



Estudo avaliativo da parametrização cúmulos do Modelo WRF 4.0 para um caso de precipitação extrema ocorrido em Fortaleza Ce, Brasil.

Vanessa de Almeida Dantas¹, Vicente de Paula Silva Filho², Luciana Sousa Vieira³.

^{1,2,3} Doutores, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- Unidade Eusébio-CE

Artigo recebido em 02/05/2021 e aceito em 28/03/2022

RESUMO

Os modelos de simulação numérica do comportamento atmosférico apresentam diferentes possibilidades de resultados, a partir de diferentes parametrizações, para descrever o mesmo fenômeno. Isto pode facilmente ser verificado, quando a simulação é feita para um mesmo fenômeno meteorológico utilizando-se os diferentes tipos de parametrização de nuvens, disponíveis nos códigos de cada modelo. Este é o caso do WRF (Weather Research and Forecasting), particularmente quando a simulação é feita para regiões tropicais onde as nuvens cúmulos são responsáveis pela maior parte da precipitação que ali ocorre. Este trabalho compara e discute os resultados da precipitação simulada com o WRF, para um evento de precipitação extrema, ocorrido em Fortaleza, Ceará (Brasil), nos dias 03 e 04 de janeiro de 2015. Três esquemas diferentes, já implementados no WRF4.0, foram utilizados para parametrizar a convecção cúmulos; São eles: Kain-Fritsch (cu_physics 1), Betts-Miller-Janjic (cu_physics 2) e Grell-Devenyi (cu_physics 3). A precipitação total diária simulada foi comparada com os dados de chuva do Climate Prediction Centre (CPC) e Reanálise do National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). Os resultados mostram que para a precipitação diária, as parametrizações de Betts-Miller e Grell-Devenyi foram as que proporcionaram os resultados que mais se aproximaram do observado. Para os totais diários de precipitação, a parametrização de Grell-Devenyi foi a que apresentou melhor desempenho.

Palavras-chave: Modelagem atmosférica, parametrização cumulus, extremos de chuva

Evaluative study of the cumulative parameterization of Model WRF for a case of extreme precipitation that occurred in Fortaleza-Ce, Brazil.

Numerical simulation models of atmospheric behavior present different possibilities of results, from different parameterizations, to describe the same phenomenon. This can easily be verified when the simulation is performed for the same meteorological phenomenon using the different types of cloud parameterization, available in the codes of each model. This is the case of WRF (Weather Research and Forecasting), particularly when the simulation is done for tropical regions where the cumulus clouds are responsible for most of the precipitation that occurs there. This paper compares and discusses the results of simulated precipitation with the WRF, for an extreme precipitation event, which occurred in Fortaleza, Ceará (Brazil), on January 3rd and 4th, 2015. Three different schemes, already implemented in WRF4.0, were used to parameterize the cumulus convection; They are: Kain-Fritsch (cu_physics 1), Betts-Miller-Janjic (cu_physics 2) and Grell-Devenyi (cu_physics 3). The simulated total daily precipitation was compared with rainfall data from the Climate Prediction Center (CPC) and Reanalysis from the National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). The results show that for daily rainfall, the Betts-Miller and Grell-Devenyi parameterizations provided the results that were closest to what was observed. For daily rainfall totals, the Grell-Devenyi parameterization showed the best performance.

Keywords: Atmospheric modeling, cumulus parameterization, extremes of rain

Introdução

Em termos de problemas ambientais, a precipitação pluvial é de fundamental importância para a sociedade, pelas consequências advindas de seu déficit ou excesso. Sobre regiões tropicais, a precipitação é a variável climatológica mais difícil de ser simulada com precisão, devido a vários fatores, entre eles as condições iniciais e as parametrizações físicas, bem como na interação

entre estas parametrizações. Uma das dificuldades inerentes a estas simulações se deve em parte, à forma como os processos de nuvens cumulus profundas são representados nas parametrizações de convecção (Spencer; Stensrud, 1998). Logo, uma melhor representação da convecção profunda é um fator que pode favorecer simulações de precipitação mais satisfatórias para a região

tropical, visto que, os sistemas convectivos, principalmente a convecção de cúmulos, são os principais responsáveis pela precipitação nessa região.

O Weather Research and Forecasting Model versão 4.0 (WRF) disponibiliza várias opções de parametrização para a convecção cúmulos, cada uma delas desenvolvida por autores diferentes, com características diferentes, que consideram distintos os aspectos físicos dos mecanismos que regem o comportamento da formação e evolução deste tipo de nuvem. Esse modelo numérico vem sendo difundido não só no Brasil mas também em boa parte do mundo não só na previsão de precipitação mas também de outras componentes atmosféricas, com ajustes paramétricos para cada região de estudo para que um melhor resultado seja obtido (Dantas et al., 2019, Macedo et al., 2011; Ramos et al., 2013; Mollmann Junior et al., 2013; Oliveira, 2004). Este trabalho apresenta um estudo de casos onde se procura verificar qual destas parametrizações de Cumulus, confere o melhor desempenho do modelo, em reproduzir a ocorrência de fenômenos atmosféricos extremos. Uma vez definida, esta parametrização poderá ser escolhida para contribuir na simulação geral do comportamento da atmosfera, sobre a região nordeste do Brasil. Para isto, um caso ocorrido no dia 04 de janeiro de 2017 sobre a região metropolitana da cidade de Fortaleza – Ce, foi escolhido.

