



**Análise de Parâmetros Microfísicos na Modelagem Numérica de
uma Tempestade Severa no Estado do Rio Grande do Sul**
Analysis of Microphysical Parameters in Numerical Modeling
of Severe Storm in the State of Rio Grande do Sul

Vitor Vaz Hassan; José Ricardo de Almeida França & Wallace Figueiredo Menezes

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia, Av. Athos da Silveira Ramos 274, Bloco G, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21910-200, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mails: vitorhassan@outlook.com; jricardo@igeo.ufrj.br; wallace.menezes@gmail.com
Recebido em: 23/08/2020 Aprovado em: 24/11/2020
DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_384_394

Resumo

De acordo com a literatura especializada, a formação e passagens de sistemas frontais pela região sul do Brasil ocorrem com frequência durante o inverno, quando massas de ar mais frio proveniente do polo Sul alcançam latitudes mais baixas e interagem com massas de ar mais quentes, favorecendo a formação de linhas de tempestades. Durante a madrugada e manhã do dia 08/06/2017, a passagem de uma frente fria causou sérios danos na rede elétrica em diversas cidades do Estado do Rio Grande do Sul. Ao todo, 19 municípios, localizados principalmente na região centro-norte do Estado, foram atingidos pelo tempo severo, resultando em mais de 4.500 pessoas sem energia elétrica. Nesse contexto, o objetivo principal deste trabalho é verificar o aperfeiçoamento no desempenho do modelo regional de mesoescala *Brazilian Development on the Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS) ao introduzir duas diferentes distribuições de aerossóis na parametrização microfísica do modelo, especificamente para este caso de tempo severo. Os resultados mostram que neste caso o modelo se mostrou pouco sensível às alterações da distribuição de aerossóis, mas ainda assim, obteve resultados satisfatórios, especialmente na previsão de chuva local.

Palavras-chave: *BRAMS; Modelagem; Aerossol*

Abstract

According to the specialized literature, the formation and passage of frontal systems in the southern region of Brazil occurs frequently during the winter, when cooler air masses from the South Pole reach lower latitudes and interact with warmer air masses, favoring the formation of storm lines. During the dawn and morning of 06/08/2017, the passage of a cold front caused serious damage to the electricity grid in several cities in the State of Rio Grande do Sul. In all, 19 municipalities, located mainly in the north-central region of the state, were hit by severe weather, resulting in more than 4,500 people without electricity. In this context, the main objective of this work is to verify the improvement in the performance of the *Brazilian Development on the Regional Atmospheric Modeling System* mesoscale regional model by introducing two different aerosol distributions in the model's microphysical parameterization, specifically for this case of severe weather. The results show that in this case the model proved to be little sensitive to changes in the distribution of aerosols, but still, it obtained satisfactory results, especially in the forecast of local rain.

Keywords: *BRAMS; Modeling; Aerosol*

1 Introdução

O setor subtropical do continente sul americano, que inclui a região sul do Brasil, nordeste da Argentina, sul do Paraguai e Uruguai é a região com maior desenvolvimento e atuação de tempestades severas na América do Sul (Brooks *et al.*, 2003; Nascimento, 2005; Zipser *et al.*, 2006). Dessa forma, o Estado do Rio Grande do Sul é uma região muito favorável à formação de células convectivas profundas, na qual, além de sofrer a influência dos sistemas baroclínicos migratórios, possui alto teor de umidade praticamente durante todo o ano (Marcelino *et al.*, 2009).

Devido a essas características climáticas, as empresas do setor de energia, situadas na região Sul do Brasil vêm sofrendo ao longo dos anos um importante impacto em função das tempestades com ventos fortes em seu dia a dia operacional (Calvetti *et al.*, 2019). Constantes desligamentos forçados de torres de distribuição e dificuldade de planejamento operacional para a retomada de energia em casos de tempo severo são os principais motivos para o grande interesse em uma previsão com maior acurácia dos eventos de chuva e vento.

Por outro lado, um dos ingredientes necessários para a formação de nuvens são partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, caracterizadas como aerossóis. À medida que o ambiente atmosférico está sob a influência de forçantes convectivas, o ar úmido é esfriado em levantamento adiabático e a umidade relativa se aproxima dos 100%. A presença de aerossóis higroscópicos funciona como agentes de criação de núcleos de condensação. Se o levantamento de ar úmido continuar, a supersaturação será atingida através do resfriamento e as gotículas de chuva e até mesmo pedras de gelo serão formadas (Rogers, 1979). Porém, ainda existe certa divergência em relação ao efeito dos aerossóis na precipitação local sobre áreas com acentuado adensamento urbano. Alguns estudos relatam que o perímetro urbano reduz as chuvas devido as condições microfísica das nuvens características dessas regiões (Kaufmann *et al.*, 2007; Kusaka *et al.*, 2014), enquanto outras pesquisas mostram que regiões urbanizadas aumentam significativamente a intensidade

das tempestades (Shepherd *et al.*, 2002; Van der Heever & Cotton, 2007).

Durante a noite do dia 07/06/2017 até a manhã do dia 08/06/2017, a passagem de uma frente fria causou sérios danos na rede elétrica em diversas cidades do Estado do Rio Grande do Sul. Ao todo, 19 municípios, localizados principalmente na região centro-norte do Estado, foram atingidos pelo tempo severo, resultando em mais de 4.500 pessoas sem energia elétrica. Nessas circunstâncias, este trabalho possui como objetivo verificar a sensibilidade do modelo *Brazilian Development on the Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS), ao introduzir diferentes distribuições de aerossóis na parametrização microfísica do modelo para o caso em estudo.

2 Materiais e Métodos

Para iniciar este trabalho, foi escolhido um caso de tempestade severa, particularmente significativo, responsável por expressivos danos à rede elétrica na área de concessão da empresa Companhia Piratininga de Força e Luz (CPFL), no Estado de Rio Grande do Sul. Este caso foi responsável por causar grandes interrupções no fornecimento de energia elétrica e conseqüentemente atingiu um maior número de clientes, chamados neste trabalho de Clientes Hora Interrompidos (CHIs). Como o maior número de CHIs ocorreu entre as 06 UTC e 12 UTC do dia 08/06/2017, toda a análise dinâmica e termodinâmica das condições atmosféricas será direcionada para esse período.

2.1 Região de Estudo

Foram selecionadas quatro cidades, a fim de analisar pontualmente o perfil termodinâmico vertical da tempestade, bem como validar as previsões de vento e de chuva para essas regiões. A Figura 1 ilustra a localização geográfica das quatro cidades junto da posição das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), utilizadas para validação das previsões. A Tabela 1 indica a latitude, a longitude e a altitude (em metros) de cada estação meteorológica.

