







Artigo

Distúrbios Ondulatórios de Leste no Nordeste Brasileiro: Um Estudo de Caso Utilizando Modelagem Numérica de Mesoescala

Alex Soares da Silva^{1,4} , Emerson Marino da Silva^{3,4} , João Bosco Verçosa Leal Junior⁴ ,
Domingo Cassain Sales² , Icaro Jael Mendonça Moura⁴ , José Maria Brabo Alves^{3,4} 

¹*Secretaria da Educação, Fortaleza, Ceará, Brasil.*

²*Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, Ceará, Brasil.*

³*Mestrado Profissional em Climatologia e Aplicações nos Países da CPLP e África, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*

⁴*Mestrado Acadêmico em Ciências Física Aplicadas, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, Ceará.*

Recebido em: 10 de Abril de 2021 - Aceito em: 17 de Junho de 2021

Resumo

Os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) são um dos principais sistemas meteorológicos que atuam no leste do Nordeste do Brasil (NEB) entre maio e julho. O presente estudo tem como objetivo investigar os impactos das diferentes técnicas de *nudging* na simulação de DOLs utilizando o modelo regional *Weather Research and Forecasting* (WRF) a partir de três diferentes tipos de simulação, alternando entre elas diversas possibilidades do uso desta técnica: (1) utilizando o *nudging* de forma desligada (WRF-DF), (2) usando a técnica *Analysis Nudging* (WRF-AN), e (3) usando a técnica *Spectral Nudging* (WRF-SN). As variáveis analisadas foram a precipitação e o vento de dois episódios de DOLs que atingiram o NEB entre os dias 12 e 14 de junho de 2019. Os resultados foram comparados à reanálise do ERA-Interim e imagens dos satélites GOES 16 e METEOSAT 10. De acordo com os resultados, a simulação WRF-SN representou melhor a terceira e quarta onda dos eventos estudados, enquanto a simulação WRF-AN descreveu melhor a distribuição espaço-temporal da precipitação. A simulação WRF-DF apresentou resultados similares aos da WRF-SN. Isso indica que a utilização da técnica *Spectral Nudging*, apenas acima da camada limite planetária (CLP), não influencia de maneira expressiva o comportamento dos ventos ou o número de onda escolhido não é adequado para estudar os DOLs. Já a simulação WRF-AN apresentou resultados semelhantes ao da reanálise do ERA-Interim, podendo estar relacionado ao coeficiente de *nudging* escolhido.

Palavras-chave: DOL, WRF, Precipitação.

East Waving Disturbances in Northeast Brazil: A Case Study Using Numerical Modeling of the Mesoscale

Abstract

From May to June, the Easterly Wave Disturbances (EWD) are one of the main meteorological systems that affect the easternmost of Northeast Brazil (NEB). In this work, the Weather Research and Forecasting (WRF) regional model was used with alternating nudging settings to probe their influence on the simulations of EWDs. The simulations were performed in three kinds: (1) without nudging (WRF-DF), (2) using analysis nudging (WRF-AN), and Spectral-Nudging (WRF-SN). In this context, precipitation and wind data from EWD episodes that passed by the NEB between the 12th and the 14th of June 2019 were studied. The results were compared with ERA-Interim reanalysis and GOES 16 and METEOSAT 10 satellite data. The analysis shows that simulations without nudging better predicted the EWD events' third and fourth waves while WRF-AN simulations better described the spatio-temporal distribution of precipitation. WRF-DF and WRF-SN's results simulations showed little difference. This shows that using the Spectral Nudging technique just above the PBL does not expressively influence the behavior of the winds, or the chosen wave number is not suitable to represent EWDs. ERA-Interim reanalysis and WRF-AN simulations showed similar results. This may be related to the chosen nudging coefficient.

Keywords: EWD, WRF, precipitation.

1. Introdução

O Nordeste Brasileiro (NEB) apresenta alta variabilidade na distribuição espacial e temporal da precipitação. A faixa litorânea é caracterizada por altos valores anuais de chuva (em torno de 2000 mm), enquanto outras sub-regiões, incluindo a conhecida como “polígono da seca”, que ocupa aproximadamente 80% da área total do NEB, climatologicamente, não ultrapassam 600 mm (Gomes *et al.*, 2019). Tais variações estão relacionadas aos diversos sistemas atmosféricos que atuam nessa região.

