever características do tempo severo nos 3 casos estudados.

Na análise observacional dos casos, notou-se que a ocorrência de tempo severo esteve associada a sistemas convectivos organizados em escala regional (mesoescala) inseridos na extensa banda de nebulosidade decorrente do SF. Assim, utilizou-se um índice (SA-MCS), recentemente proposto por Rasera (2017), para verificar se os sistemas convectivos iniciaram-se (ou se desenvolveram) sobre as áreas com maior potencial de iniciação de sistemas convectivos de mesoescala segundo o índice. Os resultados foram bons para os 3 eventos, indicando a aplicabilidade do SA-MCS em diagnosticar as regiões favoráveis à iniciação ou ao desenvolvimento de sistemas convectivos associados à ocorrência de tempo severo.

As simulações em foram forçadas por previsões do GFS e realizadas sobre 2 domínios aninhados (aproximadamente centrados no Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos) com espaçamento horizontal de 9 e 3 km. Foi utilizado método de MPE com 9 membros. A escolha dos esquemas de parametrização baseou-se nos utilizados por centros operacionais ou encontrados em trabalhos científicos. Para a precipitação, os resultados foram analisados para uma região de 100 km x 100 km centrada no aeroporto (caixa); para o vento, o ponto de grade que contém o aeroporto. O desempenho das previsões foi avaliado, no caso da precipitação, para a fração de área da caixa (FRAC) com precipitação moderada ou forte, a FRAC com precipitação forte e a precipitação máxima na caixa (PMAX); no caso do vento, para a rajada (DIF).

Para os 3 casos, em relação aos aspectos do tempo severo (FRAC, PMAX e DIF), os resultados mostraram que o GFS tem um desempenho, em geral, modesto. A sua utilidade restringe-se à previsão da FRAC com precipitação moderada ou forte (previsão correta em 1 ou 2 casos) e de DIF (1 caso).

As simulações com o modelo WRF melhoraram o desempenho em alguns aspectos importantes.
- O instante de ocorrência e a duração de precipitação forte (pico de FRAC) pôde ser previsto pelos *outliers* nos domínios de 9 e 3 km.
- O valor, o instante de ocorrência e a duração da precipitação máxima (pico de PMAX) pôde ser prevista pelos *outliers* no domínio de 9 km e pela mediana no domínio de 3 km.
- O instante de ocorrência e a duração das rajadas (DIF) pôde ser previsto pela dispersão nos domínios de 9 e 3 km.
Todos esses aspectos foram válidos para os 3 casos e, pelo fato de serem válidos para os 2 domínios, trata-se de um resultado robusto.

Apesar das melhorias promovidas com o uso de simulações com o MPE, existem aspectos que não foram bem previstos. Por exemplo, o valor da fração de área da caixa com precipitação forte (FRAC) e o valor da rajada (DIF) foram subestimadas de forma expressiva em todos os casos tanto pelo GFS quanto pelo WRF. Isso indica a necessidade de estudos adicionais para encontrar meios de superar esse insucesso.

O número de membros utilizado foi de 9. A análise individual dos membros mostrou que seria possível reduzir esse número quando os recursos computacionais são escassos. Vale ressaltar que os recursos computacionais do CPTEC (supercomputador) não foram utilizados devido ao caráter exploratório do trabalho e para emular os meios computacionais e operacionais disponíveis de centros como o CIMAER. Cabe mencionar também que os resultados das simulações podem apresentar pequenas diferenças se outros equipamentos forem utilizados (problema de representatividade binária).

No caso dos aspectos referentes à precipitação:
- Se for viável executar as simulações em somente 1 domínio, recomenda-se executar o membro A2 no domínio de 9 km (embora o membro A2 tenha um alto custo computacional).
- Havendo recurso computacional adicional, recomenda-se executar também os membros A1, A5, A6 e A9 (4 membros) no domínio de 3 km. Esses membros têm menor custo computacional e sua mediana tem um bom desempenho para PMAX.

No caso dos aspectos referentes ao vento (DIF), a dispersão dos membros nos domínios de 9 e 3 km pode ser obtida pelos membros A1, A4, A6, A8 e A9 (5 membros).