Material e Métodos

Uma parametrização é introduzida quando se refere a determinado mecanismo que o modelo não é capaz de resolver. No caso da convecção *cumulus* os mecanismos relativos normalmente acontecem em escalas que são inferiores às da grade de execução (escalas de sub-grade) do modelo. Neste caso, a parametrização é necessária, principalmente para simulações de fenômenos atmosféricos que ocorrem sobre regiões onde a maior porcentagem da precipitação é devida a este tipo de fenômeno, como a região nordeste do Brasil. Dependendo das condições locais, cada parametrização individual pode apresentar resultados melhores que as demais. Desta forma, a aplicação destes esquemas não é óbvia quando ele é aplicado em uma região com características distintas da região avaliada (Wang; Seaman, 1997). Vários estudos foram desenvolvidos com o intuito de avaliar e aprimorar os esquemas de parametrização convectiva (Molinari; Dudek, 1992; Kain, 2004; Arakawa, 2004; Jankov et al., 2005; Yu; Lee,

2011). No entanto, a maioria desses estudos avaliaram esquemas convectivos em situações e ambientes específicos, distintos daquele sobre o qual pretende-se testar neste trabalho.

Dantas V.A et al, 2019 estudaram casos para o Nordeste Brasileiro, onde o esquema de parametrização que o Kain-Fritsch e Grell-3 ocupando a segunda posição, apresentaram resultados com a forma mais parecida com a dos dados observados e o de Tiedtke com mais desvio do formato obtido com os dados observados. Esses resultados visuais, juntamente com o encontrado ao plotar o diagrama de Taylor forneceu uma maior confiança na decisão em relação à escolha da parametrização de cumulus mais adequada a qual foi fundamental para a elaboração de outros trabalhos com períodos maiores previstos.

No WRF existem parametrizações diferentes, elaboradas por diferentes autores, que podem ser escolhidas para representar os efeitos da ocorrência das nuvens do tipo *cumulus*, no tempo da simulação. As diferenças entre estas parametrizações estão na importância que, ao elaborar sua parametrização, cada autor confere a cada mecanismo físico considerado como responsável pelo fenômeno. Essas parametrizações disponíveis podem ser testadas e comparadas entre si, cujo resultado indicaria qual a mais adequada a ser usada para representar determinada situação. Este procedimento é normalmente feito para casos extremos onde, caso o resultado seja satisfatório, seria razoável considerar que os resultados seriam bons também nas demais situações.

Neste trabalho as diferentes parametrizações disponíveis no modelo serão testadas visando-se saber qual delas melhor responde à convecção *cumulus* que ocorre sobre a região nordeste do Brasil.

Em março de 2005, com a nova delimitação, o Ceará passou a ter cento e cinquenta municípios pertencentes ao semiárido (região de baixa pluviosidade), ocupando uma área de 126.514,9 Km², que representa 86,8% da área total do estado (IPECE, 2010). A escassez pluviométrica induz a que os sistemas de drenagem das cidades pareçam desnecessários e, quando uma precipitação mais volumosa acontece, existe uma grande probabilidade para a ocorrência de alagamentos. Este parece ser o caso da cidade de Fortaleza, capital do estado do Ceará, Brasil, onde em 04 de janeiro foi registrada pela Fundação Cearense de Meteorologia - FUNCEME, uma precipitação de

132 mm, com a ocorrência de alagamentos em várias de suas regiões. O mesmo sistema meteorológico que causou esta precipitação sobre a cidade de Fortaleza também causou fortes precipitações nas cidades circunvizinhas, como no município de Aquiraz que teve o maior volume registrado, com 163,2 mm no posto Aquiraz, seguido de Pindoretama (145 mm), Eusébio (132 mm), Aquiraz (120 mm) no posto Sítio Sapucaia Fagundes, Fortaleza (100,6 mm) no posto Pici;

Cascavel (90 mm) e Fortaleza (87,4 mm) no posto Defesa Civil. Além da Região Metropolitana de Fortaleza - RMF, Ibiapaba somou 78,5 milímetros. Este evento causou grandes transtornos, particularmente à população do morro Santa Terezinha, em Fortaleza, onde ocorreram deslizamentos, e da rua Doutor José Frota, no Bairro Varjota, uma das principais avenidas da RMF, onde ocorreram significativos alagamentos (Figura 01).



Figura01: Imagens do morro Santa Terezinha (a) e Rua Doutor José Frota (b) (Fonte: g1.globo.com)

Dados

Os dados utilizados como condição inicial e de fronteira foram de reanálise do National Centers for Environmental Prediction (NCEP), NCEP Final Analysis (FNL), com resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ (equivalente a aproximadamente 111×111 km perto da linha do equador) e temporal de 4 horas. Os dados do terreno foram obtidos do United States Geological Survey (USGS) e, os dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) não foram inseridos por não se aplicarem a simulações curtas, devido à lenta variação da TSM.

Para avaliar a precipitação simulada pelo modelo WRF, foi utilizada a precipitação estimada por satélite GOES e a temperatura de brilho do topo das nuvens, extraídas do canal infravermelho do satélite GOES-12.

As análises foram realizadas para dois dias de precipitação intensa sobre a RMF no estado do Ceará, nos dias 03 e 04 de janeiro de 2015. Este evento foi selecionado por tratar-se de um caso que, embora extremo, ocorre com razoável frequência nesta região.

