Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
UFGD Editora

ESTUDO DE CASO DE CHUVA INTENSA PARA A CIDADE DE FORTALEZA-CE E MUNICÍPIOS LITORÂNEOS UTILIZANDO O MODELO WRF 3.9.1

Intense Rain Case Study for the City of Fortaleza-CE and Coastal Municipalities Using the WRF Model 3.9.1

Caso de Estudio de Lluvia Intensa para la Ciudad de Fortaleza-CE y Municipios Costeros Utilizando el Modelo WRF 3.9.1

Luciana Cristina de Sousa Vieira
Instituto de Estudos Avançados – Universidade de São Paulo (IEA-USP)
vieirameteorologia@gmail.com

Vicente de Paula Silva Filho
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
vpsilva@inpe.br

Prakki Satyamurty
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
saty.prakki@gmail.com

Resumo: Este estudo investiga um evento extremo de chuva ocorrido em Fortaleza em 3 de janeiro de 2015, que resultou em danos materiais significativos e impactos socioeconômicos na região. A pesquisa se concentra na aplicação do modelo numérico WRF 3.9.1 (*Weather Research and Forecasting*) para simular este evento, utilizando diferentes esquemas de parametrização física e realizando testes de sensibilidade. Os resultados demonstram que as parametrizações físicas testadas foram capazes de reproduzir o sistema de convecção que afetou não só Fortaleza, mas também os municípios de Paracuru, Aquiraz, Cascavel e Guanaces. Notavelmente, a simulação utilizando a microfísica de Thompson obteve uma representação mais precisa da precipitação. Esta abordagem fornece insights importantes para aprimorar a previsão e compreensão de eventos extremos de chuva, contribuindo assim para a mitigação de seus impactos.

Palavras chave: Previsão, enchente, nuvem, WRF.

Abstract: This study investigates an extreme rainfall event that occurred in Fortaleza on January 3, 2015, resulting in significant material damage and socio-economic impacts in the region. The

research focuses on the application of the numerical model WRF 3.9.1 (Weather Research and Forecasting) to simulate this event, using different schemes of physical parameterization and conducting sensitivity tests. The results demonstrate that the tested physical parameterizations were able to reproduce the convection system that affected not only Fortaleza, but also the municipalities of Paracuru, Aquiraz, Cascavel, and Guanaces. Remarkably, the simulation using Thompson's microphysics achieved a more accurate representation of precipitation. This approach provides important insights to enhance the prediction and understanding of extreme rainfall events, thus contributing to the mitigation of their impacts.

Keywords: Forecast, flood, cloud, WRF.

Resumen: Este estudio investiga un evento extremo de lluvia ocurrido en Fortaleza el 3 de enero de 2015, que resultó en daños materiales significativos e impactos socioeconómicos en la región. La investigación se centra en la aplicación del modelo numérico WRF 3.9.1 (Weather Research and Forecasting) para simular este evento, utilizando diferentes esquemas de parametrización física y realizando pruebas de sensibilidad. Los resultados demuestran que las parametrizaciones físicas probadas fueron capaces de reproducir el sistema de convección que afectó no solo a Fortaleza, sino también a los municipios de Paracuru, Aquiraz, Cascavel y Guanaces. Notablemente, la simulación utilizando la microfísica de Thompson logró una representación más precisa de la precipitación. Este enfoque proporciona ideas importantes para mejorar la predicción y comprensión de eventos extremos de lluvia, contribuyendo así a la mitigación de sus impactos.

Palabras clave: Pronóstico, inundación, nube, WRF.

Submetido em: 15/05/2023
Aceito para publicação em: 10/07/2024
Publicado em: 19/07/2024

1. INTRODUÇÃO

Episódios pluviométricos extremos têm sido relatados em vários artigos científicos na tentativa de analisar por que regiões como o Nordeste Brasileiro (NEB) tem passado por estes eventos (GOMES, 2022). A alta variabilidade espaço-temporal observada para a climatologia de chuva no NEB é o resultado de diversas forçantes do clima (CORREIA FILHO *et al.* 2019; HÄNSEL *et al*. 2016; HASTENRATH, 2012; RAO *et al*. 1993).

Segundo UVO E BERNDTSSON (1996), nesta região, cinco mecanismos controlam o regime de chuvas: 1. Eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS); 2. Temperatura da superfície do mar (TSM) na bacia do oceano Atlântico, Ventos Alísios, Pressão ao Nível do Mar (PNM); 3. Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o oceano Atlântico, 4. Frentes Frias, e 5. Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN).

A precipitação anual para o NEB varia de 300 a 2000 mm, com elevadas temperaturas ao longo do ano e conta ainda com três diferentes climas: clima equatorial úmido, clima litorâneo úmido e clima tropical semiárido (IDALINO, 2020). A variação interanual e sazonal da chuva e a não uniformidade da mesma sobre a região é um fator de extrema importância fazendo com que existam porções semiáridas na região (SIQUEIRA e NERY, 2021). A precipitação é a mais importante variável meteorológica apresentando grande dificuldade e complexidade em ser prognosticada ou medida com precisão (MOLION, 2002). O uso de modelos atmosféricos pode ser uma ferramenta poderosa para fazer o prognóstico temporal e espacial do regime de chuvas para uma região. O modelo WRF (*Weather Research and Forecast*) possui grande capacidade de simular processos meteorológicos utilizado não apenas na previsão temporal de precipitação pluviométrica, mas também para outras componentes atmosféricas, sendo que a qualidade de suas simulações depende do ajuste de alguns esquemas paramétricos que o modelo possui para gerar resultados próximos aos eventos observados (SANTOS, 2014).

Na cidade de Fortaleza, situada no estado do Ceará, a presença de eventos de chuva intensos pode causar uma série de transtornos urbanos, principalmente devido aos alagamentos, levando a população a perdas materiais e em alguns casos, até a ocorrência de perdas humanas (RODRIGUES, 2017).

Na climatologia, um evento de chuva é considerado intenso quando o total anual, sazonal ou diário desvia dos valores esperados para este intervalo de tempo, podendo estes

valores serem superiores ou inferiores, sendo necessária uma análise criteriosa de dados de pelo menos trinta anos para definir se o evento desvia da normal estatística (GONZÁLEZ *et al*. 2020). Sistemas como os vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN), distúrbios ondulatórios de leste (DOL), complexos convectivos de mesoescala (CCMs) e linhas de instabilidade são responsáveis por eventos de chuva intensos sobre o litoral nordeste brasileiro (BRASILEIRO, 2017), além do principal sistema causador de chuvas que é a ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) (DE LIMA, 2018). No dia 03 de janeiro de 2015, em Fortaleza-CE, houve o registro de um evento extremo de chuva que causou bastante transtorno na cidade (COUTINHO *et al*. 2017). Nestes termos, escolheu-se este evento para analisar a acurácia do modelo WRF em reproduzi-lo testando o ajuste de oito esquemas de parametrizações de microfísicas do modelo.