N	Cidades (RS)	Posição Verdadeira			Posição no Modelo		
		Lat (°S)	Lon (°W)	Alt (m)	Lat (°S)	Lon (°W)	Alt (m)
1	Bento Gonçalves	29,164	51,534	623	29,16	51,56	604
2	Cruz Alta	28,803	53,673	427	28,80	53,64	445
3	Erechim	27,657	52,305	777	27,63	52,29	704
4	Vacaria	28,513	50,882	970	28,53	50,83	1023

Tabela 1 Cidades do Rio Grande do Sul selecionadas para análise pontual dos eventos. A latitude, longitude e altitude são referentes às estações meteorológicas do INMET instaladas em cada um dos municípios, e aos pontos de grade do modelo BRAMS utilizados para fazer análises pontuais comparativas.

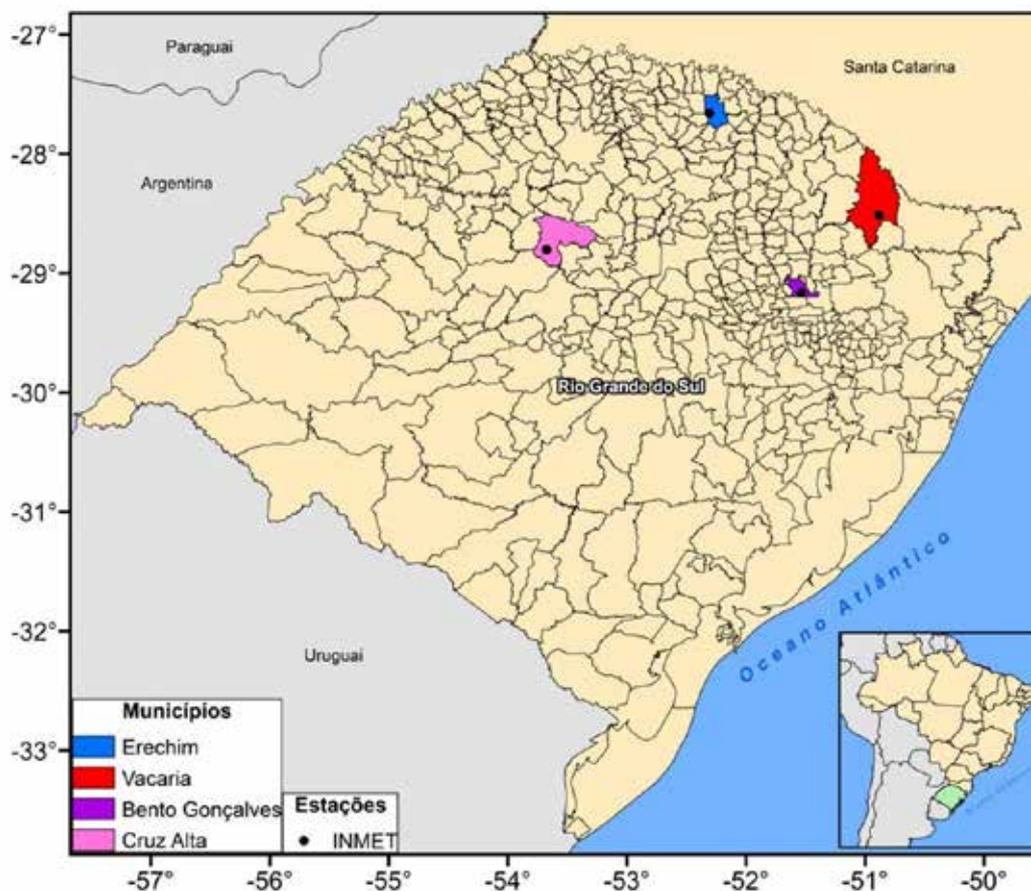


Figura 1 Localização geográfica das cidades do Rio Grande do Sul e das estações meteorológicas do INMET utilizadas para a análise do evento.

2.2 Dados Observados

Inicialmente, foi analisado o comportamento do sistema meteorológico através de imagens do radar meteorológico do Morro da Igreja – SC, disponíveis no acervo de imagens da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica - REDEMETS < <https://www.redemet.aer.mil.br/> >, às 09UTC do dia 08/06/2017. Posteriormente, foi utilizada a reanálise atmosférica global Era-Interim (Dee *et al.*, 2011) para verificar o perfil vertical de umidade relativa (%) de 1000–200 hPa. Além disso, para cada cidade, foram obtidos os dados observados de precipitação e vento, fornecidos pelo INMET, através do sítio eletrônico oficial < <http://www.inmet.gov.br> > (INMET, 2018). Os dados foram obtidos para um período de 25 horas (14 UTC do dia 07/06/2017 até 14 UTC do dia 08/06/2017), em busca de uma fonte de validação para os produtos de precipitação e intensidade do vento gerados pelo modelo. Para complementar a análise, foram extraídos os produtos

de chuva (g/kg), gelo (g/kg), taxa de chuva (mm/h) e intensidade do vento (km/s) do modelo BRAMS.

2.3 Modelagem Numérica

Em relação à modelagem numérica, foi utilizado o modelo BRAMS (versão 5.2) (Freitas *et al.*, 2017) com uma grade, de acordo com a Tabela 2. A grade escolhida apresenta resolução espacial de 10 x10 km, e compreende um domínio que se estende da latitude 25,5°S até 34,5°S e da longitude 46,5°W até 60,5 °W. Na vertical foi utilizada a grade telescópica com espaçamento inicial de 70 m, crescendo em um fator de 1.2 até atingir o espaçamento máximo de 1.000 m. O modelo foi inicializado com as análises do *Global Forecast System* (GFS) do dia 07/06/2017 às 00UTC e condições de contorno também a partir das análises do GFS, alimentando as fronteiras do modelo a cada 6 horas. Foram simuladas, entre muitas variáveis, dados pontuais de chuva e vento para as mesmas alturas

Grade	$\Delta x = \Delta y$ (km)	Δt (s)	Número de níveis na vertical	Latitude do centro da grade	Longitude do centro da grade	Domínio da Grade
Única	10	15	32	30°S	53,5°W	25,5°S - 34,5°S 46,5°W-60,5°W

Tabela 2 Especificação da grade utilizada no modelo BRAMS.

das estações meteorológicas (Tabela 1), entre os dias 07 e 08/06/2017.

Para o desenvolvimento deste estudo, todas as simulações realizadas com o BRAMS utilizaram configurações empregadas com sucesso em outros trabalhos, como Alonso & Saraiva (2007) e Pereira (2015). Sendo assim, as opções de parametrizações são as seguintes: o esquema de Chen & Cotton (1983) para os processos radiativos e o esquema de Grell & Devenyi (2002) para a convecção profunda. Para o esquema de turbulência na Camada Limite Planetária (CLP) foi utilizado a parametrização de Mellor & Yamada (1982) e para a microfísica de nuvens foi usado o esquema descrito por Flatau *et al.* (1989).