Experimentos: características das simulações

As simulações foram realizadas pelo modelo regional WRF-ARW, versão 4.0. Para a implementação do modelo WRF-ARW, a região de estudo foi definida de modo a evitar problemas relacionados aos “efeitos de borda”, que ocorre devido à interação entre os dados utilizados como condição inicial e a grade de alta resolução. As simulações foram realizadas para a região do NEB, com grade centrada na latitude 9°S e longitude de $43,10^\circ\text{W}$ (Figura 02), com resolução espacial de 30 km. A resolução vertical utilizada foi de 30 níveis, com pressão no topo da atmosfera de 10 hPa.

As simulações abrangeram períodos de 144 horas com saídas a cada 4 horas, sendo as primeiras 12 horas de *spin-up*, que representa o tempo para ajuste das simulações.

Os experimentos foram baseados em três diferentes tipos de parametrizações de cumulus (Tabela 1). De modo a isolar o impacto da escolha do esquema convectivo, a configuração do modelo foi mantida em relação às demais parametrizações físicas (Tabela 2) ao longo das três simulações. Ou seja, as diferenças entre as simulações estarão associadas apenas aos

diferentes esquemas de cumulus e sua interação com as outras parametrizações.

Tabela 1: Parametrizações de cumulus utilizadas nas simulações do WRF.

Esquemas	Referência
Kain-Fritsch (cu_physics 1)	(Kain , 2004)
Betts-Miller-Janjic (cu_physics 2)	(Janjic 1994, 2000)
Grell-Devenyi (cu_physics 3)	(Grell e Devenyi, 2014)

Tabela 2: Parametrizações físicas utilizadas nas simulações do WRF.

Categoria	Esquemas	Referência
Microfísica	WSM3 (mp_physics 3)	(Hong et al., 2004)
Radiação de onda longa	RRTM (ra_lw_physics 1)	(Mlawer et al. 1997)
Radiação de onda curta	Dudhia (ra_sw_physics 1)	(Dudhia, 1989)
Camada superficial	Revised MM5 (sf_sfclay_physics 1)	(Jimenez et al. 2012)
Cobertura do solo	Noah LSM (sf_surface_physics 2)	(Tewari et al. 2004)
Camada limite	YSU (bl_pbl_physics 1)	(Hong et al., 2006)

Dados de Reanálises do National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR), com resolução de 2.5° de longitude x 2.5° de latitude nos quatro horários sinóticos: 00, 06, 12, 18 UTC, foram utilizados na elaboração dos campos de linhas de corrente e vorticidade relativa em 200 hPa para identificar o VCAN, e em 700 hPa para identificação das Ondas de Leste. Dados para a estimativa de precipitação do Climate Prediction Centre (CPC) Unified Gauge-Based Analysis of Global Daily Precipitation com resolução de 0.5° de longitude x 0.5° de latitude, para comparar com as saídas do modelo.

Validações das Estimativas de Chuva do WRF

A metodologia proposta por Taylor(2001) tem como objetivo, avaliar o desempenho do modelo nos vários testes efetuados. A qualidade dos dados simulados é definida por várias medidas estatísticas calculadas. A variável avaliada foi a precipitação acumulada (mm) para os dias referidos.

O Diagrama de Taylor, com base nas seguintes métricas: coeficiente de correlação (r), desvio padrão (σ), Raiz do Erro Quadrático Médio ($REQM$) (Taylor, 2001; Jiang; Zhang; Li, 2016)

que é uma medida frequentemente usada na verificação da acurácia de modelos numéricos.

Para construção do diagrama de Taylor, foram considerados os dados da tabulação cruzada de cada método, ou seja, os dados observados (r) e os estimados (f).

Uma das estatísticas mais utilizadas para observar a qualidade do modelo é comparando essas duas variáveis pela Raiz Quadrada da Média do Quadrado das Diferenças (E) foi utilizada nesse estudo, dado por:

$$E = \left[\frac{1}{N} \sum (f_n - r_n)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Sendo f e r dados estimados e observados, respectivamente.

A Raiz Quadrada da Média do Quadrado das Diferenças Centralizadas (E):

$$E'^2 = s_f^2 + s_r^2 - 2s_f s_r R \quad (2)$$

Sendo Sf e Sr os desvios-padrão dos dados previstos e observados, respectivamente; R é o

coeficiente de correlação (Pereira,2014). A validação foi realizada com a chuva acumulada para cada evento

A construção do diagrama de Taylor se dá pela representação de $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{4}$ de círculo, sendo este último o mais comum. Os eixos x e y têm as medidas do desvio-padrão, sendo sobre o eixo x colocado o valor de (S_r) . A distância radial da origem à posição representando o modelo é o S_f . O azimute da origem ao modelo é proporcional a R . (Pereira et al, 2014)

Resultados e discussão

De acordo com informações da FUNCEME, a chuva na RMF superou a média histórica para o mês de janeiro de 2015, atingindo aproximadamente 132 mm, foi considerada bastante severa e está documentada em Coutinho et al. (2017) . Uma vez que, 122 mm era o

esperado até o final de todo o mês. Outras cidades cearenses de regiões como o Cariri, Inhamuns e Ibiapaba, também tiveram precipitação acima da média. Estimativas do CPC conseguiram representar positivamente a precipitação na região nos dois dias do evento, podendo também ser observadas nas imagens de satélite do GOES dos canais vapor d'água e infravermelho.

A combinação de dois sistemas meteorológicos, um Vórtice Ciclônico de Ar Superior (VCAN_s) e as Ondas de leste (OL) atuando simultaneamente no NEB, trouxeram algumas chuvas isoladas ao Ceará e foram os responsáveis pela intensidade e quantidade de chuva observada nesses dois dias.