2. METODOLOGIA

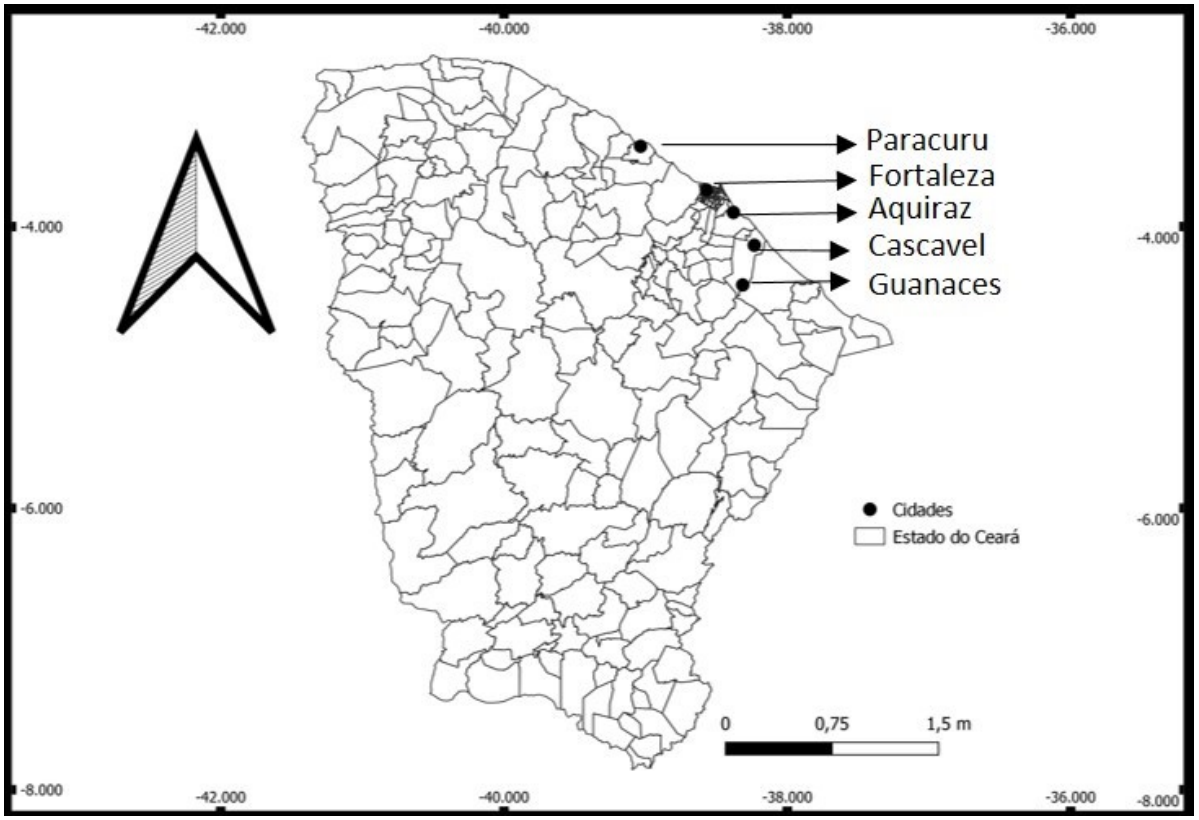
2.1. Caracterização e localização da área de estudo

A região de estudo para onde foram realizadas as simulações compreende o NEB e está localizada entre as latitudes 1°02'S a 18°20'S e longitude 34°47' W a 48°45' W. A cidade de Fortaleza fica localizada no estado do Ceará, local onde ocorreu o evento de chuva extremo. Para o teste de sensibilidade foram escolhidas quatro cidades litorâneas do estado do Ceará, além da cidade de Fortaleza, onde ocorreu o evento extremo de chuva, sendo elas: Paracuru, Aquiraz, Cascavel e Guanaces (Figura 1). As quatro cidades foram escolhidas devido haver plataforma de coleta de dados pluviométricos em cada uma delas. Os pluviômetros automáticos de cada cidade encontram-se instalados nas seguintes coordenadas: em Paracuru-CE, pluviômetro automático localizado na lat (-3.4302) lon (-39.0360), em Aquiraz-CE, na lat (-3.90) lon (-38.38), em Cascavel-CE na lat (-4.13) lon(-38.23), e em Guanaces-CE na lat (-4.14) lon (-38.32). Como cada cidade aqui mencionada possui somente uma plataforma de coleta de dados pluviométricos, mencionaremos apenas o nome das cidades para citar a estação.

Os dados das plataformas foram obtidos através do *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que registrou os valores de chuva do dia 03 de janeiro de 2015 para

cada um dos locais. Deste modo, foram calculados os dados de precipitação acumulada diária (entre 00 e 24 UTC, Coordenada de Tempo Universal).

Figura 1 - Mapa cartográfico do estado do Ceará, Brasil, com destaque para as cidades de Paracuru, Fortaleza, Aquiraz, Cascavel e Guanaces.



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Para estudos meteorológicos, utiliza-se a Coordenada de Tempo Universal (UTC), que obtém como referência o Meridiano de Greenwich (0° de longitude), equivalente ao horário local de Londres. Como a região de estudo compreende longitudes entre 38°W - 42°W, a hora local é de menos 03 UTC ou então menos 03 Zulu (Z), seguindo o horário local de Brasília (DF) (MUNHOZ, 2022).

A estação chuvosa para os municípios ocorre no primeiro semestre do ano com média mínima de 123 mm.mês^{-1} em janeiro a um máximo de 384 mm.mês^{-1} em abril. O período seco varia de um mínimo de 12.30 mm.mês-^{1} em novembro a um máximo de 72 mm.mês^{-1} em julho (MOURA *et al*. 2015).

2.2. Configuração das simulações

Para realizar as simulações foi utilizado o modelo de mesoescala conhecido como *Weather Research and Forecasting* (WRF) núcleo (ARW) versão 3.9.1. O WRF é um modelo regional, não hidrostático e compressível e foi desenvolvido com apoio de vários centros de pesquisa como o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) e o *National Center for Environmental Prediction* (NCEP/NOAA), (SKAMAROCK *et al*. 2008).

O procedimento de instalação segue os mesmos procedimentos listados em Metclim (2017). O domínio do modelo foi configurado cobrindo a região do NEB centrado em 9°S e longitude 13.10°W com resolução espacial de 30 km. Para as condições iniciais, foram utilizados dados de reanálise do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) com resolução de 1°x 1° para o dia 03 de janeiro de 2015, das 00 até 18 UTC (KANAMITSU *et al*. 2002). Os dados de reanálise possuem resolução temporal em escalas de 00, 06, 12 e 18 UTC. Contudo, o modelo permite que seja feita uma interpolação a cada 30 minutos. Foram usados 65 níveis verticais com o topo localizado a 1 hPa.

Os dados de topografia e de cobertura vegetal utilizados foram obtidos do *United States Geological Survey* (USGS). Estes dados de topografia são comumente utilizados para a previsão do tempo.

WRF possui um grande conjunto de parametrizações, geralmente várias para cada processo físico a modelar. Estas parametrizações vêm sendo investigadas na literatura (COMIN *et al*. 2021; EFSTATHIOU *et al*. 2013; MOYA-ÁLVAREZ *et al*. 2020; SCHWITALLA, BRANCH, & WULFMEYER, 2020) como importantes na acurácia da previsão de eventos de chuva intensos.

Foram simulados os dias do período de 03 a 04 de janeiro de 2015 das 00 às 18 UTC. Durante esses dias, as condições de contorno foram atualizadas a cada 6 h. As parametrizações foram selecionadas da seguinte forma (Tabela 1):

Tabela 1- Parametrizações microfísicas testadas nas simulações com o WRF3.9.1.