Por fim, foi realizado um estudo de caso específico para dois experimentos no modelo BRAMS utilizando a grade descrita na Tabela 2, onde a única diferença entre esses testes foi a opção de microfísica utilizada em cada um deles, como mostrado na Tabela 3. No experimento 1 foi utilizado uma distribuição de núcleos de condensação (CCN – “*Cloud Condensation Nuclei*”) a fim de priorizar os núcleos de condensação de menor tamanho e com maior concentração, mais compatível com núcleos de condensação típicos do ar sobre o continente. Por outro lado, no experimento 2 foi utilizada uma distribuição de CCN a fim de priorizar os núcleos de condensação de maior tamanho, mais compatível com os núcleos de condensação típicos do ar sobre os oceanos. É importante ressaltar que a distribuição de CCNs encontrada na parametrização “controle” prioriza uma distribuição de aerossóis de tamanho menor com características continentais, aqui neste trabalho denominado como experimento 1. Um dos motivos para a tomada de decisão para a rodada do experimento 2 foi baseada nos resultados de Aires (2016), que encontrou uma melhora significativa na previsão da taxa e do acumulado de precipitação gerados pelo BRAMS para um caso de tempestade sobre o Estado do Rio de Janeiro.

Experimentos	Descrição
1	Controle (BRAMS) – Utilização de distribuição de CCN's Continentais
2	Utilização de distribuição de CCN's Marinhos

Tabela 3 Resumo dos experimentos realizados no modelo BRAMS a partir da parametrização de microfísica das nuvens.

2.4 Utilização de Índices Estatísticos para Validação das Simulações

Neste trabalho, a mudança no tipo de parametrização de microfísica do modelo leva a diferentes cenários de previsão, os quais foram comparados e validados através dos dados observados nas estações meteorológicas localizadas nas quatro cidades ilustradas na Figura 1. Para tal, foram utilizados índices estatísticos para validação das simulações numéricas de vento e chuva utilizando o modelo BRAMS. São eles, Erro Médio (EM; Equação 1) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM; Equação 2):

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (P_i - O_i) \quad (1)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (P_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$DP = \sqrt{\frac{\sum |O_i - \mu|^2}{n}} \quad (3)$$

Nas Equações 1, 2 e 3, os índices P_i e O_i representam, respectivamente, os valores previstos e observados do acumulado de chuva horário e da velocidade do vento horária. O EM é também conhecido como *bias* ou viés e representa a ocorrência de superestimativa (valores positivos de EM) ou subestimativa (valores negativos de EM) por parte do modelo, do acumulado de chuva e velocidade do vento, observados nas estações meteorológicas *in situ*. Já o cálculo da REQM tem como objetivo avaliar a dispersão dos desvios apresentados pelas previsões em relação aos valores observados. Em seguida, foi analisado o desvio padrão da série observada através da Equação 3, onde μ representa a média do conjunto de dados.

3 Resultados

Durante a madrugada e manhã do dia 08/06/2017 o avanço de uma frente fria sobre o Rio Grande do Sul organizou uma linha de tempestades entre o nordeste e o leste do Estado, responsável por chuvas fortes e rajadas de vento moderadas a fortes em diversos municípios. Para ilustrar o fenômeno foi utilizado o radar meteorológico localizado no município do Morro da Igreja no estado de Santa Catarina (Figura 2). Pela imagem do radar, notam-se áreas de alta refletividade se estendendo desde nordeste do Rio Grande do Sul, passando pela cidade de Porto Alegre e

avançando até o litoral norte do estado. A Figura 2 indica a formação da referida linha de tempestades sobre a região com várias áreas de refletividade em torno de 50 dBZ (> 25 mm/h) às 09 UTC.

3.1 Distribuição de Aerossóis e sua Relação com os Produtos do BRAMS

É importante ressaltar que a área de estudo, por mais que faça parte de uma região continental, pode sofrer grande influência de aerossóis marinhos transportados pelo escoamento de ar proveniente do oceano Atlântico. No entanto, ao analisar o processo de formação de gotículas de nuvem, a relação entre os núcleos de condensação (tamanho e formato) pode influenciar diretamente a concentração/distribuição das nuvens e posteriormente a concentração de gotas e de gelo nas nuvens (Rogers, 1975). O que por sua vez, pode impactar na intensidade das correntes de

ventos descendentes devido ao processo de resfriamento evaporativo, como discutido com maiores detalhes em Weisman & Klemp (1986). Sendo assim, a utilização da distribuição de aerossóis com características típicas continentais pode gerar resultados diferentes dos produtos do modelo utilizando como parametrização uma distribuição típica de aerossóis oceânicos.

A Figura 3 mostra o comportamento da distribuição espacial da intensidade de chuva para o experimento 2 utilizando aerossóis oceânicos (Figura 3A) e para o experimento 1, utilizando aerossóis continentais (Figura 3B), respectivamente. Além disso, na Figura 3C também é apresentada a subtração das precipitações entre os campos da Figura 3A (experimento 2) e da Figura 3B (experimento 1), de forma que é apresentado no campo, apenas a parte positiva da subtração. Desta forma, o que é visualizado na Figura 3C, são as regiões onde o experimento 2 simulou uma quantidade maior de chuva do que o experimento 1.