Abaixo, (Figura 03a e 03b) núcleos convectivos no Leste do Nordeste no dia 03 e deslocando-se para o interior do estado e de topo mais frio já atuando sobre parte do Nordeste são observados no dia 04.

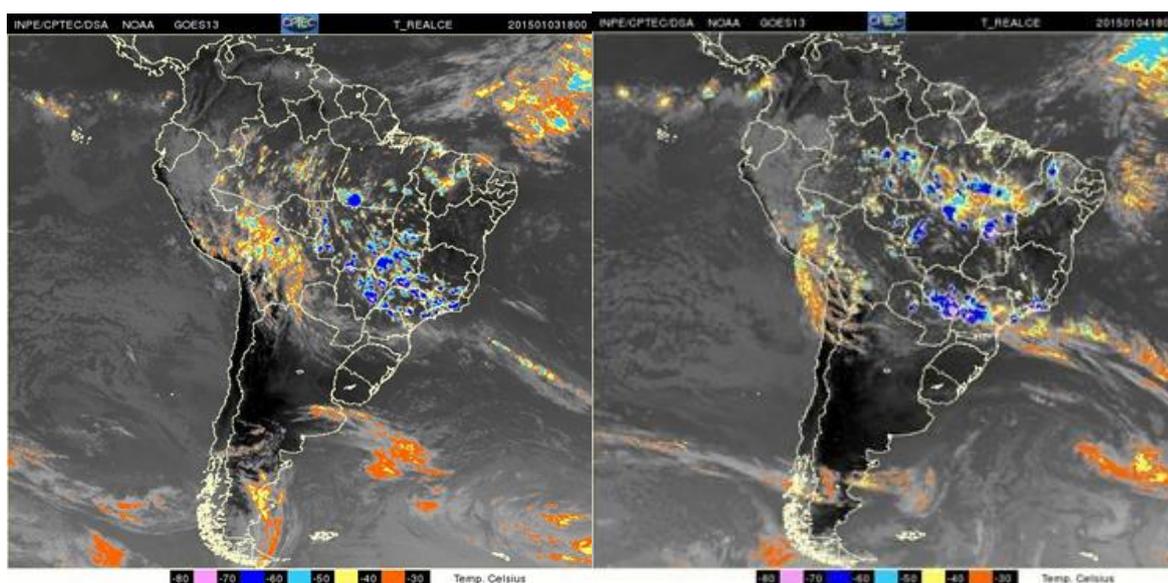


Figura 03: Imagem do satélite GOES -13, canal 4 para o horário sinótico 18Z, nos dias 03 (a) e 04 (b) de janeiro de 2015 respectivamente, sobre o Nordeste.

Fonte: DSA/CPTEC/INPE.

Nas imagens de satélite GOES (Figura 04a e 04b) é possível perceber a atuação do VCAN causando influencia no Nordeste e gerando nuvens carregadas sobre várias áreas que provocam chuva forte. Estas nuvens estão se formando no litoral e no interior dos estados e essa circulação especial de ventos observada em torno dos 10 mil metros

de altitude e um giro horário provocado pelo VCAN é observado também ficando mais evidente no dia 04 na costa leste do Nordeste, atuando juntamente com a Zona de Convergência do Atlântico Sul, intensificando a precipitação nesse dia.

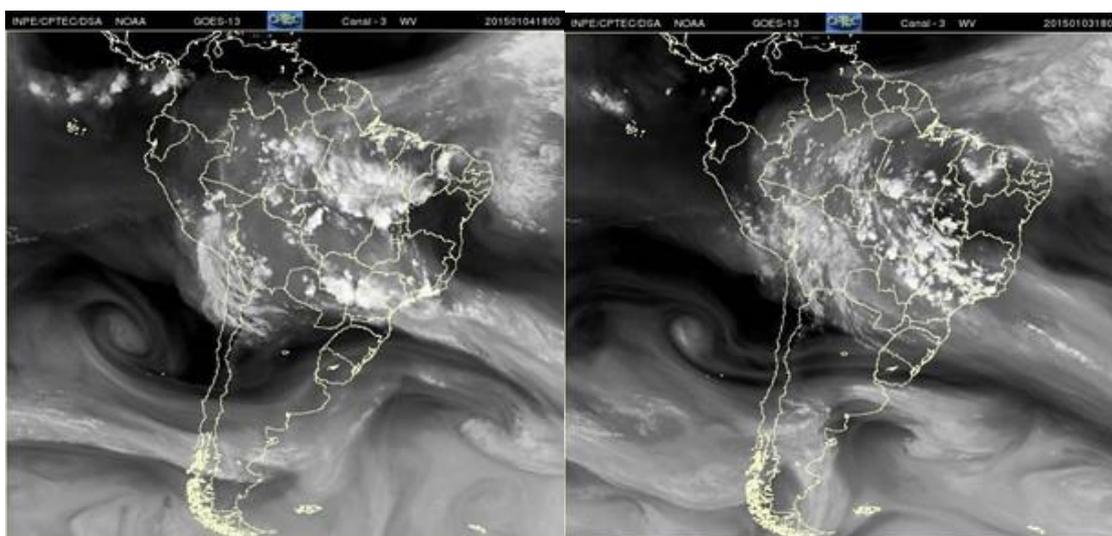


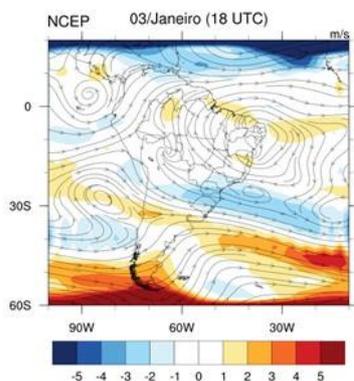
Figura 04: Imagem do satélite GOES do produto vapor d'água, para o horário sinótico 18UTC, nos dias 03 (a) e 04 (b) de Janeiro de 2015 respectivamente, sobre o Nordeste. Fonte: DSA/CPTEC/INPE.