No setor leste do NEB, o regime de chuva é fortemente influenciado pelos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) (Kouadio *et al.*, 2010), que se propagam para oeste sobre o Atlântico Sul durante todo o ano, principalmente nas estações de outono e inverno austral (Gomes *et al.*, 2015). Entretanto, quando as condições oceânicas e atmosféricas estão favoráveis, também provocam chuvas no setor norte do NEB (Ferreira e Melo, 2005).

Os DOLs são caracterizados como distúrbios ondulatórios nos campos de vento e pressão da atmosfera e são frequentemente detectados entre os níveis de 850 e 700 hPa (Machado *et al.*, 2009). Essas perturbações transportam grandes quantidades de umidade para a costa leste e norte do NEB, resultando no aumento da precipitação (Gomes *et al.*, 2015). Diversos eventos de chuva intensa associada aos DOLs foram estudados (Santos *et al.*, 2012; Machado *et al.*, 2012; Alves *et al.*, 2013; Neves *et al.*, 2016; Comin *et al.*, 2020).

Riehl é considerado um dos precursores no estudo dos DOLs e foi o criador do primeiro modelo clássico que forneceu uma descrição tridimensional destes distúrbios sobre as regiões do Caribe, do Golfo do México e da América Central (Riehl, 1954). Por outro lado, Hall (1989) descreveu a estrutura vertical e horizontal dos DOLs no Hemisfério Sul. Ele observou que a componente meridional do vento apresentava valores positivos (de sul para norte) antes do eixo da onda, que se tornava negativo (de norte para sul) após a passagem da mesma e que a inclinação desse eixo apresentava a mesma direção de propagação dos DOLs, ou seja, para oeste. Além disso, o autor notou que a maior atividade convectiva ocorre sobre o eixo da onda.

Esses sistemas são geralmente observados através de imagens de satélite e são identificados por aglomerados de nuvens de baixo desenvolvimento vertical que, avançando a partir do leste do Atlântico Sul, podem ficar mais intensos ao chegar ao leste do NEB, onde podem gerar nuvens com maior desenvolvimento vertical (Molion e Bernardo, 2002).

Gomes *et al.* (2019) mostraram que a frequência anual desses eventos está associada aos eventos de El Niño e La Niña, sendo mais (menos) frequentes durante o período de La Niña (El Niño), o que concorda com os resultados de Coutinho e Fisch (2007). Além disso, esses

autores confirmam que o período chuvoso do NEB está fortemente correlacionado aos DOLs, já que estes acontecem com maior frequência durante esse período. Ademais, os autores apontam que os DOLs são gerados principalmente em associação a episódios de frentes frias formadas entre os meses de abril e agosto.

Quanto à estrutura dos DOLs, Coutinho e Fisch (2007) apontam que estes distúrbios apresentam quatro regiões: uma crista de “bom tempo” com movimento subsidente e pouca nebulosidade; uma região próxima ao eixo do cavado onde ocorre uma maior formação de nuvens e esparsa precipitação; uma região no eixo do cavado com intensa precipitação; e a região final, mais a leste, com precipitação variando de moderada a forte.

Devido à importância dos DOLs para o regime de chuva do NEB, um melhor diagnóstico desses sistemas (envolvendo as características físicas, como deslocamento do cavado e abrangência e intensidade da chuva) são essenciais para minimizar os possíveis prejuízos sociais e econômicos causados por estes eventos, haja visto que eles podem provocar grande volume de precipitação concentrado em poucos dias. Para tanto, diversas ferramentas são comumente utilizadas, dentre essas, os Modelos de Circulação Regional (MCR) têm se destacado devido, geralmente, ao detalhamento dos resultados obtidos e o baixo custo operacional, comparado aos Modelos de Circulação Global (MCG).

No entanto, os resultados dos MCRs são influenciados pelas condições de contorno, quaisquer erros presentes nesses dados serão propagados para os MCRs (Wu *et al.*, 2005). Vukicevic e Errico (1990) demonstraram que as condições de contorno desempenham um papel mais importante do que as condições iniciais, a resolução do modelo e as parametrizações físicas. Por outro lado, estudos mostraram a necessidade de ajustar as variáveis simuladas pelos MCRs em direção aos campos dos MCGs como um meio de reduzir os desvios da circulação atmosférica em larga escala (Alexandru *et al.*, 2007; Lo *et al.*, 2008; Bullock *et al.*, 2014). Essa técnica de ajuste é denominada de *nudging*.