Tipos de parametrizações de microfísica							
WSM3 (3) (HONG *et al*. 2004)	Kessler (KESSLER,1969)	Lin (LIN *et al*. 1983)	WSM5 (CHEN and DUDHIA 2001)	Ferrier (FERRIER, 2002).	WSM6 (HONG and LIN 2006)	Goddard (TAO *et al*., 2009)	Thompson (THONPSON *et al.* 2004)

Foram mantidas as parametrizações utilizadas no trabalho publicado por de ALMEIDA *et al*.(2022) e foram testadas oito parametrizações de microfísica (Tabela 1) a fim de observar a sua interação com a parametrização publicada. No modelo WRF a microfísica resolve os processos explícitos que envolvem as interações e/ou mudanças de estado que ocorrem entre as massas de vapor d'água, chuva, neve, gelo, nuvens e granizo presentes nas regiões dos domínios do modelo (ALBUQUERQUE, 2014). Esta é resolvida no final do passo de tempo como um processo de ajustamento para garantir que o balanço final da saturação seja mais preciso para incrementar a temperatura e a umidade. Isto também é importante para ter a forçante do calor latente para a temperatura potencial durante os sub-passos dinâmicos e isto é feito através do acúmulo desse calor para o próximo passo do tempo (C. SKAMAROCK, *et al.* 2008).

As demais parametrizações mantidas para cada variação de microfísica foram: radiação de onda longa (RRTM, ra_lw_physics 1, HONG *et al*. 2004), radiação de onda curta (Dudhia, ra_sw_physics 1, DUDHIA, 2014), 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). A parametrização de cumulus utilizada foi a Convecção cúmulus (GRELL, 2014), e a camada limite planetária, YSU (bl_pbl_physics 1), Cobertura do solo Noah LSM (sf_surface_physics 2).

Todos os esquemas de microfísica de nuvem foram construídos para prever ou simplesmente simular os fluxos de água na atmosfera e suas transformações de fase para que ao final possa o modelo ser capaz de prever a precipitação. A simulação destes

fenômenos foi baseada na distinção de categorias das fases da água seja na forma líquida, vapor de água ou gelo (gotícula de nuvem, gotas de nuvem, garoa, gelo de nuvem, graupel etc.) e para os tipos de agregados e seus tamanhos (HERNÁNDEZ, 2016). Algumas parametrizações de microfísica incluem espécies de aerossóis (THOMPSON; EIDHAMMER, 2014).

Segundo PRABHA *et al*.(2011), a escolha do esquema de microfísica a usar em um modelo não é trivial, e ainda destacam que:

> [...] é difícil escolher entre os esquemas de microfísica. As vantagens e desvantagens relativas de cada um deles devem ser cuidadosamente avaliadas [...]. É crítico identificar com antecedência as falhas na representação de cada processo de microfísica e tentar melhorar um determinado algoritmo. Porém, alguns defeitos dos esquemas de microfísica são parte integral do desenho e portanto, altamente resistentes aperfeiçoamentos. (2015, p.253, HERNÁNDEZ, 2016).

Ter uma representação adequada da microfísica da precipitação é um dos grandes desafios da modelagem das nuvens para a previsão e estimativa de chuva. Atualmente, os modelos de nuvens podem ser separados em dois grupos com relação à representação da microfísica utilizada. O primeiro grupo utiliza parametrização de microfísica detalhada (ou bin) e o segundo grupo utiliza a parametrização de microfísica a granel (ou bulk) (MARTINS, 2014).

O primeiro grupo (bin) é baseado num esquema de microfísica detalhada/espectral (HALL, 1980; KOGAN *et al*. 1991). Neste grupo, os hidrometeoros são classificados por tamanho, as fontes e sumidouros de cada categoria (ou bin) estão ligados, não só ao surgimento ou desaparecimento de hidrometeoros, mas também à mudança no tamanho destas partículas. Por exemplo, em um modelo de microfísica detalhada para a fase líquida, a equação prognóstica para a função de distribuição envolve termos de nucleação, condensação/evaporação, coalescência, ruptura colisional, que ocorre quando duas gotas, ao colidirem, produzem uma distribuição de fragmentos e de ruptura espontânea, que consiste na quebra de uma gota de grandes dimensões, hidrodinamicamente instável, gerando um conjunto de gotas menores. Estes esquemas conseguem prever a distribuição de hidrometeoros por tamanho. No entanto, como cada categoria requer uma equação

prognóstica para ser resolvida, esta classe de esquemas costuma requerer muito tempo de computação, sendo raro seu uso em modelos de previsão (MARTINS, 2014).

O segundo grupo utiliza um esquema de microfísica tipo a granel/totalizada (ou bulk) (NOH e VONDER HARR, 2009) que se caracterizam por utilizar como variáveis prognósticas, um número limitado de propriedades globais dos hidrometeoros, em contraste com os modelos de microfísica detalhada. Em geral, estes são separados em classes como “conteúdo de água de nuvem” (gotículas menores do que um dado raio, cuja velocidade terminal pode ser considerada desprezível), "conteúdo de água de chuva" (gotas precipitantes) e diferentes classes de gelo, dependendo da complexidade do modelo (cristais, agregados e granizo). Se somente uma variável prognóstica for utilizada (geralmente, a razão de mistura), o esquema é dito de "um momento" (WALKO *et al.* 1995).

Neste caso, se o usuário especificar a concentração de hidrometeoros para aquela classe, o modelo diagnosticará o diâmetro médio correspondente e vice-versa. Para o caso em que, além da razão de mistura, outra variável (em geral, a concentração) é também prognosticada, deixando apenas o diâmetro médio a ser diagnosticado, o esquema é dito de "dois momentos" (MEYERS *et al*. 1997). Limitando-se à fase líquida, a partição da água se dá somente nas categorias de vapor d'água, água de nuvem e água de chuva, limitando o número de equações prognósticas a um total de três (um momento), cinco (dois momentos), o que é computacionalmente muito menos dispendioso do que as várias dezenas ou centenas de equações prognósticas dos esquemas detalhados.

O esquema WSM3 é um esquema simples, eficiente com gelo e neve. A parametrização de microfísica de Kessler (KESSLER, 1969) é um esquema simples de aquecimento de nuvem. Inclui os processos microfísicos de produção, queda e evaporação da chuva, acumulação e autoconversão da água de nuvem e água a partir da condensação. O esquema de microfísica de Lin (LIN *et al.* 1983) é um esquema que possui processos de gelo e neve, adequado para simulações de dados reais de alta resolução. Este esquema possui seis classes de hidrometeoros (vapor de água, água de nuvem, chuva, gelo de nuvem, neve e pelotas de gelo). O WSM5 é uma versão mais sofisticada de três classes. É um esquema microfísico de representação de vários tipos de precipitação, condensação e efeitos termodinâmicos de liberação de calor latente. Permite processos de fase mista e de água super-resfriada. Ele prediz cinco categorias de hidrometeoros: vapor d’água, vapor-nuvem,

nuvem-gelo, chuva neve (HONG *et al*. 2004). O esquema de Ferrier inclui processos prognósticos de fase mista. Este esquema foi alterado recentemente para que a saturação do gelo seja assumida em temperaturas mais frias que -30°C em vez de -10°C como na implementação original. Este esquema é bem testado para WRF-NMM, usado operacionalmente no NCEP. O esquema WSM6 é um novo esquema formulado para processos de gelo e neve adequado para simulações de alta resolução.