A partir de informações da FUNCEME, esse sistema intensificou-se e durou até o dia 04 com chuvas intensas sobre toda a RMF.

Na imagem abaixo, Figura 05 é possível visualizar a configuração do VCAN em 200 hPa, com seu centro localizado na parte central do

estado da Bahia às 18UTC do dia 03 (Figura 05a. No mesmo horário do dia seguinte, aquele sistema se deslocou um pouco mais para nordeste, a partir das 18UTC do dia 04 (Figura 04b), percebe-se o maior desenvolvimento das nuvens convectivas na costa do Rio Grande do Norte.

Linhas de corrente e vorticidade em 200 hPa



Linhas de corrente e vorticidade em 200 hPa

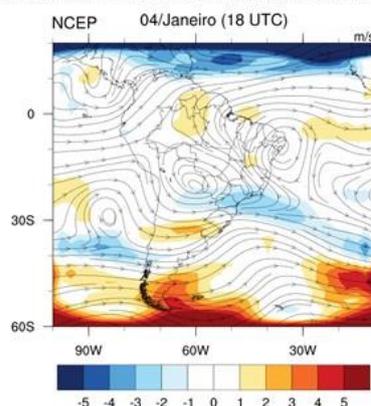


Figura 05: Linhas de corrente e vorticidade em 200 hPa para o dia 03(a) e 04(b) de Janeiro, no horário sinótico de 18UTC em (m/s), respectivamente.

Validações das Estimativas de Chuva do WRF

A Figura 06 mostra a precipitação observada comparada com os três tipos de parametrizações de convecção cumulus para o caso de evento extremo de precipitação que ocorreram nos dias 03 e 04 de Janeiro de 2015. A

partir desta Figura observa-se que, os dados do CPC registraram um pico de precipitação em torno de 30 mm no dia 03 de Janeiro de 2015 com máximos de 60 mm para este dia. Nota-se que das três parametrizações de convecção utilizada, para

esse domínio (Figura 06a-c, respectivamente) a parametrização de CU_3 (Grell-Fritsch) foi a que representou melhor a precipitação no ponto representado para a RMF especificamente, CU_2

(Betts-Miller-Janjic) e CU_1 (Kain-Fritsch) vieram logo em seguida com 52 mm e 43 mm para esse dia de evento.