Diversos estudos de sensibilidade de parametrizações físicas utilizando o modelo regional *Weather Research and Forecasting* (WRF) foram realizados no Brasil (Dantas, 2019; Mollmann Junior *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2016; Macedo *et al.*, 2014; Almeida e Marton, 2014; Santos e Nascimento, 2013; Oliveira *et al.*, 2013), inclusive para eventos de precipitação extrema causadas por DOLs no NEB (Comin *et al.*, 2020). Entretanto, não foram encontrados até o momento estudos que investigassem os impactos das técnicas de *nudging* nas simulações de eventos de DOLs no NEB.

Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo investigar os impactos das diferentes técnicas de *nudging* na simulação de DOLs utilizando o modelo regional WRF. Para tanto, foram investigados os DOLs que atingiram o

NEB entre os dias 12 e 14 de junho de 2019, utilizando as diversas possibilidades de técnicas de *nudging* presente no modelo: *nudging* desativado, *analysis nudging* e *spectral nudging*. As análises foram realizadas a partir dos campos de precipitação e do vento meridional e zonal (nos níveis de 700 hPa e 800 hPa) sobre as cidades de Fortaleza e João Pessoa.

2. Material e Métodos

2.1. Configuração das simulações

O domínio do modelo regional WRF foi configurado como um canal tropical, ou seja, o modelo cobriu toda a região tropical desde a latitude de 45° N até 45° S. A projeção mercator foi utilizada e o centro do domínio está localizado no ponto 0° N e 0° E. A grade foi construída com 801 pontos na direção Leste-Oeste, 227 pontos na direção Norte-Sul e espaçamento horizontal de 50,030 km. Foram usados 65 níveis verticais com o topo localizado a 1 hPa. As zonas de *buffer* laterais foram dispostas em 10 pontos de grade ao longo das bordas do domínio.

Considerou-se vantajoso o uso de uma zona de simulação contínua na direção meridional (canal tropical), pois assim evita-se a geração de efeitos artificialmente introduzidos pelos contornos (principalmente se a resolução dos dados de entrada forem baixos) (Ray *et al.*, 2012). Ademais, torna-se possível a observação completa da evolução dos DOLs estudados.

Foram simulados os dias do período de 10 de junho de 2019, 00:00 UTC, a 16 de junho de 2019, 00:00 UTC. Durante esses dias, as condições de contorno foram atualizadas a cada 6 h. O conjunto de dados de reanálise empregado como condição de contorno foi o ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011), do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

Neste estudo, três experimentos foram conduzidos para investigar o desempenho do *nudging* no *downscaling* dinâmico: uma com *nudging* desativado e as outras duas com *nudging* ativado em duas variantes: *analysis nudging* e *spectral nudging*. As demais configurações (domínio e parametrizações físicas) são mantidas para todas as simulações.

A técnica *analysis nudging* foi aplicada na temperatura potencial e na razão de mistura do vapor d'água acima da Camada Limite Planetária (CLP), bem como nas componentes horizontais do vento em todas as altitudes. Já o *spectral nudging* foi aplicado nas componentes horizontais do vento, temperatura potencial e altura geopotencial acima da CLP. Nos experimentos utilizando a técnica *spectral nudging*, o número de onda nas direções zonal e meridional foi definido como 3. Os coeficientes de *nudging* para todas as variáveis e experimentos foi de $0,0003 \text{ s}^{-1}$. O *nudging* foi aplicado durante toda a simulação.

As parametrizações físicas foram selecionadas da seguinte forma: esquema de microfísica *WRF Single-moment 6-class Scheme* (Hong e Lim, 2006); esquema convectivo *Kain-Fritsch Scheme* (Kain, 2004); radiação de ondas longas e de ondas curtas *RRTMG Shortwave and Longwave Schemes* (Iacono *et al.*, 2008); modelo de superfície terrestre *Unified Noah Land Surface Model* (Tewari *et al.*, 2004); modelo de camada de superfície *Revised MM5 Scheme* (Jimenez *et al.*, 2012) e camada limite planetária *Yonsei University Scheme* (Hong *et al.*, 2006).