Em síntese, para uma região específica – o Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos – os 3 casos de atuação de SF, o presente trabalho mostrou o potencial das simulações com o MPE para prever aspectos do tempo severo (FRAC, PMAX e DIF) que não são bem representados pelas previsões do GFS. Para os aspectos com um bom desempenho, o trabalho mostrou quais métricas do *ensemble* são importantes em cada domínio. O trabalho mostrou também quais aspectos não foram bem previstos e uma forma de reduzir o número de membros quando os recursos computacionais forem escassos.

Espera-se que os resultados do trabalho possam ser utilizados por centros operacionais de previsão, como o Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica (CIMAER), e possam assistir a tomada de decisões operacionais envolvendo tempo severo para o aeroporto. O trabalho também poderá assistir a emissão de alertas meteorológicos (Defesa Civil) sobre a ocorrência de precipitação intensa e rajadas de vento.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- testar outros esquemas de parametrização para obter valores realistas de FRAC e DIF;
- executar as simulações com MPE para um período mais longo (1 trimestre ou 1 ano, por exemplo) para ratificar os resultados obtidos de 3 casos;
- analisar os resultados do membro A2 de forma detalhada, pois a análise individual dos membros sugere que as simulações para esse membro no domínio de 9 km são úteis para os aspectos relativos à precipitação (apesar do seu alto custo computacional); e
- encontrar uma forma de utilizar o método DIST (caixa) para o vento evitando as áreas em que ocorre aceleração devido à topografia (essa sugestão já foi preliminarmente abordada no trabalho).
- realizar análise de sensibilidade sobre as parametrizações físicas, voltadas especificamente para a região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, R. C. d. **Analise de mesoescala de um evento convectivo em São Paulo e da assimilacão de dados em simulacões com o modelo WRF**. 125 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo (USP), São Paulo - SP, 2016. 146

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. **Anuário do transporte aéreo**. 2016. 228p. Relatório técnico. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/anuario/Anuario2016.zip>. 10

ALMEIDA, V. A. de; MARTON, E. Chuvas intensas em Santa Catarina: análise sinótica de um evento extremo e simulação numérica com o modelo atmosférico WRF. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 37, n. 2, p. 169–179, 2014. 146

ALVES, A. O. **Estudo observacional e numérico dos padrões de ventos superficiais no litoral do Ceará**. 72 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal do Ceará (UFCE), Fortaleza - CE, 2016. 146

AMORIM, M. C. A. L. **Análise e refinamento estatístico dos prognóstico do vento com o modelo WRF no Estado de Alagoas.** 77 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió - AL, 2015. 146

ATGER, F. Verification of intense precipitation forecasts from single models and ensemble prediction systems. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 8, n. 6, p. 401–417, 2001. 6

AYLAS, G. Y. R. **Análise da influência da especialização do uso e ocupação do solo e do uso da técnica de assimilação de dados meteorológicos na performance do modelo WRF.** 129 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Ambiental) — Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória - ES, 2017. 146

BASSO, J. L. M.; MACEDO, L. R.; YAMASAKI, Y. Avaliação da extensão dos horizontes de integração temporal do wrf nos prognósticos do vento. **Revista Ciência e Natura**, v. 36, p. 491–496, 2014. 5, 146

BRITO, A. L.; MACEDO, L. R.; YAMASAKI, Y. **Avaliação da extensão dos horizontes de integração temporal do WRF nos prognósticos do vento**.

[S.l.]: Universidade do Estado do Amazonas/Escola Superior de Tecnologia (UEA/EST), 2011. 146

BRITO, L. S. d. O. **Estudo de ilhas de calor na região metropolitana de Fortaleza utilizando o modelo WRF**. 98 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal do Ceará (UECE), Fortaleza - CE, 2016. 146

CARVALHO, G. F. d. **Análise da sensibilidade do modelo WRF a diferentes configurações de regionalização dinâmica para modelagem da velocidade do vento.** 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba - PR, 2015. 146

CAVALCANTI, I. F. **Tempo e clima no Brasil**. [S.l.]: Oficina de textos, 2016. 11, 12, 13