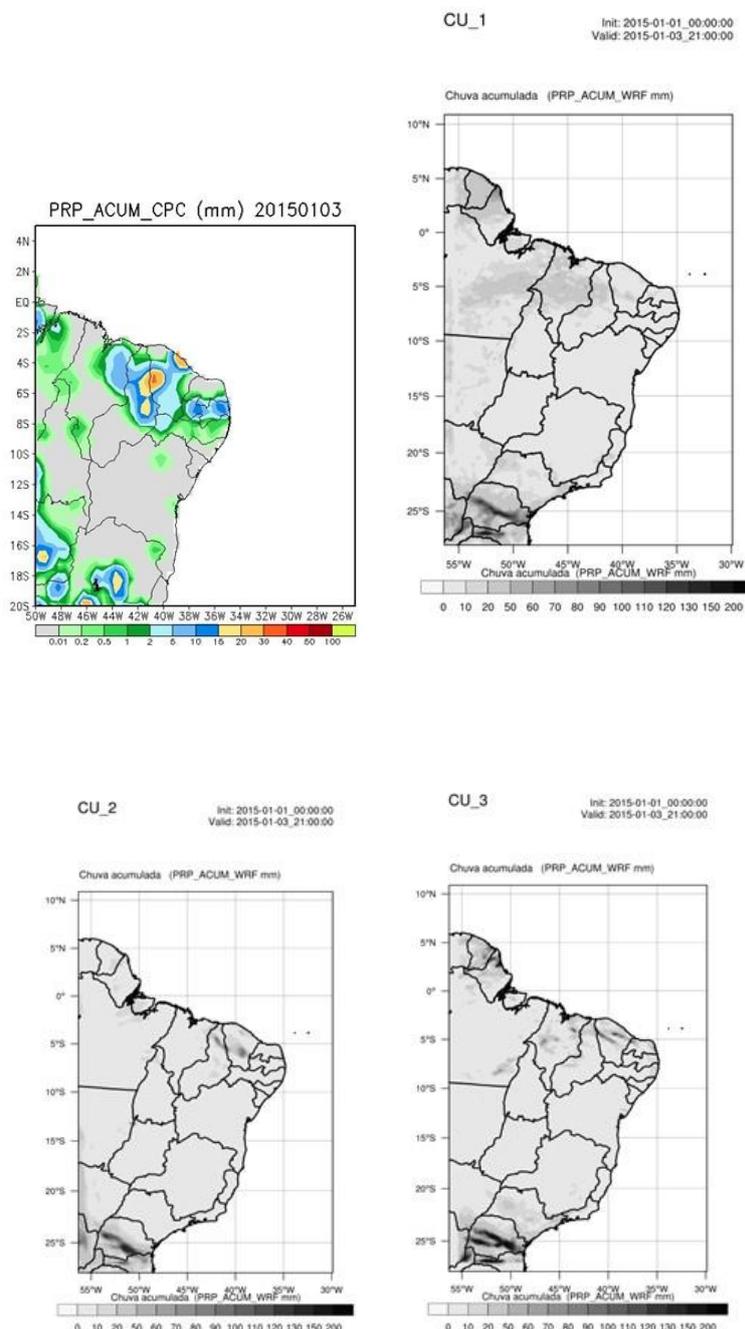


Figura 06: Precipitação acumulada, utilizando dados do CPC (a), e simulados pelo WRF com as três parametrizações de cumulus CU_1 (b), CU_2 (c) e CU_3 (d) para o evento ocorrido nos dias 03 de Janeiro.

A Figura 07 mostra que o total diário de precipitação observado pelo CPC em torno de 40 mm no dia 03 e 100 mm no dia 04 para a RMF. Observa-se que os totais diários das três parametrizações de convecção tenderam a superestimar o observado, elevando os valores de

precipitação nesse ponto. A parametrização de CU_2 (Betts-Miller-Janjic) foi a que mais se aproximou com 140 mm, quando comparado com 130 mm observado pela FUNCEME e 100 mm do CPC de precipitação no dia 04.

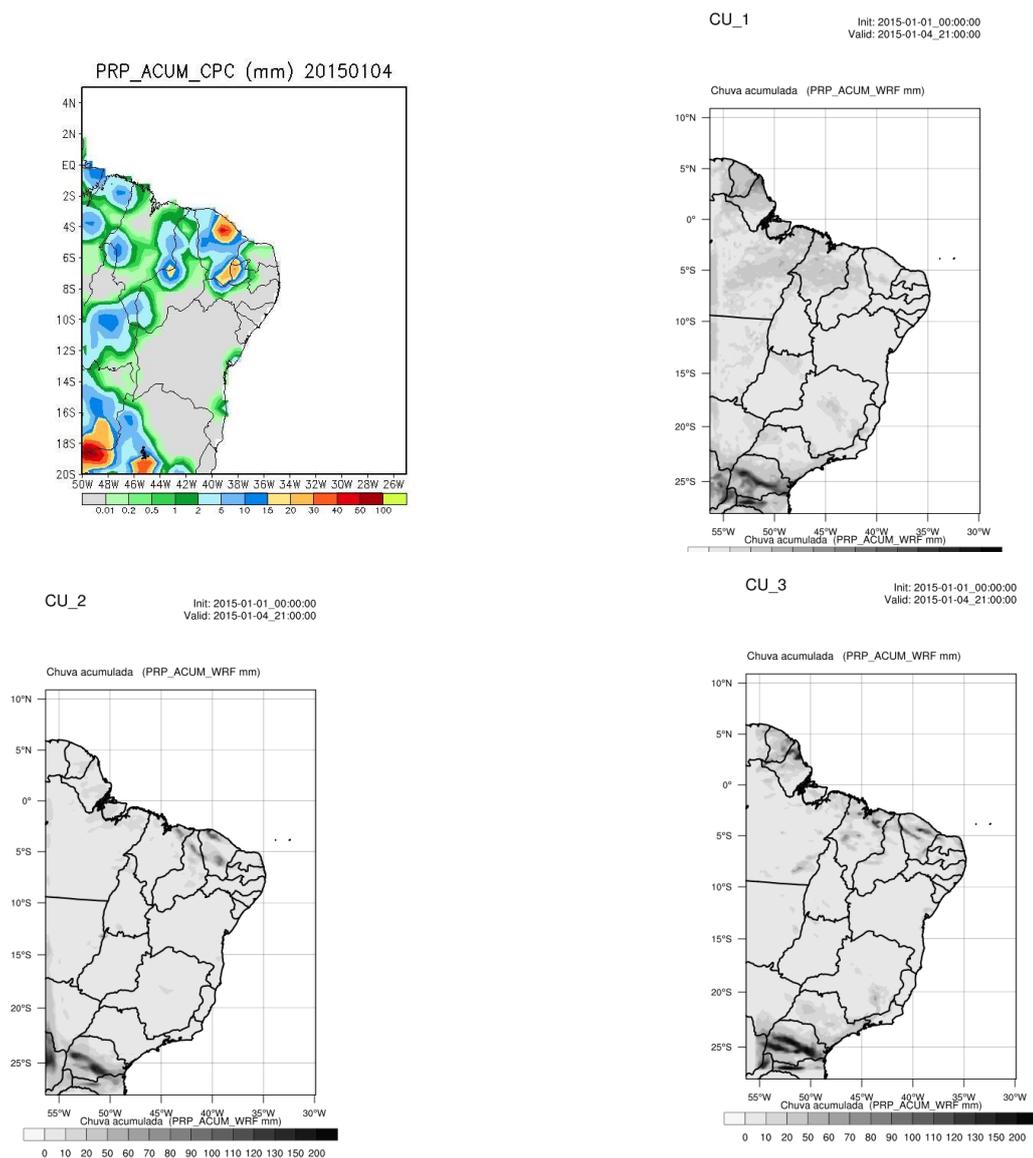


Figura 07: Precipitação acumulada, utilizando dados do CPC (a), e simulados pelo WRF com as três parametrizações de cumulus CU_1 (b) ,CU_2 (c) e CU_3 (d) para o evento ocorrido nos dias 04 de Janeiro 2015.