2.2. Análise das simulações

Durante o período de 10 a 16 de junho de 2019, o NEB foi atingido por quatro eventos de DOLs. Nesse estudo, foram analisados os eventos que ocorreram entre os dias 12 e 14 de junho devido ao grande volume de chuva observado. Para isto, utilizou-se imagens dos satélites GOES 16 e METEOSAT 10, a componente meridional e zonal do vento, a vortacidade relativa e a precipitação diária.

Inicialmente, visando acompanhar o deslocamento da nebulosidade associada aos DOLs que atingiram o NEB no período estudado, foi utilizada a composição dos canais infravermelhos dos satélites GOES 16 e do METEOSAT 10 com temperatura do topo das nuvens em °C. As imagens foram recortadas e organizadas com intervalo de 3 h, com exceção do horário 06:00 que não estava disponível no período estudado. Estas imagens foram fornecidas pela Seção de Produtos de Imagens de Satélite (SEPIS), pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A componente meridional do vento foi analisada através do diagrama Hovmöller (longitude x tempo) no nível de 700 hPa e 800 hPa com o objetivo de identificar o deslocamento dos cavados para oeste. Ao todo, duas latitudes foram escolhidas para construir este diagrama: 3,8157° S (cruzando a cidade de Fortaleza - CE) e 7,1654° S (cruzando a cidade de João Pessoa - PB). Essas cidades foram escolhidas por serem litorâneas e estarem localizadas na região norte (Fortaleza) e leste (João Pessoa) do NEB, que são as regiões mais atingidas por esses fenômenos. As latitudes foram determinadas através das Plataformas de Coleta de Dados (PCD) localizadas na região litorânea das respectivas cidades. As longitudes das PCDs são: 38,5377° W (Fortaleza) e 34,8156° W (João Pessoa). Os dados das PCDs foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A Vortacidade Relativa (VR), determinada de acordo com Bluestein (1992), e os ventos meridional e zonal foram estudados conjunta e qualitativamente com intuito de determinar a localização do cavado e a rotação de uma parcela do fluido atmosférico, caracterizando assim um sistema de circulação ciclônica ou anticiclônica. Em lati-

tudes médias, a magnitude da VR possui a ordem de 10^{-5} s^{-1} . Por esse motivo, todos os resultados de VR foram multiplicados por 10^5 . Os resultados são representados a cada 24 horas, sempre às 12:00 UTC.

Tanto para a análise da componente meridional do vento (expressa em diagramas de Hovmöller) quanto para a da VR, os resultados das simulações foram comparados com a própria reanálise do ERA-Interim. Vale ressaltar que este trabalho aborda o impacto das diferentes técnicas de *nudging* na estrutura da atmosfera simulada, bem como na precipitação, durante os dois eventos de DOLs. No caso, não há uma tentativa de validar o modelo. Em casos de estudos que realizem testes de parametrizações ou até mesmo em que o objetivo seja validar o modelo regional, deve-se ter o cuidado de não realizar o que é denominado de *overfitting*, ou seja, quando as observações utilizadas como “verdade” são as mesmas para forçar o modelo regional. Isso ocorre também quando a forçante de grande escala é utilizada para comparação com os resultados obtidos. Para mais detalhes, sugere-se a leitura de [Bellprat et al. \(2012\)](#) e [Hourdin et al. \(2017\)](#).

A precipitação diária fornecida pelo WRF foi comparada com as estimativas geradas a partir do *TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis* (TMPA). Esses dados possuem resolução temporal de três horas, resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ e cobrem toda a região tropical desde a latitude 50° N até 50° S ([Huffman et al., 2010](#)).

Para facilitar a exposição, doravante os dados provindos da reanálise do ERA-Interim serão chamados ERA e os provindos dos resultados das simulações com *nudging* desativado e com as técnicas *analysis nudging* e *spectral nudging* serão chamados de WRF-DF, WRF-AN e WRF-SN, respectivamente.