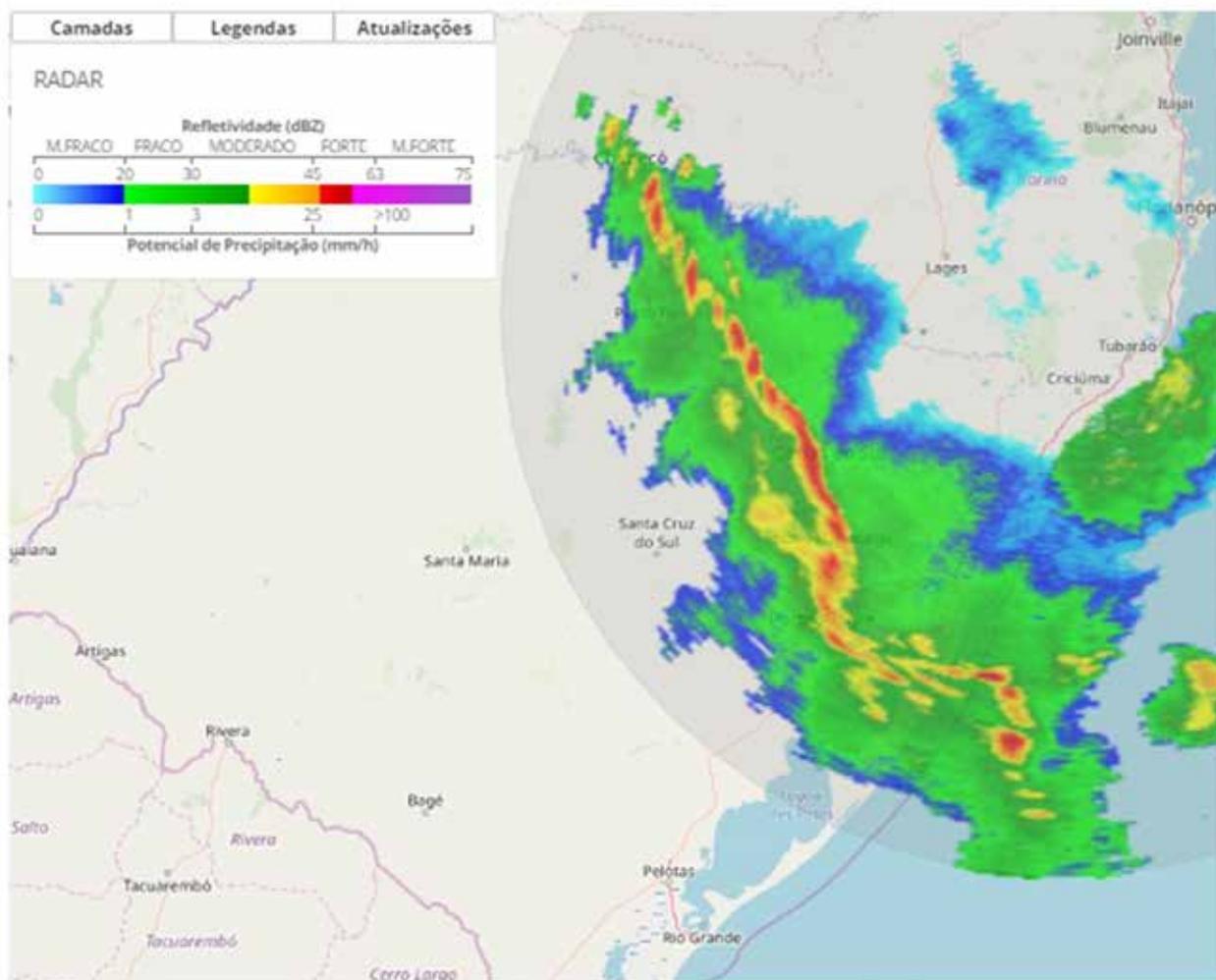


Figura 2 Atuação da Linha de Instabilidade às 09 UTC do dia 08/06/2017, mostrada na imagem do radar meteorológico localizado em Morro da Igreja (SC). A cor vermelha representa um limiar de chuva forte em torno de 50 dBZ de refletividade. Fonte: Redemet.

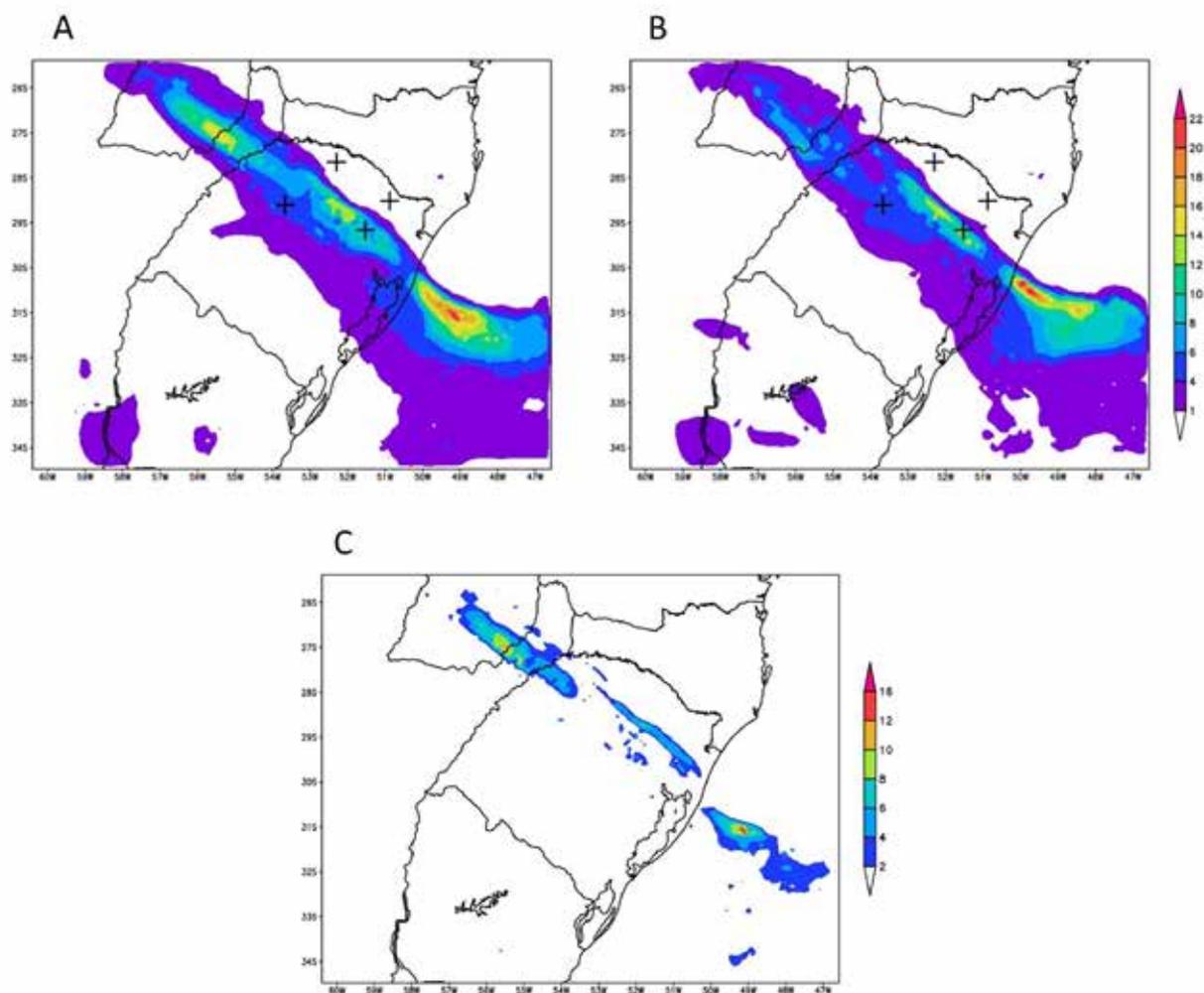


Figura 3 Produtos de precipitação (mm/h) do modelo BRAMS: A. Utilizando distribuição de aerossóis do tipo oceânico (experimento 2), B. Utilizando distribuição de aerossóis do tipo continental (experimento 1) e C. Campo obtido a partir da subtração entre as precipitações dos experimentos (experimento 2 – experimento 1), todos para o horário das 09 UTC do dia 08/06/2017. As cruzes representam as localizações das estações meteorológicas, vide Tabela 1.