CENTRO DE PREVISãO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMáTICOS - CPTEC/INPE - MINISTéRIO DA CIêNCIA E TECNOLOGIA - BRASIL. **Boletins e análises técnicas**. 2018. Disponível em: <https://tempo.cptec.inpe.br//>. 31, 32, 39, 59, 60, 68, 85, 87, 97

CHIQUETO, J. B. **A distribuição espacial da concentração de ozônio troposférico associada ao uso do solo na região metropolitana de São Paulo**. 301 p. Tese (Doutorado em Ciências) — Universidade de Sao (USP), São Paulo - SP, 2016. 146

CLARK, A. J.; GALLUS JUNIOR, W. A.; CHEN, T.-C. Contributions of mixed physics versus perturbed initial/lateral boundary conditions to ensemble-based precipitation forecast skill. **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 6, p. 2140–2156, 2008. 3

DASARI, H. P.; ATTADA, R.; KNIO, O.; HOTEIT, I. Analysis of a severe weather event over mecca, kingdom of saudi arabia, using observations and high-resolution modelling. **Meteorological Applications**, v. 24, n. 4, p. 612–627, 2017. 2

DRAGAUD, I. C. D. V. **A influência da temperatura da superfície do mar na simulação computacional da circulação atmosférica na região costeira do Estado do Rio de Janeiro**. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro - RJ, 2014. 146

EBERT, E. E. Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: a review and proposed framework. **Meteorological Applications**, v. 15, n. 1, p. 51–64, 2008. 1, 25, 123

FERNANDES, V. R. **Desempenho do modelo atmosférico de mesoescala WRF na estimativa de variáveis meteorológicas e da evapotranspiração de referência.** 72 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió - AL, 2012. 146

FERREIRA, R. C.; HERDIES, D. L.; VENDRASCO, É. P.; BENETI, C. A. A.; BISCARO, T. S. Impact of radar data assimilation in a mesoscale convective system: a case of study. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 447–458, 2017. 3

FORÇA AÉREA BRASILEIRA - FAB. **Código Meteorológico TAF**. 2017. 24p. Instrução do Comando da Aeronáutica - FCA 105-2. Disponível em: <https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4511>. 9

_____. **Códigos Meteorológicos METAR e SPECI**. [S.l.: s.n.], 2017. 26p. FCA 105-3. 25

GILLELAND, E.; AHIJEVYCH, D. A.; BROWN, B. G.; EBERT, E. E. Verifying forecasts spatially. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 10, p. 1365–1376, 2010. 2

GRIMIT, E. P.; MASS, C. F. Initial results of a mesoscale short-range ensemble forecasting system over the pacific northwest. **Weather and Forecasting**, v. 17, n. 2, p. 192–205, 2002. 6

HERDIES, D.; ARAVÉQUIA, J.; FERREIRA, S.; ANDREOLI, R.; SAPUCCI, L.; MATTOS, J. A assimilação de dados no CPTEC/INPE. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 57–64, 2008. 2

HOUTEKAMER, P. The use of multiple parameterizations in ensembles. In: ECMWF WORKSHOP ON REPRESENTING MODEL UNCERTAINTY AND ERROR IN NUMERICAL WEATHER AND CLIMATE PREDICTION MODELS. **Proceedings...**, p. 163–173, 2011. 2

IRIART, P. G. **Uso do modelo WRF CHEM para a simulação da dispersão de gases no centro de lançamento de Alcântara.** 138 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos - SP, 2015. 146

IRIZA, A.; DUMITRACHE, R. C.; LUPASCU, A.; STEFAN, S. Studies regarding the quality of numerical weather forecasts of the WRF model integrated at high-resolutions for the romanian territory. **Atmósfera**, v. 29, n. 1, p. 11–21, 2016. 6

JOHNS, R. H.; DOSWELL, C. A. Severe local storms forecasting. **Weather and Forecasting**, v. 7, n. 4, p. 588–612, 1992. 17

JOYCE, R. J.; JANOWIAK, J. E.; ARKIN, P. A.; XIE, P. Cmorph: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. **Journal of Hydrometeorology**, v. 5, n. 3, p. 487–503, 2004. 13

LIMA, F. J. L. d. **Previsão de irradiação solar no nordeste do Brasil empregando o modelo WRF ajustado por Redes Neurais Artificiais (RNAs)**. 251 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, 2015. 146