Apesar das três parametrizações de convecção superestimarem o total de precipitação para o período de ocorrência do evento no estado do Ceará, especificamente quando analisado o ponto sobre a RMF observa-se que os valores do total de precipitação entre as parametrizações foram próximos estatisticamente, apresentado boas correlações.

Na Figura 08 o diagrama de Taylor apresenta o skill das simulações de precipitação com relação ao conjunto de dados de referência (CPC). Durante o evento para os dias 03 e 04 de Janeiro de 2015 respectivamente, os produtos de precipitação simulada agrupados distantes do

ponto de referência, mostraram valores de correlação entre 0,95 e 0,99.

O esquema CU_1 (KF) nos dois dias do evento foi o que mais se aproximou dos dados de referência, uma vez que essa parametrização sugere uma superestimação de precipitação tanto em simulações de clima como de tempo, corroborando com autores como Oyama (2006), pois garante uma conservação de massa, energia e momento como um de seus diferenciais das outras duas usadas. O esquema CU_2 (BMJ) de acordo com Gallus (1999) é ativado quando o ambiente é condicionalmente instável e a atmosfera é mais úmida que a atmosfera de referência e uma vez

que os perfis de referência são relativamente secos este esquema tende a remover toda a umidade presente minimizando a quantidade de chuva produzida explicitamente, podendo explicar sua

menor correlação de 0,85 no dia 03 de Janeiro com 52 mm, quando os totais acumulados registrados pelo CPC e FUNCEME foram de 32,8 mm e 32,3 mm respectivamente.

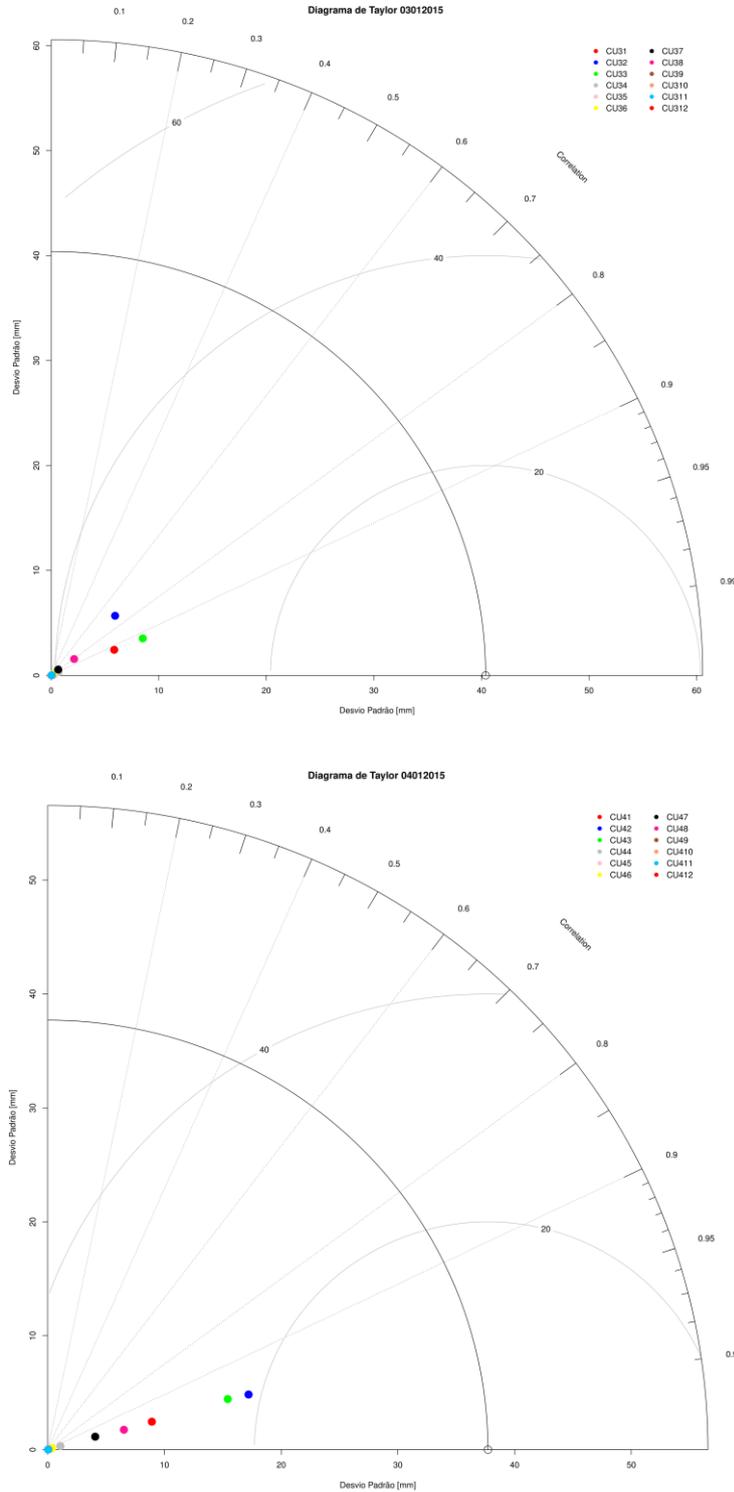


Figura 07: Diagramas de Taylor para a correlação e desvio padrão médio para o ponto da RMF para os dias 03 (a) e 04 (b) de Janeiro, usando CPC como referência.