Pela análise da Figura 3, nota-se que, independentemente da distribuição dos aerossóis, o modelo representou de forma coerente a distribuição espacial da chuva quando comparada com a imagem do radar (Figura 2). Em relação à intensidade da chuva, a distribuição do tipo oceânico (experimento 2) fornece uma chuva mais bem distribuída ao longo de praticamente todo o sistema simulado, mantendo valores acima de 6 mm/h desde o oceano, se estendendo por toda a linha, até sua porção mais continental (Figura 3A). Nota-se também nesse experimento diversos pontos de chuva simulada mais intensa de caráter mais localizado, com um núcleo de chuva intensa sobre o Oceano (vermelho), e alguns de chuvas não tão intensas sobre o continente (amarelos). Já no experimento 1, utilizando aerossóis continentais (Figura 3B), apesar de também terem sido

simulados núcleos de chuva intensa sobre o Oceano, na porção continental a linha simulada não teve um caráter tão contínuo, com diversas “quebras” observadas em sua estrutura horizontal (locais com precipitação muito fraca). Ao observar a área de precipitação da Figura 3 nota-se que as regiões com intensidade acima de 6 mm/h são maiores no experimento 2, principalmente nas áreas continentais. Isso leva a crer que o volume total de chuva produzida pelo sistema simulado pelo experimento 2 foi maior que no experimento 1. A Figura 3C pode confirmar essa análise, mostrando que em diversos pontos da região de precipitação em forma de linha, o experimento 2 produziu uma quantidade de chuva maior do que o experimento 1.

Para analisar e compreender as rajadas de vento em superfície provenientes da tempestade foi verificado o

perfil vertical de umidade as 06 UTC obtido da reanálise Era-Interim (Figura 4). Diante dessa análise, nota-se uma camada de ar seco relativamente profunda em níveis médios da atmosfera (entre 400 e 750 hPa), interagindo com as gotículas de água e gelo suspensas (ou seja, uma massa de água nos mesmos níveis). A simulação do BRAMS para o perfil vertical de chuva e gelo às 06 UTC para os experimentos 1 (Figura 5A) e 2 (Figura 5B) garante o processo teórico de resfriamento evaporativo. Tal configuração é bastante favorável a gerar mecanismos para a formação de fortes correntes descendentes de ar, uma vez que as gotas de chuva interagem com a camada de ar com umidade relativa muito baixa, e essa subsaturação promove um processo de evaporação significativo dessa água líquida presente em forma de gotas. O resfriamento latente do ar, proveniente dessa evaporação, está diretamente relacionado com a formação da frente de rajada e possível iniciação do mecanismo de retroalimentação que contribuiu para a manutenção da tempestade em formato de linha de instabilidade (tempestade multicelular).

Em seguida, para uma análise discreta (pontual), foi utilizada a estação meteorológica do INMET localizada na cidade de Vacaria – RS, vide Tabela 1 e Figura 1, pois foi a cidade que garantiu a melhor tendência de distribuição horária dos dados observados quando comparado com as simulações numéricas para ambos experimentos. Os dados observados de chuva (mm/h) e vento (m/s) obtidos na estação meteorológica para o período de ocorrência do

evento foram plotados junto aos resultados do BRAMS para o ponto de grade mais próximo às coordenadas de Vacaria (cujas coordenadas também se encontram na Tabela 1), utilizando como parametrização do modelo as distribuições de aerossóis continentais (experimento 1) e de aerossóis oceânicos (experimento 2). Dessa forma, ao analisar a Figura 6 para a precipitação, observa-se que o modelo tende a apresentar uma defasagem de atraso em dois momentos: o primeiro para os picos de chuva inicial (noite do dia 07/06/2017), com atraso de aproximadamente duas horas; e o segundo para o pico de chuva na manhã do dia 08/06 às 11 UTC. Por outro lado, o modelo consegue prever o pico de chuva mais intenso (00 UTC do dia 08/06/2017) para ambos os experimentos, e ainda responde com boa precisão a tendência de aumento e diminuição da chuva ao longo da série. Por exemplo, o modelo indicou o início da chuva na noite do dia 07/06/2017, posteriormente, o final da chuva no início da madrugada do dia 08/06/2017 e finalmente a chuva na manhã do dia 08/06/2017. Discussões sobre a validação da intensidade da chuva serão discutidas com mais detalhes para todas as cidades a partir dos índices estatísticos na próxima seção.

De acordo com a Figura 7 para o vento, nota-se que o modelo conseguiu representar a tendência de aumento e diminuição da intensidade do vento durante a noite do dia 07/06/2017 e madrugada do 08/06/2017. As simulações horárias não foram tão adequadas, pois houve desvios de até 30 km/h. Esse tipo de viés é passível de ocorrer

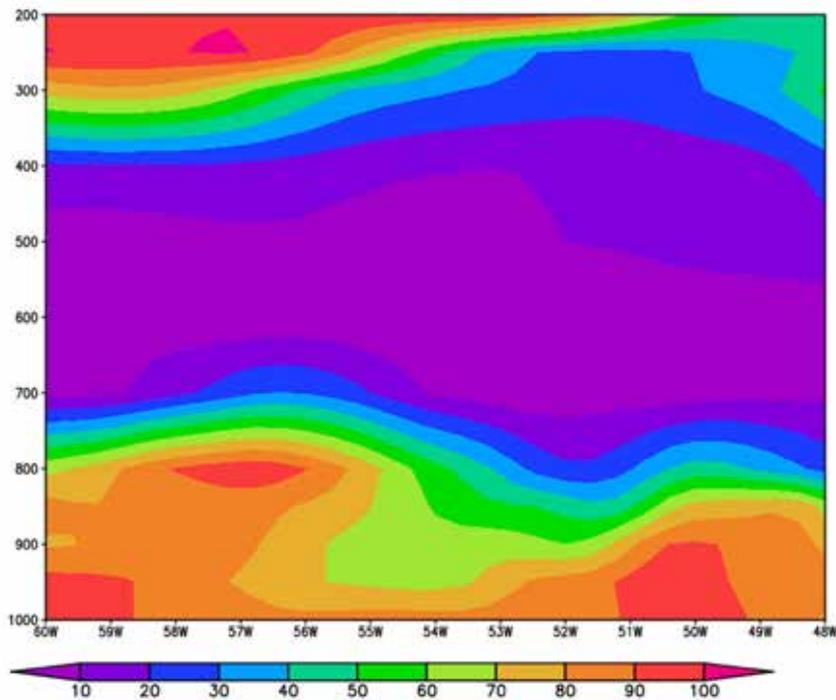


Figura 4 Corte vertical de umidade relativa (%) fixado na latitude 29°S às 06 UTC do dia 08/06/2017. Fonte: Era Interim.