O GCE - *Goddard Cumulus Ensemble* é um modelo em resolução de nuvens multidimensional dinâmico/microfísico e não hidrostático. Realiza a reapresentação explícita de chuva "quente" e processos de microfísica de gelo com sua complexa interação com os processos de transferência radioativa infravermelha e solar, com os processos de superfície.

E por fim, o esquema Thompson proposto por THOMPSON *et al.(*2004), que possui processos de gelo, neve e graupel (neve precipitável na forma esférica, não em flocos) que são adequados para simulações de alta resolução.

2.3. Avaliação estatística

Os resultados do modelo foram comparados com dados de chuva de estações meteorológicas do INMET, distribuídas na cidade de Fortaleza e nas cidades litorâneas:

Paracuru, Aquiraz, Cascavel e Guanaces. Com o modelo calibrado, seguiu-se na etapa da validação para testar o desempenho do modelo em cada parametrização física escolhida. Para isso, utilizou-se indicadores estatísticos pela comparação da raíz do erro quadrático médio ou RMSE (WILLMOTT, 1981). O RMSE (sigla do inglês Root Mean Square Error) é definido como:

(1)

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(0_i - P_i)^2}{n}$$

O RMSE possui uma unidade igual a dimensão dos valores observados e preditos. Interpreta-se seu valor como uma medida do desvio médio entre o observado e predito, ou seja, se o modelo subestimou ou superestimou o volume de chuva através do valor da amplitude entre o observado e o simulado.

Também analisamos os valores do erro médio absoluto (MAE), sigla em inglês para *Mean Absolute Error*. O MAE possui dimensão igual a dimensão dos valores observados e

preditos. Seu valor apresenta o desvio médio entre o observado e predito. Comparando o RMSE e o MAE o primeiro dá um peso maior para desvios grandes (pois são elevados ao quadrado), enquanto o MAE dá um peso igual a todos os desvios (WILLMOTT, 1981):

(2)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |0_i - P_i|}{n}$$

3. Resultados e discussão

3.1. Precipitação observada do evento e dados pontuais observados

Investigou-se registros de precipitação acumulada diária para o dia 03 de janeiro de 2015 a partir dos dados do INMET. Os resultados observados em campo mostraram atividade convectiva intensa sobre o litoral da cidade de Fortaleza e áreas adjacentes como nos municípios de Paracuru, Aquiraz, Cascavel e Guanaces. As condições meteorológicas para o dia 03, segundo dados do INMET, coletados pela estação A305 de Fortaleza, mostraram um registro de chuva de ~35 mm. Segundo o INMET o sistema estava em formação desde as 4:30 local, tendo iniciado a chuva as 09 UTC (6 h local) até as 16 UTC (13 h local). Analisamos o acumulado de chuva para as 24 hrs do dia 03.

A Funceme (Fundação Cearence de Meteorologia) informou que o evento de chuva forte foi provocado pela combinação de dois sistemas atmosféricos: vórtice ciclônico de altos níveis (VCANs) típico da pré-estação chuvosa e o segundo sistema causador é conhecido como Ondas de Leste.

3.2. Análise sinótica

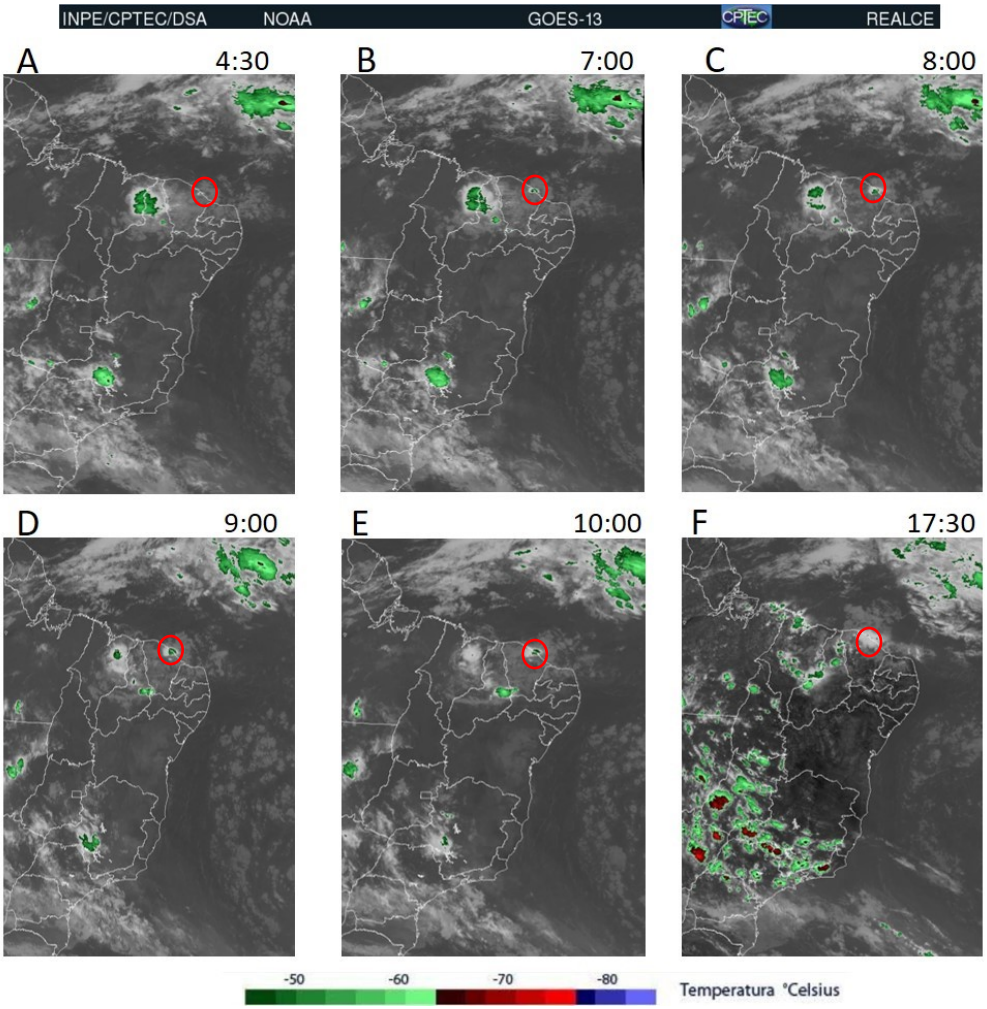
A nebulosidade associada ao evento foi analisada por meio das imagens no canal infravermelho realçado, obtidas da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE). A Figura 2 mostra uma sequência de imagens de satélite, obtidas do satélite GOES, canal 13 para temperatura de brilho, fornecidas pela divisão de satélites do CPTEC, para analisar a evolução do evento de chuva ocorrido.

Na Figura 2A observa-se o início da formação do sistema convectivo sobre o litoral do estado do Ceará (local destacado em vermelho) que se expandiu adentrando a região,

porém, mantendo-se nos municípios ao redor de Fortaleza. O sistema iniciou sua formação às 4:30 (horário local) se desenvolvendo ao longo do dia, tendo dissipado sobre Fortaleza no intervalo de 5:00 e 9:00, intervalo no qual foi observado o maior volume de chuva na cidade causando alagamentos em alguns bairros. Observa-se que na imagem da Figura 2F a dissipação do sistema sobre o litoral do Ceará, pois o topo da nuvem não apresenta temperaturas tão frias e o sistema começa a perder sua forma.