MACEDO, L. R.; ALVES, R. de C. M.; BASSO, J. L. M.; YAMASAKI, Y. Análise do desempenho do modelo WRF com alta resolução espacial na previsão de precipitação acumulada. **Revista Ciência e Natura**, v. 36, p. 497–502, 2014. 146

MARSIGLI, C.; MONTANI, A.; PACCANGNELLA, T. A spatial verification method applied to the evaluation of high-resolution ensemble forecasts. **Meteorological Applications**, v. 15, n. 1, p. 125–143, 2008. 2

MARTINS, R. C. G. **Estudo da sensibilidade do modelo WRF às parametrizações de microfísica de nuvens e à assimilação de dados observados**. 121 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande - PB, 2014. 146

MASS, C. F.; OVENS, D.; WESTRICK, K.; COLLE, B. A. Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 3, p. 407–430, 2002. 1, 5

MATOS, A. P.; COHEN, J. C. P. Circulação de brisa e a banda de precipitação na margem leste da Baía de Marajó. **Ciência e Natura**, v. 38, 2016. 1

MELO, C. M. N. d. **Utilização do modelo numérico WRF para fins de geração eolioelétrica: estudo de caso para Maracnaú, Ceará.** 73 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal do Ceará (UFCE), Fortaleza - CE, 2013. 146

MORALES, W. A. **Convergência do fluxo de umidade verticalmente integrada e os prognósticos do modelo WRF.** 102 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas - RS, 2013. 146

MOREIRA, G. L. **Estudo dos efeitos de parâmetros meteorológicos nas estruturas elétricas de uma linha de instabilidade e de um complexo convectivo de mesoescala na Região Sudeste do Brasil**. 135 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas - RS, 2015. 146

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION - NOAA. **NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive**. Boulder CO, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5065/D65D8PWK>. Acesso em: 29 mar. 2018. 19

NIELSEN, E. R.; SCHUMACHER, R. S. Using convection-allowing ensembles to understand the predictability of an extreme rainfall event. **Monthly Weather Review**, v. 144, n. 10, p. 3651–3676, 2016. 1

NOGUEIRA, J. H. A. **Sensibilidade da precipitação simulada na região do Centro de Lançamento de Alcântara a esquemas de convecção explícita: estudo de caso.** 154 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, 2010. 5, 146

OLIVEIRA, A. C. d. **Implementação do modelo Atmosférico WRF acoplado com o modelo hidrológico TOPMODEL para a Bacia de União da Vitória.** 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hìdricos e Ambiental) — Universidade Federal do Paraná (UFPA), Curitiba - PR, 2006. 146

OLIVEIRA, E. M. G. d. **Parametrizações convectivas no modelo WRF e sua relaão com a precipitação durante cicligênises no sudeste da América do Sul.** 95 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria - RS, 2014. 146

OLIVEIRA, R. d. et al. **Tornado de Xanxerê-2015:** análise sinótica e caraceterização das condições atmosféricas usando o modelo WRF. Monografia (Graduação em Ciências Físicas e Matemáticas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. 146

OLIVEIRA, S. S. d.; SOUZA, E. P. d. Análise de modelos de mesoescala para caracterização do potencial eólico do Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 277–291, 2017. 146

PAIMAZUMDER, D.; MÖLDERS, N. Theoretical assessment of uncertainty in regional averages due to network density and design. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, n. 8, p. 1643–1666, 2009. 18

PEREIRA, A. V. **Avaliação e ajustes da parametrização convectiva de Kain-Fritsch sobre a região do Centro de Lançamento de Alcântara.** 117 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, 2009. 146

PICOLO, M. F. **Atmospheric conditions observed during severe weather occurrences in the area of the SOS-CHUVA project**. [S.l.]: São paulo: Universidade de São Paulo, 2018. 123 p. 17

PINTO, L. I. C. **Avaliação do modelo WRF para aplicação em previsões de recursos eólicos no nordeste brasileiro**. 245 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, 2017. 146

PINTO, L. I. C.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; FISCH, G. F.; LYRA, R. F. D. F. Confiabilidade nas estimativas do regime do vento fornecidas pelo BRAMS no Estado de Alagoas: influência do aninhamento e da resolução horizontal de grades. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2014. 5