Conclusões

Os resultados mostram que para a precipitação diária, as parametrizações de Betts-Miller e Grell-Devenyi foram as que proporcionaram os resultados que mais se aproximaram do observado. Para os totais diários de precipitação, a parametrização de Grell-Devenyi foi a que apresentou melhor desempenho. Os esquemas simulados pelo WRF representaram bem os índices de precipitação na RMF, e o Diagrama de Taylor demonstrou uma forma mais simples e eficaz de visualizar e analisar os resultados obtidos. Ao final deste artigo percebe-se o avanço nas formas mais adequadas de representar a precipitação acumulada em decorrência de eventos extremos, sendo essa um produto mais sensível não só na assimilação, mas também nas parametrizações usadas nos modelos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- Arakawa, A. 2004. The cumulus parameterization problem: Past, present, and future. *Journal of Climate*, 17, p. 2493–2525.
- Dantas, V.D., Filho, V.P., Santos, E.B., & Gandú, A.W. 2019. Testando diferentes esquemas da Parametrização Cumulus do modelo WRF, para a região norte Nordeste do Brasileiro (Testing different WRF Cumulus parameterization schemes for the north-eastern region of Brazil).
- Dudhia, J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 46, p. 3077–3107.
- Grell, G. A.; Freitas, S. R. 2014. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, p. 5233–5250, 2014. DOI:10.5194/acp-14-5233
- Hong, S. Y.; Dudhia, J.; Chen, S. H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 132, 103–120.
- Hong, S. Y.; Noh, Y.; Dudhia, J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, v. 134, p. 2318–2341. DOI:10.1175/MWR3199.
- Jankov, I.; Gallus JR, W. A.; Segal, M.; Shaw, B.; Koch, S. E. 2005. The impact of different wrf model physical parameterizations and their interactions on warm season mcs rainfall. *Weather and forecasting*, 20, 1048–1060.
- Janjic, Z. I., 2000. Comments on "Development and Evaluation of a Convection Scheme for Use in Climate Models." *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57
- Jimenez, P. A.; Dudhia, J.; Gonzalez-Rouco, J. F.; Navarro, J.; Montalvez, J. P.; Garcia-Bustamante, E. 2012. A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Monthly Weather Review*, v. 40, p. 898-918. Doi:10.1175/MWR-D-11-00056.1.
- Kain, J. S. 2004. The kain-fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 170–181.
- Macedo, L. R.; Henkes, A. F.; Yamasaki, Y. 2011. Modelo WRF Na Previsão de um Evento Severo no Rio Grande do Sul. In: IV Encontro Sul-Brasileiro de Meteorologia, Pelotas. IV Encontro Sul-Brasileiro de Meteorologia 4.
- Mlawer, E. J.; Taubman, S. J.; Brown, P. D.; Iacono, M. J.; Clough, S.A. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, p. 16663–16682.
- Molinari, J.; Dudek, M. 1992. Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: A critical review. *Monthly Weather Review*, 120, 326–344.
- Mollmann Junior, R. A.; Silva Junior. R. S.; Gomes, H. B.; Moura, M. A. L., 2013. Estudo da Dispersão de Monóxido de Carbono (CO) Emitido Através da Queima de Cana-De-Açúcar, no Estado De Alagoas. *Revista Brasileira de Geografia Física* 06, 488 499.
- Moura, A.D. & Shukla, J. 1981. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *J. Atmos. Scie.*, 38, 2653-2675.
- Oliveira, J. L., 2007. Influência da circulação geral e da variabilidade interanual sobre o potencial eólico do Nordeste brasileiro. Dissertação de Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas: Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, p.124.
- Ramos, D. N. S.; Lyra, R. F. F.; Silva Júnior, R. S. 2013. Previsão do Vento Utilizando o Modelo Atmosférico WRF Para o Estado. *Revista Brasileira de Meteorologia* 28, 163 - 172.
- Ropelewski, C.F. & Halpert, M. 1997. Global and regional scale precipitation patterns associated

- with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, v. 115, p. 1606-1626. 1997.
- Ropelewski, C.F.; & Jones, P.D. 1987. An Extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index. *Mon. Wea. Rev.*, 15 2161-2165.
- Spencer, P. L.; Stensrud, D. J. 1998. Simulating flash flood events: Importance of the subgrid representation of convection. *Monthly weather review*, 126, 2884–2912.
- Stensrud, D. J. 2007. *Parameterization schemes: keys to understanding numerical weather prediction models*. [S.l.]: Cambridge University Press.
- Taylor, K.E.: 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106, 7183-7192 (also see PCMDI Report 55, <http://www-pcmdi.llnl.gov/publications/ab55.html>)
- Tewari. M.; Chen, F.; Wang, W.; Dudhia, J.; Lemone, M. A.; Mitchell, K.; EK, M.; Gayno, G.; Wegiel, J.; Cuenca, R. H. 2004. Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, p. 11-15.
- Uvo, C.B.; Berndtsson, R. 1996. Regionalization and spatial properties of Ceará State rainfall in Northeast Brazil. *Journal of Geophysical Research*, Washington, 101, 4221-4233.
- Wang, W.; SEAMAN, N. L. A comparison study of convective parameterization schemes in a mesoscale model. *Monthly Weather Review*, 125 252–278, 1997.
- Yu, X.; Lee, T.-Y. 2011. Role of convective parameterization in simulations of heavy precipitation systems at grey-zone resolutions—Case studies. *Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Sciences*, 49, p. 99–112. DOI:10.1007/s13143-011-0001-3.