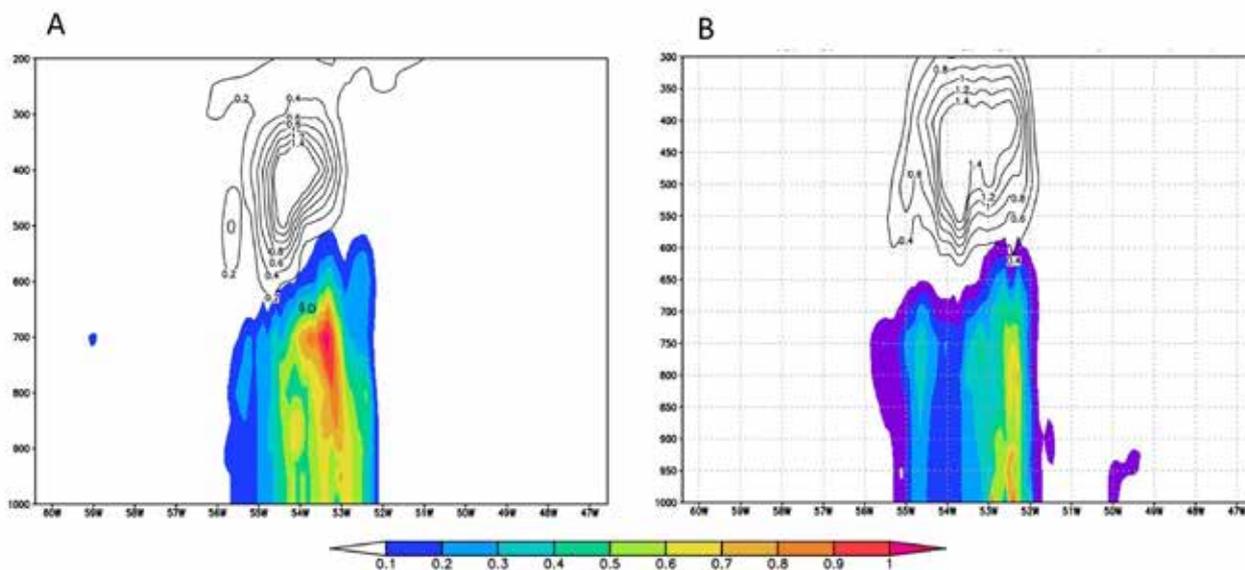


Figura 5 Corte vertical de chuva (g/kg) - sombreado e gelo (g/kg) – contornos, fixado na latitude 29°S às 06 UTC do dia 08/06/2017 para A. Experimento 1, e B. Experimento 2. Produto do BRAMS.

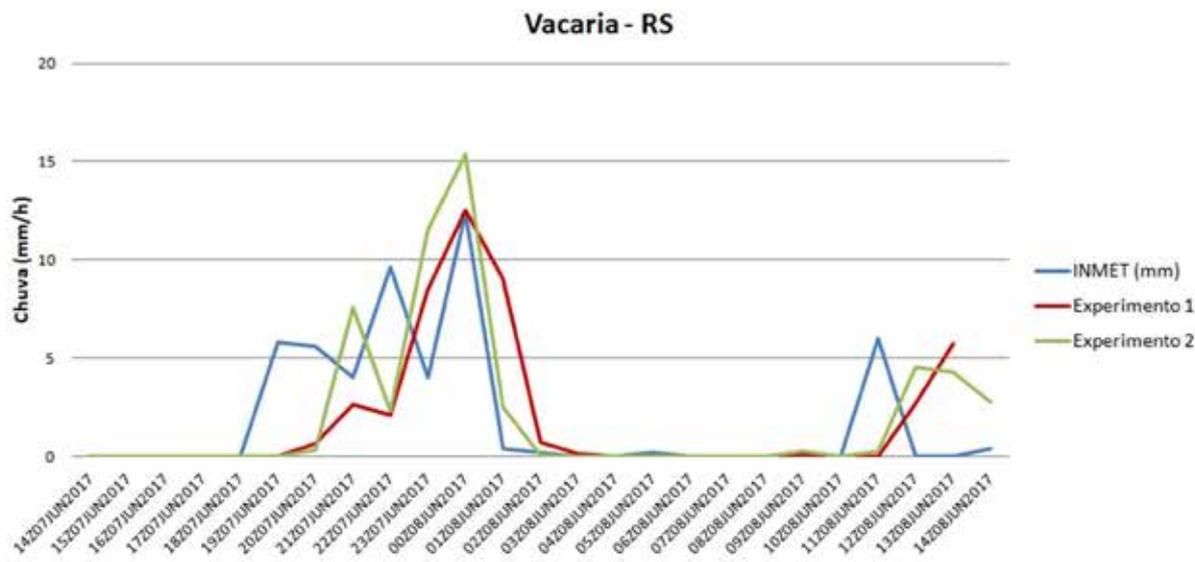


Figura 6 Intensidade da precipitação observada (mm/h) pelo INMET em Vacaria (linha azul) e simulada pelo modelo BRAMS considerando a distribuição do experimento 1 (linha vermelha) e do experimento 2 (linha verde) para a cidade de Vacaria (RS) entre os dias 07 e 08/06/2017.

nesses tipos de simulação, visto que o processo físico de resfriamento evaporativo ocorre em uma escala convectiva onde um modelo numérico, utilizando uma grade de 10 km de resolução, encontra grande dificuldade de representar esse fenômeno. Nesse caso o modelo não é capaz de resolver numericamente processos em escala convectiva

e, conseqüentemente, seu produto final não possui uma acurácia satisfatória para representar pontualmente a intensidade do vento em superfície. Entretanto, isso não ocorre apenas devido a problemas de resolução espacial (grade do modelo), mas também em função da topografia acentuada. Por fim, destaca-se que para a variável vento o

modelo tende a superestimar os dados observados tanto para a distribuição do experimento 2 quanto para a distribuição do experimento 1. A altitude das cidades pode explicar esse padrão de superestimativa do modelo, visto que a estação meteorológica da cidade de Vacaria encontra-se a 970 m de altitude, e provavelmente o modelo não conseguiu representar bem a influência do relevo nos resultados da simulação, sendo que a altura no modelo encontra-se a 1023 m de altitude.

3.2 Análise Pontual do Evento

Para identificar com maior precisão quantitativa a influência de distribuições de diferentes aerossóis no resultado final do modelo, foi feita uma análise estatística dos desvios. Toda a descrição desta subseção será baseada nos resultados apresentados na Tabela 4.