PRADO, L. F. **Oscilação interdecadal do Pacífico e seus impactos no regime de precipitação no Estado de São Paulo**. 133 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Universidade de São Paulo (USP), São Paulo - SP, 2010. 11

QUEIROZ, A. P. d. **Monitoramento e previsão imediata de tempestades severas usando dados de radar.** 128 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, 2008. 40

RAMOS, D. N. d. S. **Estudo observacional e numérico da camada limite planetária na região de Alcântara-MA durante março de 2010**. 167 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Pelotas - RS, 2018. 146

RAMOS, D. N. da S.; LYRA, R. F. da F.; SILVA JUNIOR, R. S.; SILVA, A. R. Validação da velocidade do vento do modelo WRF com uso da velocidade de fricção u simulada. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE MICROMETEOROLOGIA, 7., 2011. **Anais...**, 2011. 146

RAMOS, D. N. S.; LYRA, R. F. F.; JUNIOR, R. S. S. Previsão do vento utilizando o modelo atmosférico WRF para o Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, 2013. 146

RASERA, G. **Determinação do potencial de ocorrência de Sistemas Convectivos de Mesoescala para a América do Sul**. 79 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria - RS, 2017. 17, 131, 151

ROBERTS, N. M.; LEAN, H. W. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 1, p. 78–97, 2008. 5

ROCHA, A. C.; MARTINS, M. P. P.; BASTOS, A. L. D. Estimativa do impacto das condições meteorológicas sobre a carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo na tma-sp. **Transportes**, v. 25, n. 4, p. 120–135, 2017. 2

RODRíGUEZ, L. G. **Estimativa da probabilidade de ocorrência da precipitação, a partir de métodos estatísticos não paramétricos aplicados a simulações numéricas de um sistema de previsão por conjunto.** 95 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria - RS, 2016. 146

ROEBBER, P. J.; SCHULTZ, D. M.; COLLE, B. A.; STENSRUD, D. J. Toward improved prediction: high-resolution and ensemble modeling systems in operations. **Weather and Forecasting**, v. 19, n. 5, p. 936–949, 2004. 1, 7

SANTOS, A. G. **Acoplamento do modelo atmosférico WRF ao modelo hidrológico SCS/HMS para a previsão de cheias na Bacia do Paraíba do Meio em Alagoas**. 132 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza - CE, 2016. 146

SCHWARTZ, C. S.; KAIN, J. S.; WEISS, S. J.; XUE, M.; BRIGHT, D. R.; KONG, F.; THOMAS, K. W.; LEVIT, J. J.; CONIGLIO, M. C. Next-day convection-allowing WRF model guidance: a second look at 2-km versus 4-km grid spacing. **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 10, p. 3351–3372, 2009. 7

SCHWARTZ, C. S.; SOBASH, R. A. Generating probabilistic forecasts from convection-allowing ensembles using neighborhood approaches: a review and recommendations. **Monthly Weather Review**, v. 145, n. 9, p. 3397–3418, 2017. 2

SILVA, A. F. G. **Avaliação do modelo WRF ao perfil do vento no Centro de Lançamento de Alcântara**. 98 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, 2013. 20, 146

SILVA, M. S. **A influência da temperatura da superfície do mar na simulação computacional da circulação atmosférica na região costeira do Estado do Rio de Janeiro**. 153 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro - RJ, 2012. 146

SILVEIRA, C. da S.; COUTINHO, M. M.; COSTA, A. A.; MARIA, P. H. S. de. Previsão de tempo por conjuntos para a região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, 2013. 7

SILVEIRA, W. W. d. **Avaliação das condições meteorológicas simuladas pelo modelo WRF em dias consecutivos de altas concentrações de PM10 e ozônio para a região metropolitana do Rio de Janeiro.** 2016. Monografia (Graduação em Ciências Atmosféricas) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 146

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; WANG, W.; POWERS, J. G. **A description of the advanced research WRF version 3**. 2008. 96p. Relatório técnico. Disponível em: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2018. 15

SOARES, F. d. R. **Metodologia de previsão de descargas atmosférica utilizando dados de RADAR, rede de sensores eletromagnéticos e modelagem atmosférica**. 166 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, 2014. 146