A chuva do dia 03 de janeiro de 2015 foi o resultado da ação do VCAN, que segundo KOUSY e GAN (1981); VAREJÃO-SILVA (2005) e COUTINHO (2010) é caraterizado como um sistema de baixa pressão devido uma circulação ciclônica fechada (vento no sentido horário), também chamdos de baixas frias, por apresentar seu centro mais frio que sua periferia, o qual possui subsidência de ar que inibe a formação de nuvens no seu centro, com formação de nuvens nas bordas. Na estação pré chuvosa, o VCAN pode causar chuvas torrenciais, ocorrendo em janeiro sobre o litoral do Ceará (RODRIGUES *et a*l. 2017). Este VCAN veio acompanhado por um segundo sistema (RODRIGUES *et al.* 2017) conhecido como DOL que geralmente atua nos meses de junho e julho causando intensificação da precipitação na parte leste da cidade de Fortaleza, região com maior número de ocorrências de eventos de chuva extremos. Segundo JUNIOR *et al.* (2020), os DOL "são ondas que se deslocam com os ventos alísios de leste para oeste". Ainda segundo a Funceme, o pico de chuva mais acentuado foi registrado no bairro Edson Queiroz, com 148 mm até o meio-dia, exatamente na região mais atingida da cidade.

Figura 2 -Imagens do satélite GOES no canal infravermelho (IR) realçado para o dia 03 de janeiro de 2015, horário local.



Fonte: GOES, canal 13.

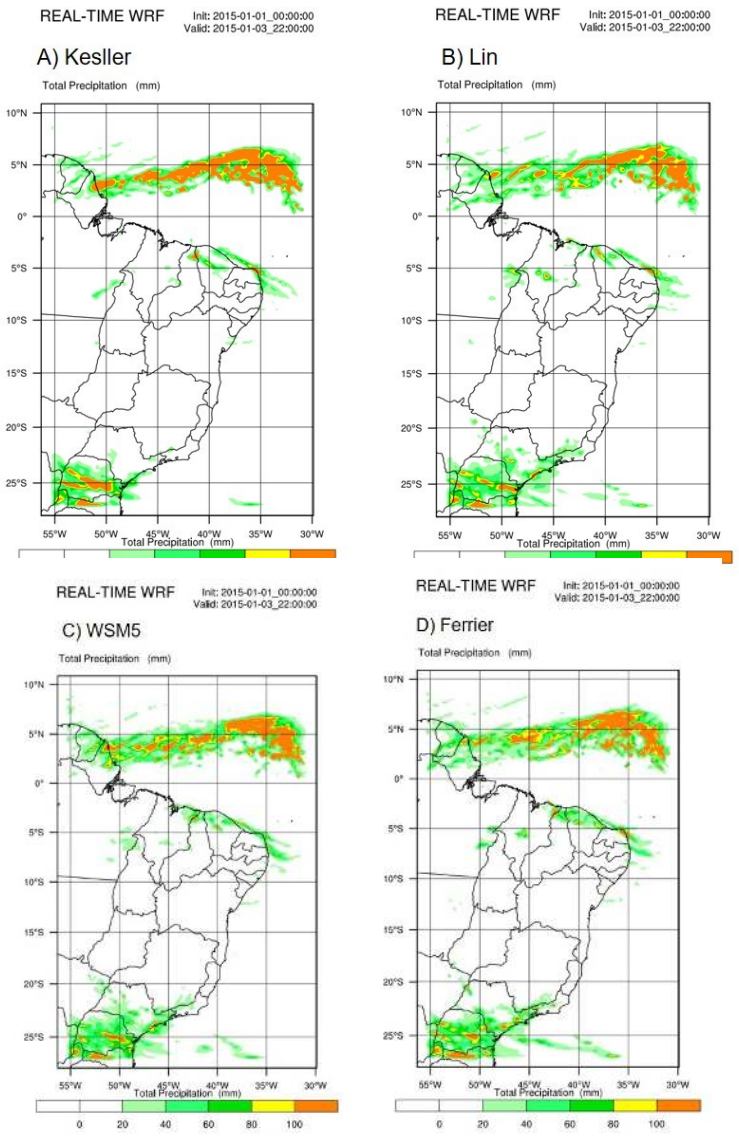
Segundo dados da FUNCEME, o VCAN estava em processo de formação desde o dia 31 de dezembro de 2014, dissipando em 3 de janeiro e sendo intensificado pelo DOL (Fonte: http://satelite.cptec.inpe.br/home/index.jsp?i=br).

3.3. Análise do modelo WRF

Os resultados das simulações numéricas utilizando o modelo WRF foram avaliados a partir dos dados de chuva. As simulações abaixo (Figura 3 e Figura 4) mostram os oito resultados das simulações de acordo com cada teste de parametrização física, para a precipitação acumulada de 00:00 UTC à 23:00 UTC (24 horas). Segundo a FUNCEME, o

evento de chuva do dia 03 durou cerca de 14 hrs, sendo mais intenso entre 9:00 e 12:00, horário local.

Figura 3 - Resultados do WRF para a precipitação acumulada do dia 03 de janeiro de 2015 para as parametrizações de Kessler, Lin, WSM5 e Ferrier.



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

O esquema de Kesller (Figura 3A) apresenta a condensação e a evaporação da nuvem de acordo com o nível de saturação, produção da chuva, tanto por auto conversão quanto por coleta de nuvem, sua evaporação e velocidade de queda (MARTINS, 2014). Este esquema de parametrização reproduziu evento de chuva sobra a cidade de Fortaleza, porém