3. Identificação dos Dols Por Meio de Imagens de Satélite

Nas imagens do dia 10 da [Fig. 1](#), as marcações em azul delimitam a nebulosidade associada ao primeiro evento. O deslocamento dessas nuvens para oeste pode ser observado a partir do dia 6 de junho através de imagens de satélite (não apresentadas). Ainda no dia 10, percebe-se uma nebulosidade associada ao segundo evento, demarcado em branco, também se deslocando em direção ao NEB. Ao se aproximar do litoral no dia 11, a nebulosidade associada à passagem do primeiro e do segundo evento são combinadas.

No dia 12, a temperatura do topo da nuvem alcança -60° C , indicando uma convecção mais profunda. No final do dia, a nebulosidade atinge o litoral do NEB. Observa-se também uma formação de nebulosidade na direção noroeste-sudeste associada ao terceiro evento, indicado pela seta verde. O terceiro evento se intensifica e atinge o litoral norte do NEB no período entre os dias 13 e 14 de junho.

A partir do dia 14 de junho, a nebulosidade associada à passagem destes eventos começa a se dissipar. Nesse mesmo dia é possível perceber uma nebulosidade, demarcada em amarelo, associada ao quarto evento, e que também se desloca em direção ao NEB. Esta nebulosidade atingiu o litoral no dia 15 de junho (não apresentado). No final do dia 16 de junho (não apresentado), praticamente toda a nebulosidade já estava dissipada.

4. Resultados e Discussões

4.1. Componente meridional do vento

As [Figs. 2 e 3](#) representam a componente meridional do vento, para as cidades de Fortaleza ($7,1654^\circ \text{ S}$) e João Pessoa ($3,8157^\circ \text{ S}$). As linhas verticais pretas e contínuas representam a longitude das PCDs dessas cidades. Os eixos dos cavados dos eventos de DOLs são representados por linhas pontilhadas pretas.

Analisando a componente meridional do vento através das [Figs. 2 e 3](#), nota-se que as latitudes estudadas apresentam padrões característicos de DOLs. Os eixos dos cavados estão localizados nas regiões onde ocorre a mudança do sinal do vento, de valores positivos (indicando movimentos de sul para norte) para valores negativos (indicando movimento de norte para sul), assim como descrito em [Hall \(1989\)](#). Devido a localização da interseção entre os valores positivos e negativos não serem bem definidas, o eixo do cavado é determinado de maneira aproximada.

Conforme apresentado na [Fig. 2](#), observa-se um cavado entrando no litoral de Fortaleza no dia 12 nas quatro imagens ([Figs. 2.a-d](#), representando os dados do ERA-Interim, e as simulações WRF-DF, WRF-AN e WRF-SN, respectivamente). Levando em consideração a intensificação da nebulosidade que ocorreu no litoral do NEB no dia 12, como observado na [Fig. 1](#), este cavado corresponde ao segundo evento. No dia 13, percebeu-se outro cavado entrando no litoral nas [Figs. 2-a](#) (ERA-Interim) e [2-c](#) (WRF-AN). Já nas [Figs. 2-b](#) (WRF-DF) e [2-d](#) (WRF-SN) este cavado entra no litoral apenas no início do dia 14. Nesse mesmo período, nota-se uma nebulosidade na direção noroeste-sudeste no litoral do NEB, como observado na [Fig. 1](#). Portanto, este cavado representa o terceiro evento. Nota-se também um cavado entrando no litoral do NEB no dia 15 nas [Figs. 2-a](#) (ERA-Interim) e [2-c](#) (WRF-AN). Levando em consideração o período que este cavado atinge o NEB, pode-se concluir que ele representa o quarto evento. Nas [Figs. 2-b](#) (WRF-DF) e [2-d](#) (WRF-SN), não é possível traçar o eixo do cavado associado ao quarto evento pois ele não atinge o litoral até as 00:00 do dia 16, que corresponde ao fim das simulações.