SOUZA, N. V. d. **O modelo WRF no Projeto Chuva: avaliação das parametrizações de CLP durante o experimento de Fortaleza-CE.** 88 p. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade Federal do Ceará (UECE), Fortaleza - CE, 2014. 146

SUTIL, U. A. **O estudo da interação oceano-atmosfera em um ciclone extratropical no Atlântico Sudoeste: uma abordagem numérica em altíssima resolução.** 94 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS), Porto Alegre - RS, 2016. 146

TAO, W.-K.; WU, D.; LANG, S.; CHERN, J.-D.; PETERS-LIDARD, C.; FRIDLIND, A.; MATSUI, T. High-resolution NU-WRF simulations of a deep convective-precipitation system during mc3e: further improvements and comparisons between goddard microphysics schemes and observations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 121, n. 3, p. 1278–1305, 2016. 1, 3

THEIS, S.; HENSE, A.; DAMRATH, U. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: a pragmatic approach. **Meteorological Applications**, Cambridge University Press, v. 12, n. 3, p. 257–268, 2005. 7

TUCHTENHAGEN, P. N. **WRF e o potencial eólico no Brasil em 2011.** 120 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas - RS, 2013. 146

VELASQUEZ, J. F. M. **Avaliação das parametrizações físicas do modelo WRF para a camada limite atmosférica para a região metropolitana da grande Vitória**. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória - ES, 2017. 146

WANG, W.; BRUYèRE, C.; DUDA, M.; DUDHIA, J.; GILL, D.; KAVULICH, M.; KEENE, K.; CHEN, M.; LIN, H.-C.; MICHALAKES, J.; RIZVI, S.; ZHANG, X.; BERNER, J.; HA, S.; FOSSELL, K. **WRF ARW-version 3 modelling system user's guide January 2017**. Boulder, Colorado, USA, 2017. 434p. Disponível em: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.8/ARWUsersGuideV3.8.pdf>. 15, 21, 120, 145

YAN, H.; GALLUS JUNIOR, W. A. An evaluation of qpf from the WRF, NAM and GFS models using multiple verification methods oveer a small domain. **Weather and Forecasting**, v. 31, n. 4, p. 1363–1379, 2016. 120

ZHENG, Y.; ALAPATY, K.; HERWEHE, J. A.; GENIO, A. D. D.; NIYOGI, D. Improving high-resolution weather forecasts using the weather research and forecasting (WRF) model with an updated Kain–Fritsch scheme. **Monthly Weather Review**, v. 144, n. 3, p. 833–860, 2016. 2, 6

APÊNDICE A - ESTUDOS ACADÊMICOS COM O MODELO WRF

O modelo de previsão numérica do tempo regional WRF possui diferentes opções de físicas que podem ser escolhidas pelos pesquisadores e centros operacionais. De acordo com características das regiões de estudo os autores empregaram diferentes escolhas de parametrizações e espaçamentos horizontais. Neste apêndice os estudos estão divididos por regiões e a tabela contém um resumo com diversos trabalhos científicos, entre eles: artigos científicos, dissertações e teses de cursos de pós-graduação.

Importante salientar que nem todos os trabalhos acadêmicos realizaram testes de sensibilidade para definir as resoluções mais adequadas para cada estudo. O estudo contribuirá para definições de escolhas de simulações com o modelo WRF.

A.1 Resumo de estudos Acadêmicos com o modelo WRF.

a) **Regiões:** SE = Sudeste, S = Sul, NE = Nordeste, CO = Centro Oeste e Brasil.;

b) **MP*p*:** Parametrização de microfísica - *mp_physics*;

c) **RL*p*:** Parametrização de Radiação de Onda Longa - *ra_lw_physics*;

d) **RS*p*:** Parametrização de Radiação de Onda Curta - *ra_sw_physics*;

e) **SC*p*:** Parametrização de Camada Superficial - *sf_sfclay_physics*;

f) **SF*p*:** Parametrização de Superfície - *sf_surface_physics*;

g) **PB*p*:** Parametrização de Camada Limite Planetária - *bl_pbl_physics*;

h) **CU*p*:** Parametrização de *Cumulus* - *cu_physics*; e

∗ Anotações marcadas com (x) na figura indicam parametrizações não especificadas pelo autor em seu trabalho.