A partir da análise da variável EM, verifica-se que de uma forma geral o modelo subestimou a chuva durante o evento, visto que para todas as cidades e ambas as distribuições de aerossóis foram obtidos valores negativos

de EM, exceto para o experimento 2 na cidade de Vacaria, onde houve uma pequena superestimativa (0,13 mm/h), provavelmente relacionado à influência do relevo acentuado na parametrização do modelo. Vale destacar que mesmo com um padrão de subestimação, o experimento 2 se comportou melhor nas cidades de Bento Gonçalves, Erechim e Cruz Alta, indicando uma redução no EM de 81%, 57% e 89%, respectivamente, em relação aos desvios observados para o experimento 1 (essa melhor somente para Vacaria). A REQM da precipitação se manteve menor que o desvio padrão (DP) da série observada somente para a cidade de Vacaria (DP = 4,05), enquanto que para as cidades de Bento Gonçalves (DP = 3,14), Erechim (DP = 3,21) e Cruz Alta (DP = 4,36) a dispersão dos desvios apresentados pelas estimativas (experimento 1 e experimento 2) superaram o desvio padrão da série observada. Nota-se que para a cidade de Vacaria houve uma diminuição na REQM no experimento 2 de somente 3% em relação ao experimento 1, enquanto que para a cidade de Erechim houve um aumento de 18% na REQM utilizando o experimento 2 em relação ao experimento 1. A maior discrepância foi encontrada

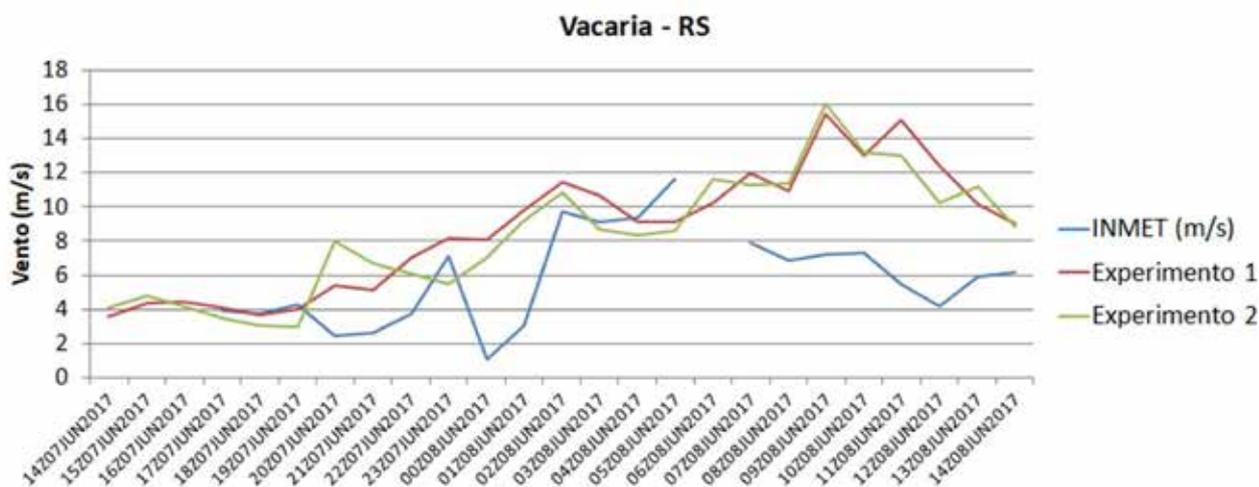


Figura 7 Intensidade do vento observada (m/s) pelo INMET (linha azul) e simulada pelo modelo BRAMS considerando o experimento 1 (linha vermelha) e experimento 2 (linha verde) para a cidade de Vacaria (RS) entre os dias 07 e 08/06/2017.

	Exps	Bento Gonçalves		Cruz Alta		Erechim		Vacaria	
		REQM	EM	REQM	EM	REQM	EM	REQM	EM
Chuva (mm/h)	Exp. 1	3,77	-0,26	5,13	-1,83	2,80	-0,83	3,42	-0,02
	Exp. 2	4,62	-0,05	5,96	-0,20	3,29	-0,36	3,32	0,13
Vento (m/s)	Exp. 1	1,68	0,50	2,25	0,23	3,84	2,77	4,63	3,38
	Exp. 2	1,21	0,41	2,34	0,15	3,73	2,80	4,43	2,89

Tabela 4 Desvios estatísticos calculados para as estimativas de chuva (mm/h) e de vento (m/s) simuladas pelo modelo BRAMS para as quatro cidades do Estado do Rio Grande do Sul investigadas nesta pesquisa, considerando a distribuição de aerossóis continentais (experimento 1) e oceânicos (experimento 2).

para a cidade de Cruz Alta, utilizando o experimento 2, chegando a um valor máximo de 5,96 mm.

Em relação ao vento, nota-se a partir da Tabela 4 um padrão persistente de superestimativa para as quatro cidades examinadas, sendo que o modelo exibiu um EM menor para o experimento 2 em todos os municípios, com exceção de Erechim. A superestimação do vento pode ser explicada, visto que todas as cidades estão em altitudes consideráveis acima do nível do mar (Tabela 1), o que pode causar erros provenientes da parametrização inadequada dos processos físicos da atmosfera, desconsiderando a interação com o relevo. Por outro lado, as cidades de Bento Gonçalves e Cruz Alta se destacam com EM abaixo de 1 m/s e uma redução de 18% e 35% no EM utilizando o experimento 2, respectivamente.

Os resultados para o REQM não foram diferentes, o experimento 2 garantiu menor dispersão dos desvios para praticamente todas as cidades em análise, com exceção do município de Cruz Alta, onde houve uma redução no REQM de 4% utilizando o experimento 1. Para as demais cidades, o experimento 2 apresentou uma redução na dispersão dos desvios de 4% (Vacaria), 28% (Bento Gonçalves) e 3% (Erechim).

4 Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi verificar a sensibilidade do modelo BRAMS ao utilizar diferentes distribuições de aerossóis na parametrização microfísica do modelo. A partir de uma análise em mesoescala o modelo BRAMS garantiu uma performance satisfatória para ambas distribuições de aerossóis, visto a representação do posicionamento da linha de instabilidade e a distribuição de chuva (Figura 3) validados pela imagem de radar (Figura 2). Para uma validação pontual, o modelo BRAMS conseguiu representar a tendência de aumento e diminuição da chuva, porém, com defasagem temporal de no máximo 1 hora (Figura 7), o que por sua vez pode causar um erro na escolha da melhor janela horária para operação e manutenção da rede elétrica. Por outro lado, quando se trata de um planejamento na escolha do melhor dia da semana para operação e manutenção, a defasagem horária não influencia na performance do modelo.