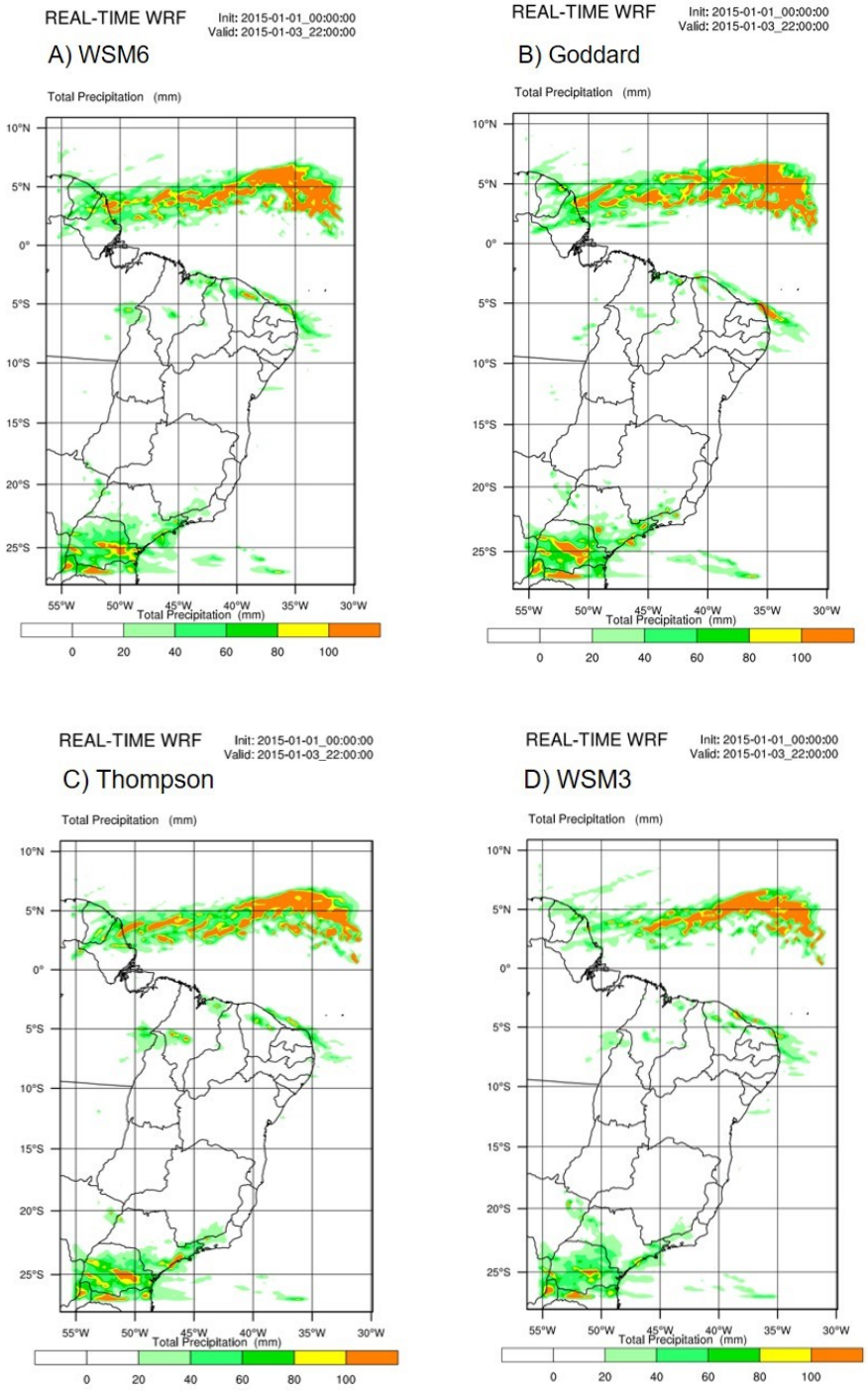
com precipitação bem abaixo do observado para Fortaleza (21 mm.dia^{-1}) e Aquiraz (10,33 mm.dia^{-1}). Para a cidade de Cascavel o modelo superestimou o valor de chuva (115,29 mm.dia^{-1}). A abordagem de Kessler para o cálculo da auto conversão calcula a taxa de conversão das gotas de nuvem e o produto de colisões entre elas para gotas de chuva. Este esquema considera somente três hidrometeoros como variável prognóstica: vapor de água, gotas de nuvem e água de chuva. A abordagem de Kessler para o cálculo da auto conversão calcula a taxa de conversão das gotas de nuvem e o produto de colisões entre elas para gotas de chuva. Este esquema considera somente três hidrometeoros como variável prognóstica: vapor de água, gotas de nuvem e água de chuva.

A Figura 3B mostra o resultado da simulação para o esquema de parametrização física Purdue Lin. Este esquema inclui a pressão não-hidrostática, que pode diminuir as velocidades verticais, ajuda a nuvem a se desenvolver mais cedo e ajuda a manter um período maduro mais longo, condições observadas no evento estudado. O esquema microfísico de Lin (Figura 3B) reproduziu evento de chuva muito abaixo do observado sobre a cidade de Fortaleza e para as demais cidades litorâneas (Tabela 2).

O esquema WSM5 (Figuras 3C) reproduziu evento de chuva sobra a cidade de Fortaleza, porém com precipitação abaixo do observado para Fortaleza (46 mm.dia^{-1}) e Aquiraz (44 mm.dia^{-1}). Para a cidade de Guanaces o modelo superestimou o valor de chuva (63,27 mm.dia^{-1}). No esquema de Ferrier (Figura 3D) sobre o município de de Paracuru, o modelo simulou chuva muito acima do observado (128,7 mm.dia^{-1}) e para as demais cidades litorâneas, o acumulado de chuva simulado manteve-se muito abaixo do observado.

Os esquemas WSM6, Goddard, Thompson e WSM3 (Figura 4A, B, C e D) conseguiram reproduzir o sistema de convecção sobre as cidades aqui analisadas. Porém, os valores de chuva para os municípios, simulados pelo modelo (Tabela 2) foram melhor representados pela microfísica de Thompson. O experimento com a microfísica de Thompson destacou-se dos demais, pois não só reproduziu o sistema de convecção atuante como reproduziu valores próximo ao observado para todas as localidades aqui estudadas (Tabela 2).

Figura 4 - Resultados do WRF para a precipitação acumulada do dia 03 de janeiro de 2015 para as parametrizações de WSM6, Goddard, Thompson e WSM3.



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Tabela 2- Valores de chuva total acumulada para o dia 03 de janeiro de 2015 e valores simulados pelo WRF para cada parametrização física.

Dia	Local	Obs.	WSM3	Kessler	Lin	WSM5	Ferrier	WSM6	Goddard	Thompson
03	Paracuru	66,6	109,32	25,45	34,9	63,07	128,7	83,77	3,04	110,02
	Fortaleza	100	22,27	21	43,4	46,73	48,05	22,15	6	77,14
	Cascavel	90	46,71	115,29	6,23	80,68	1,41	67,49	7,3	74,23
	Guanaces	42	29,58	39,70	18,93	63,97	5,46	33,89	2,61	25,69
	Aquiraz	120	23	10,33	53,73	44	52,31	23	5,74	80

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Os valores de RMSE e MAE foram utilizados para indicar a amplitude entre observado e simulado, ou seja, se o modelo subestimou ou superestimou o volume de chuva. A partir da análise da Tabela 3 percebe-se que a parametrização física de Thompson teve melhor desempenho. O valor de RMSE, como já mencionado em 2.3, indica a diferença entre o valor previsto e o real e, devido ser elevado a segunda potência, o RMSE é mais sensível que o MAE em relação aos erros grandes, senso sempre maior ou igual ao MAE (EUMETCAL, 2015). O resultado para Thompson foi de 21,54 (RMSE), maior que o valor de MAE que mostrou que a diferença média absoluta entre o valor observado e o valor predito foi de 18,49. O menor valor de MAE indica um melhor ajuste do modelo, e o acerto da previsão é maior quanto menor o valor de MAE (HALLAK e PEREIRA FILHO, 2011).

A parametrização de Thompson incorpora muitas melhorias para os processos físicos e sua codificação e foi desenvolvida visando melhorar as previsões de intensidade da precipitação, melhorar as previsões de fases da água na superfície e no ar, incorporar as observações microfísicas recentes de vários projetos, cumprir os requisitos de tempo real de modelagem (FERREIRA, 2020).

Tabela 3- Resultados estatísticos de RMSE (raíz do erro quadrático médio) e MAE (erro médio absoluto).

Dia	Estatística	WSM3	Kessler	Lin	WSM5	Ferrer	WSM6	Goddard	Thompson
03	RMSE	62,13	64,19	56,8	42,88	63,7	57,16	83,09	21,54
	MAE	54,63	51,48	52,2	32,81	61,3	44,52	78,7	18,49

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

As parametrizações físicas testadas no modelo foram capazes de reproduzir o sistema de convecção que atuou sobre a cidade de Fortaleza e municípios circunvizinhos. A diferença entre os prognósticos, está na conversão da água a partir do estado gasoso para sólido e líquido na nuvem. A simulação realizada com o WRF usando a microfísica de Lin muito abaixo do observado sobre a cidade de Fortaleza e para as demais cidades litorâneas.