Definições Técnicas: Disponibilizadas para consulta em Wang et al. (2017).

Tabela A.1 - Análise das parametrizações e espaçamento de grade utilizados em estudos científicos com o modelo WRF em diversas regiões do país.

AUTOR	Região	MPp	RLp	RSp	SCp	SFp	PBp	CUp	Grade (km)
Oliveira (2006)	SE	3	1	1	x	2	x	1	30 e 10
Soares (2014)	SE	3	1	1	x	2	x	1	30 e 10
Moreira (2015)	SE	8	1	1	1	2	1	93	36, 12 e 4
Aylas (2017)	SE	3	1	1	1	2	8	2	5 e 1
Dragaud (2014)	SE	3	1	1	1	2	12	2	27, 9 e 3
Velasquez (2017)	SE	8	1	1	1	2	1	2	5 e 1
Silva (2012)	SE	3	1	1	1	x	1	2	20 e 5
Abreu (2016)	SE	2	1	1	1	2	1	1	27, 9 e 3
Nogueira (2010)	SE	3	1	1	1	x	1	1	5
Silveira (2016)	SE	2	1	1	x	1	1	1	16 e 4
Chiqueto (2016)	SE	2	1	2	x	2	1	93	1
Oliveira (2014)	S	2	1	1	1	2	1	1	25
Carvalho (2015)	S	6	1	1	7	7	7	1	22.5, 4.5 e 1.5
Oliveira et al. (2016)	S	3	1	1	1	2	1	1	30, 10 e 3
Basso et al. (2014)	S	8	1	1	x	x	2	1	36 e 18
Macedo et al. (2014)	S	8	1	1	x	x	2	1	18, 6, 2, 1
Sutil (2016)	S	4	1	1	1	1	x	93	9
Almeida e Marton (2014)	S	3	1	1	1	2	1	1	90, 30 e 10
Silva (2013)	NE	3	4	4	1	2	1	1	9, 3 e 1
Brito et al. (2011)	NE	3	1	1	x	x	1	93	63, 21 e 7
Alves (2016)	NE	3	1	1	1	2	1	1	1.8 e 1.8
Melo (2013)	NE	6	1	1	7	7	7	1	90, 18 e 3.6
Santos (2016)	NE	6	1	1	7	7	7	1	25, 5 e 1
Ramos et al. (2013)	NE	2	1	1	1	2	7	93	20 e 5
Ramos (2018)	NE	3	1	1	x	2	7	1	12 e 4
Ramos et al. (2011)	NE	2	x	x	x	2	7	93	20 e 5
Lima (2015)	NE	2	1	1	1	2	2	93	15 e 5
Brito (2016)	NE	x	1	1	1	2	1	x	x
Pinto (2017)	NE	3	1	1	1	2	1	1	30 e 10
Amorim (2015)	NE	2	4	4	1	2	7	93	x
Souza (2014)	NE	6	1	1	7	2	7	1	16.2, 5.4 e 1.8
Iriart (2015)	NE	3	1	1	5	2	5	93	9, 3 e 1
Martins (2014)	NE	3	1	1	3	x	1	6	x
Oliveira e souza (2017)	NE	2	1	1	x	x	1	93	16 e 4
Pereira (2009)	NE	3	1	1	1	x	1	1	30, 10 e 3
Fernandes (2012)	CO	2	1	1	1	2	7	93	80, 20 e 5
Tuchtenhagen (2013)	Brasil	3	1	1	1	1	1	1	18
Morales (2013)	Brasil	2	1	1	7	7	7	2	18
Rodríguez (2016)	Brasil	2	1	1	x	x	1	x	24 e 12

Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE B - TEMPO DE PROCESSAMENTO DAS SIMULAÇÕES

O modelo de previsão numérica do tempo regional WRF realizou as três simulações numéricas dos eventos e para cada simulação foram realizadas configurações diferentes para as parametrizações físicas. Neste apêndice os tempos para processamento do modelo WRF em diferentes configurações de centros operacionais e pesquisas predefinidos são apresentados na Tabela B.1.

B.1 Tempo de CPU utilizado nas simulações dos membros do modelo WRF.