Ao introduzir diferentes distribuições de aerossóis, nota-se que o modelo teve melhores resultados para o experimento 2 tanto para chuva quanto para o vento. Os resultados mostram que após introduzir no modelo características microfísicas de aerossóis oceânicos, houve uma redução no EM de até 90% para a chuva e de até 33% para o vento. Além disso, garantiu uma boa redução na dispersão dos desvios, de até 28% para o vento e de até 3% para a chuva, levando em consideração somente os casos

em que a dispersão dos desvios foi menor que o desvio padrão da série ($REQM < DP$).

Por fim, é de suma importância destacar que o resfriamento evaporativo é um ingrediente importante para formação de rajadas de vento forte em superfície, responsáveis por grandes danos à rede elétrica. Como o processo de resfriamento evaporativo está completamente ligado aos processos termodinâmicos na atmosfera, sugere-se a introdução de parâmetros microfísicos da nuvem, como por exemplo, o raio efetivo da gota na parametrização do modelo BRAMS. Para tal, seria necessário a utilização de dados observados via satélite, o que por sua vez poderia refinar ainda mais a performance do modelo em mesoescala. Além disso, a modelagem de índices de instabilidade também pode ser uma boa opção para melhorar a previsão de tempo severo no sul do Brasil.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem as empresas Climatempo e CPFL Energia pelos dados disponibilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

6 Referências Bibliográficas

- Aires, M. 2016. *Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro: Estudo de Caso do Escorregamento do Morro do Bumba, Niterói, RJ, Utilizando o Modelo BRAMS*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 120p.
- Alonso, M.F. & Saraiva, J.M.B. 2007. Estudo numérico do papel dos esquemas de convecção na simulação de um evento severo nos extratropicais do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25(3): 237-255.
- Brooks, H.E.; Lee, J.W. & Craven, J.P. 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmospheric Research*, 67: 73-94.
- Calvetti, L.; Coelho, W.F.; Beneti, C.; Inouye, R.T.; Gonçalves, J.E.; Maske, B. & Neundorf, R.L. 2019. Estudo de Caso de Tombamento de Torre de Transmissão de Energia Elétrica no Sudoeste do Paraná Durante Evento de Microexplosão. *Anuário do Instituto de Geociências*, 40(3): 139-146.
- Chen, C. & Cotton, W.R. 1983. A one-dimensional simulation of the stratocumulus-capped mixed layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 25(3): 289-321.
- Dee, D.P.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M.A.; Balsamo, G.; Bauer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A.C.M.; van de Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delso, C.; Dragani, I.R.; Fuentes, M.; Geer, A.J.; Haimberger, L.; Healy, S.B.; Hersbach, H.E.V.; Hólm, L.; Isaksen, P.; Kållberg, M.; Köhler, M.; Matricardi, A.P.; McNally, B.M.; Monge-Sanz, J.-J.; Morcrette, B.-K.; Park, C.; Peubey, P.; de Rosnay, C.; Tavolato, J.-N.; Thépaut, & Vitart F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration

- and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656): 553-597.
- Flatau, P.J.; Tripoli, G.J.; Verlinde, J. & Cotton, W.R. 1989. CSU-RAMS cloud microphysics module: general theory and code documentation. *The Atmospheric science paper*, No. 451, 88p. [Available from Colorado State University, Dept, of Atmospheric Science, Fort Collins, Colorado].
- INMET. 2018. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 09/04/2018.
- Freitas, S.R.; Panetta, J.; Longo, K.M.; Rodrigues, L.F.; Moreira, D.S.; Rosário, N.E.; Silva Dias, P.L.; Silva Dias, M.A.F.; Souza, E.P.; Freitas, E.D.; Longo, M.; Frassoni, A.; Fazenda, A.L.; Silva, C.M.S.; Pavani, C.A.B.; Eiras, D.; Frana, D.A.; Massaru, D.; Silva; Fernanda, B.; Cavalcante, F.; Pereira, G.; Camponogara, G.; Ferrada, G.A.; Campos Velho, H.F.; Menezes, I.; Freire, J.L.; Alonso, M.F.; Geita, M.S.; Zazur, A. M.; Fonseca, R.M.; Lima, R.S.; Siqueira, R.A.; Braz, R.; Tomita, S.; Oliveira, V.; Martins, Leila D. 2017. The Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS 5.2): an integrated environmental model tuned for tropical areas. *Geoscientific Model Development*, 10(1): 189-222.
- Grell, G.A.; & Dévényi, D. 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29(14): 38-1.
- Kaufmann, R.K.; Seto, K.C.; Schneider, A.; Liu, Z.; Zhou, L. & Wang, W. 2007. Climate response to rapid urban growth: evidence of a human-induced precipitation deficit. *Journal of Climate*, 20(10): 2299-2306.
- Kusaka, H.; Nawata, K.; Suzuki-Parker, A.; Takane, Y. & Furuhashi, N. 2014. Mechanism of precipitation increase with urbanization in Tokyo as revealed by ensemble climate simulations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(4): 824-839.
- Marcelino, I.P.V.O.; Herrmann, M.L.P. & Ferreira, N.J. 2009. The Occurrence of Tornadoes in Santa Catarina State, Brazil. *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia*, 33(1): 27-38.
- Mellor, G.L. & Yamada, T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, 20(4): 851-875.
- Nascimento, E.D.L. 2005. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20(1): 121-140.
- Pereira, R.F. 2015. *Um Estudo de Características Físicas Associadas a Ventos Convectivos Intensos nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil Usando Modelagem Numérica*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 96p.
- Pinto, L.C.; Pereira, E.B.; Martins, F.R. & da Fonseca L. R. 2012. Avaliação comparativa de simulações numéricas de vento utilizando o modelo de mesoescala BRAMS. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 3(2): 117.
- Pinto, L.I.C.; Martins, F.R.; Pereira, E.B.; Fisch, G.F.; & Lyra, R.F.D.F. 2014. 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*, 29(2): 242-258.
- Rogers, R.R. 1979. *A Short Course in Cloud Physics*. Pergamon Press, 235p.
- Shepherd, J.M.; Pierce, H. & Negri, A. J. 2002. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. *Journal of applied meteorology*, 41(7): 689-701.
- Van Den Heever, S.C. & Cotton, W.R. 2007. Urban aerosol impacts on downwind convective storms. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(6): 828-850.
- Weisman, M.L. & Klemp, J.B. 1986. Characteristics of isolated convective storms. In: RAY, P.S. (ed.). *Mesoscale meteorology and forecasting*. American Meteorological Society, p. 331-358.
- Zipser, E.J.; Cecil, D.J.; Liu, C.; Nesbitt, S.W. & Yorty, D.P. 2006. Where are the most intense thunderstorms on Earth?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(8): 1057-1072.