As simulações realizadas indicaram que o modelo tende a reproduzir a precipitação abaixo do observado. Ainda se destacou que a precipitação é gerada apenas explicitamente pelo processo de microfísica, ou seja, sem o uso da parametrização convectiva.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As parametrizações físicas testadas mostraram a posição do sistema precipitante similar ao observado pelas imagens do GOES, porém o volume de precipitação foi diferente entre as oito simulações.

A simulação realizada com o WRF usando a microfísica de Thomspon produziu a quantidade de chuva próximo ao observado no evento, principalmente nos núcleos convectivos. O valor de RMSE para Thompson foi de 21,54. O valor de MAE para Thompson mostrou que a diferença média absoluta entre o valor observado e o valor predito foi de 18,49. A simulação realizada com o WRF usando a microfísica de Thompson obteve uma melhor representação da precipitação. Para simulações futuras, sugerimos utilizar a microfísica de Thompson, alterando as parametrizações de cumulus.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo financiamento que tornou esta pesquisa possível. O autor P.S. agradece a CAPES pelo apoio através da bolsa PVNS e o CNPq pelo apoio através da bolsa de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, T.; SANTOS, J.; Reis Jr, N. C.; Pimentel, L. C. G.; & MOREIRA, D. 2014. **Avaliação das parametrizações físicas do modelo WRF para a camada limite atmosférica para a região Metropolitana da Grande Vitória**.

BRASILEIRO, F. M. G.; BARBOSA, L. N.; ZANELLA, M. E. 2017. **Análise comparativa dos eventos pluviométricos intensos em FORTALEZA/CE e SÃO LUÍS/MA no período de 1987 A 2017**. Disponível em: https://revistastestes.uece.br/index.php/GeoUECE/article/view/2011. Acesso em: 28 de out. 2022.

CHEN, F. & DUDHIA, J. 2001. Coupling an advanced land surfacehydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. **Monthly Weather Review**, 129: 569-585.

COMIN, A. N., JUSTINO, F., PEZZI, L., GURJÃO, C. D. D. S., SHUMACHER, V., FERNÁNDEZ, A., & SUTIL, U. A. (2020). Extreme rainfall event in the Northeast coast of Brazil: a numerical sensitivity study. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 1-22.

COUTINHO, M. D. L.; da SILVA COSTA, M.; dos SANTOS GOMES, A. C.; de MORAIS, M. D. C.; JACINTO, L. V.; LIMA, K. C.; & SAKAMOTO, M. S. 2017. Estudo de Caso: Evento Meteorológico no Nordeste do Brasil entre os Dias 03 e 04 de Janeiro de 2015. **Revista Brasileira de Climatologia**, 20.

COUTINHO, M. D. L.; GAN, M. A.; RAO, V. B. 2010.Método objetivo de identificação dos vórtices ciclônicos de altos níveis na região tropical sul: Validação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, 311-323.

C. SKAMAROCK, W. *et al*. 2008. **A Description of the Advanced Research WRF Version 3**, s.l.: s.n.

CORREIA FILHO, W. L. F., *et al*. 2019. Rainfall variability in the Brazilian northeast biomes and their interactions with meteorological systems and ENSO via CHELSA product. **Big Earth Data**, 3(4), 315– 337.https://doi.org/10.1080/20964471.2019.16 92298. Acesso: 18 ago. 2022.

DE LIMA, JOÃO, S. Q.; DE OLIVEIRA, S.; JADER, ZANELLA, M. E. 2018. Impactos das chuvas na cidade de Fortaleza no triênio 2013, 2014 e 2015. **Territorium**, n. 25, p. 5-22. Disponível em: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6229239. Acesso em: 28 de out. 2022.

de ALMEIDA DANTAS, V.; FILHO; V. D. P. S.; & VIEIRA, L. S. 2022. Estudo avaliativo da parametrização cúmulos do Modelo WRF 4.0 para um caso de precipitação extrema ocorrido em Fortaleza Ce, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física,** 15(02), 817-826.

DUDHIA, J.; HONG, S.-Y.; LIM, K.-S. 2008 A new method for representing mixed-phase particle fall speeds in bulk microphysics parameterizations**. J. Meteorol. Soc. Japan**. 86A, 33–44.

DUDHIA, J. 2014. **Overview of WRF physics. University Corporation for Atmospheric Research, Boulder, CO**. Disponivel em http://www2. mmm. ucar. edu/wrf/users/tutorial/201401/Physics_full.pdf. Acesso em: 15 de abr. 2022.

EUMETCAL. 2015. **The European Virtual Organisation for Meteorological Training**. Disponivel em: http://www.eumetcal.org/ . Acesso em 16 de abril de 2022.

EFSTATHIOU, G. A., ZOUMAKIS, N. M., MELAS, D., LOLIS, C. J., & KASSOMENOS, P. (2013). Sensitivity of WRF to boundary layer parameterizations in simulating a heavy rainfall event using different microphysical schemes. Effect on large-scale processes. **Atmospheric research**, 132, 125-143.

FERREIRA, RUTE COSTA *et al*. 2020. Impacto das Parametrizações de Microfísica na Previsão de Precipitação utilizando Assimilação de Dados de Radar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 123-134.

FERRIER, B. S.; JIN, Y.; LIN, Y.; BLACK, T.; ROGERS, E.; and DIMEGO, G. 2002. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model, Preprints, 15th Conf. On Numerical Weather Prediction, San Antonio, TX, Amer. **Meteor. Soc**., 280–283.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E. 1986. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 1, p. 19-28.

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.

GONZÁLEZ, G.; DAVID. I. 2020. **Clima organizacional y desempeño laboral de los servidores públicos del Servicio de Rentas Internas** (Master's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencias Administrativas. Maestría en Administración Pública.).

GOMES, R. C.; ZANELLA, M. E.; OLIVEIRA, V. P. V. de. 2005. IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE RISCOS RELACIONADAS AOS EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS EXTREMOS NA ZONA URBANA DE INDEPENDÊNCIA-CE. REDE - **Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 15, n. 2, p. 178-198, maio 2022. ISSN 1982-5528. Disponível em: http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/728. Acesso em: 14 ago. 2022.

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.

HALL, W. A. 1980. Detailed microphysical model within a two-dimensional framework: Model description and preliminary results. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 37, p. 2486-2507.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, J. 2011. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: Sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.4, 591 – 608, 2011.

HÄNSEL, S., *et al*. 2016. Assessing Homogeneity and Climate Variability of Temperature and Precipitation Series in the Capitals of North-Eastern Brazil. **Frontiers in Earth Science**, 4(March), 1–21. https://doi.org/10.3389/feart.2016.00029. Acesso: 20 jul. 2022.

HASTENRATH, S., 2012. Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: **A review. Climatic Change**, 112(2), 243–251. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0227-1.

HERNÁNDEZ, L. 2016. Esquema de microfísica de nuvens do modelo Eta: diagnóstico e testes de sensibilidade (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo).

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.

HONG, S.-Y.; AND J. O. J. LIM. 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6**). J. Korean Meteor. Soc.,** 42, 129–151.