Tabela B.1 - Tempo de CPU das simulações do modelo WRF.

Estudo de caso 1 - 10/11 março de 2016	
Simulação	Tempo
A1	4 horas e 20 minutos
A2	11 horas e 37 minutos
A3	11 horas e 56 minutos
A4	3 horas e 56 minutos
A5	3 horas e 12 minutos
A6	4 horas e 14 minutos
A7	3 horas e 8 minutos
A8	3 horas e 51 minutos
A9	3 horas e 54 minutos
Estudo de caso 2 - 06/07 fevereiro de 2017	
Simulação	Tempo
A1	4 horas e 09 minutos
A2	11 horas e 39 minutos
A3	11 horas e 54 minutos
A4	3 horas e 46 minutos
A5	3 horas e 05 minutos
A6	4 horas e 10 minutos
A7	3 horas e 16 minutos
A8	3 horas e 56 minutos
A9	3 horas e 51 minutos
Estudo de caso 3 - 17/18 dezembro de 2017	
Simulação	Tempo
A1	4 horas e 09 minutos
A2	11 horas e 45 minutos
A3	12 horas e 06 minutos
A4	3 horas e 48 minutos
A5	3 horas e 04 minutos
A6	4 horas e 03 minutos
A7	3 horas e 05 minutos
A8	4 horas e 22 minutos
A9	4 horas e 43 minutos

Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE C - VARIÁVEIS

A Tabela C.1 contém o conjunto de variáveis utilizadas neste trabalho (precipitação e vento). As variáveis que contém os dados observados são disponibilizados pela INFRAERO e as variáveis do modelo WRF necessitam ser habilitadas antes das simulações do modelo, pois são variáveis auxiliares. Complementando as análises dos estudo de caso utilizamos as variáveis do modelo GFS.

C.1 Resumo das variáveis que foram utilizadas nos estudos de caso: observado, GFS e WRF.

Tabela C.1 - Variáveis utilizadas nos estudos de casos: dados observado, GFS e WRF.

Variáveis - Precipitação	
Observado	INSTRAIN – SBGR
GFS	APCPsfc – surface Total Precipitation
WRF	rainc+rainsh+rainnc
CMORPH	cmorph
MERGE	irprecipitation
Variáveis - Vento	
Observado - MAX	WSINS (kt) – SBGR
Observado-MED	WS2M (kt) - SBGR
GFS-MAX	GUSTsfc
GFS-MED	VGRD10m – UGRD10m
WRF-MAX	Spduv10max – auxhist3variable
WRF-MED	Spduv10mea – auxhist3variable

Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE D - POTENCIAL DE OCORRÊNCIA DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA PARA A AMÉRICA DO SUL - ÍNDICE SA-MCS

O estudo realizado por Rasera (2017) consistiu em aprimorar a previsão de sistemas convectivos de mesoescala na região subtropical da América do Sul. O desenvolvimento do índice específico (SA-MCS) buscou determinar ambientes favoráveis à formação de SCM. Na elaboração do índice, foram testados vários parâmetros meteorológicos e através de uma análise estatística os melhores resultados foram incorporados ao índice SA-MCS. As variáveis meteorológicas que obtiveram os melhores resultados estão abaixo:

- Cisalhamento vertical do vento de entre os níveis 0 e 6 km:

$$\frac{\left[\vec{V}_{6km} - \vec{V}_{0km}\right] - 20,01}{7,87} \tag{D.1}$$

- Advecção de temperatura em 775 hPa:

$$\frac{\left[-\vec{V}.\nabla T_{775hPa}\right] - 4,84 \times 10^{-5}}{5,65 \times 10^{-5}} \tag{D.2}$$

- Levantamento em 4 camadas: e

$$\frac{-LI_{inst} + 2,17}{2,23} \tag{D.3}$$

- Velocidade vertical ômega em 800 hPa:

$$\frac{-\omega_{800hPa} + 0,27}{0,29} \tag{D.4}$$

SA-MCS = D.1 + D.2 + D.3 + D.4

De acordo com Rasera (2017), a análise do índice não deve ser usado separadamente, e sim como uma ferramenta para auxiliar os meteorologistas na previsão do tempo.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.