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**, v. 132, p. 103-120.

IDALINO, FILIPE DAROS *et al*. 2020. Variabilidade de precipitação e temperatura média superficial do ar no norte da região de Aisén, Chile, no período de 1950-2017. Revista GeoUECE. Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual do Ceará, 2020. Vol. 9, **Unesp. 2 (2020),** p. 6-2.

JUNIOR, AUDIVAN RIBEIRO GARCES *et al*. 2020. Análise comparativa dos eventos pluviométricos intensos em Fortaleza/CE e São Luís/MA no período de 1987 a 2017. **Revista GeoUECE**, v. 9, n. 17, p. 70-86.

JIMENEZ, P.A.; DUDHIA, J.; GONZALEZ-ROUCO, J.F.; NAVARRO, J.; MONTALVEZ, J.P.; GARCIABUSTAMANTE, 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.

KESSLER, E. 1969: On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulation. Meteor. Monogr., No. 32, **Amer. Meteor. Soc.,** 84 pp.

KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLLEN, J.; YANG, S.-K.; HNILO, J. J.; FIORINO, M.; POTTER, G. L. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2).2002. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 11, p. 1631–1643.

KOUSKY, V. E.; GAN, M.A. 1981. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical south Atlantic, Tellus, 33, 538-551.

KOGAN, Y. L. 1991. The simulation of a convective cloud in a 3-D model with explicit microphysics: Part I. Model description and sensitivity experiments. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 48, p. 1160-1189.

LIN, Y. L.; FARLEY, R. D.; ORVILLE, H. D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. **Journal of Climate Appl. Meteorol**., v. 22, p. 1065-1092.

MEYERS, M.P.; R. L. WALKO, J.Y.; HARRINGTON, W.R. Cotton. 1997. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme. **Atmospheric Research**, v. 45, p. 3-39.

MARTINS, R. C. G. 2014. Estudo da sensibilidade do modelo WRF às parametrizações de microfísica de nuvens e à assimilação de dados observados. Disponível em: http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/1466. Acesso em: 10 de abr. 2022.

MOURA, Í. J.M.; SANTOS, D.F. DOS; PINHEIRO, F. G. DE M.; OLIVEIRA, C. J. de. 2015. CHARACTERIZATION OF DRY AND WET PERIODS OF FORTALEZA CITY (CE). **Ciência e Natura**, [S. l.], v. 37, p. 3–7.

Moya-Álvarez, A. S., ESTEVAN, R., KUMAR, S., ROJAS, J. L. F., TICSE, J. J., MARTÍNEZ-CASTRO, D., & SILVA, Y. (2020). Influence of PBL parameterization schemes in WRF_ARW model on short-range precipitation's forecasts in the complex orography of Peruvian Central Andes. **Atmospheric Research**, 233-233.

MUNHOZ, J. C. 2022. Padrões sinóticos associados a casos extremos de precipitação no Estado de São Paulo. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/handle/11449/234984. Acesso em: 27 out. 2022.

METCLIM, 2017. WRF installation on a Linux machine. Disponível em: https://metclim.ucd.ie/2017/06/wrf-installation-on-a-linux-machine/. Acesso em: 14 de abr. 2022.

MOLION, L.C.B.; BERNARDO, S.O. 2002.UMA REVISÃO DA DINÂMICA DAS CHUVAS NO NORDESTE BRASILEIRO. **Revista Brasileira de Meteorologia**, RIO DE JANEIRO (RJ), v. 17, n. 1, p. 1-10.

MOLLMANN JUNIOR. 2016. Análise da sensibilidade das Parametrizações no modelo WRF para o Estado do Rio Grande do Sul durante o Inverno de 2014. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.09, n.02 (2016) 368-383.

NOH, Y. J.; HAAR, T. H. V. 2009. Comparison and validation of WRF-ARW cloud microphysics schemes during C3VP/CLEX-10 field experiment. **Cooperative Institute for Research in the Atmosphere and Department of Atmospheric Science**, Colorado, p.1-5, Jun.

PRABHA, T. V.; KHAIN, A.; MAHESHKUMAR, R.; PANDITHURAI, G.; KULKARNI, J.; KONWAR, M.; GOSWAMI, B. 2011. Microphysics of premonso on and monsoon clouds as seen from in situ measurements during the cloud aerosol interaction and precipitation enhancement experiment (caipeex). **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 68, n. 9, p. 1882–1901, 20.

SCHWITALLA, T., BRANCH, O., & WULFMEYER, V. (2020). Sensitivity study of the planetary boundary layer and micro- physical schemes to the initialization of convection over the Arabian Peninsula. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 146(727), 846-869.

RAO, V. B., LIMA, M. C., E FRANCHITO, S. H. 1993. Seasonal and Interannual Variations of Rainfall over Eastern Northeast Brazil. **Journal of Climate**, 6(9), 1754–1763. https://doi.org/10.1175/1520- 0442(1993)0062.0.CO2. Acesso: 26 ago. 2022.

RODRIGUES, I.B.; HOLANDA, J. M.; GONÇALVES, D. S.; SALES, M. C. L. 2017. Análise dos eventos de chuva extrema e seus impactos em Fortaleza-CE, de 2004 a janeiro de2015. **Revista de Geografia (Recife)** V. 34, No. 2.

SANTOS, A.G.; CAMPOS, J.N.B.; SILVA, J., 2014. ANÁLISE DA PREVISÃO PLUVIOMÉTRICA A CURTÍSSIMO PRAZO NA BACIA HIDROLÓGICA DO RIO PARAÍBA DO MEIO UTILIZANDO O MODELO WRF. **Revista brasileira de climatologia**. ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica).

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J. et al. 2008. NCAR Technical Note: A description of the Advanced Research WRF version 3, 113 p[S.l: s.n.].

SIQUEIRA, B. & NERY, J. 2021. Concentração diária e mensal da precipitação pluvial no nordeste do Brasil: uma contribuição dos índices CI e PCI daily and monthly concentration of rain precipitation in northeast Brazil: a contribution from ci and pci indexes concentration quotidienne et mensuelle des précipitations de pluie dans le nordest du Brésil: une contribution des indices CI et PCI. **Revista Geografar**. 16. 555-570.

TAO, W.-K. and MONCRIEFF, M.: Multi-scale cloud-system modeling, **Rev. Geophys**., in press, doi:10.1029/2008RG000276, 2009.

THOMPSON, G.; EIDHAMMER, T. 2014. A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 71, n. 10, p. 3636–3658.

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 NOAH land surface model in the WRF. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, p. 11-15.

THOMPSON, G.; RASMUSSEN, R.M.; MANNING, K. 2004. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. **Monthly Weather Review**, v. 132, p. 519-542.

UVO, C.; AND RONNY B.1996. "Regionalization and spatial properties of Ceará State rainfall in Northeast Brazil." **Journal of Geophysical Research: Atmospheres** 101.D2: 4221-4233.

VAREJÃO-SILVA, M. A. 2005. **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital 1. In: Perturbações Atmosféricas. Recife.

WALKO, R. L.; WILLIAM R. C.; HARRINGTON, J. Y; MICHAEL P. M. 1995. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part I: The single-moment scheme. **Atmospheric Research**, v. 38, p. 29-62.

WILLMOTT, C. J. 1981. On the validation of models. **Physical geography,** v. 2, n. 2, p. 184-194.