O comportamento dos cavados observado na [Fig. 3](#) (agora representando a cidade de João Pessoa) é semelhante ao da [Fig. 2](#), entretanto não se identifica indícios

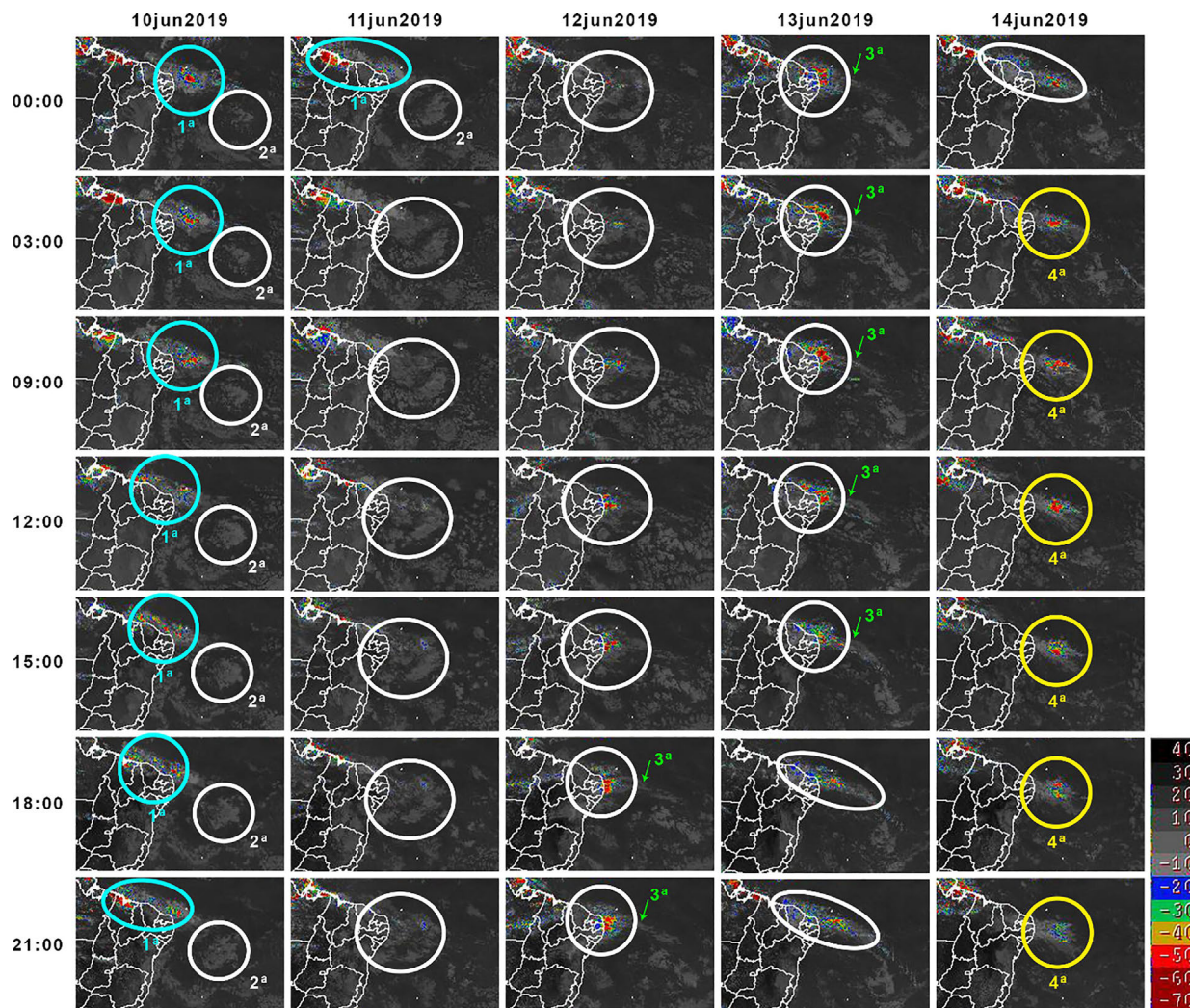


Figura 1 - Composição de imagens de satélite (GOES-16 + MSG-10) nos canais infravermelhos com temperatura em °C para o período de 10 a 14 de junho de 2019. Fonte: adaptado de CPTEC/INPE.

evidentes do terceiro evento nas Figs. 3-a (ERA-Interim) e 3-c (WRF-AN). Já nas Figs. 3-b (WRF-DF) e 3-d (WRF-SN), é possível observar o evento, porém com uma intensidade inferior ao observado na Fig. 2.

Assim, como observado nas Figs. 2-b (WRF-DF) e 2-d (WRF-SN), não é possível traçar o eixo do cavado associado ao quarto evento, conforme as Fig. 3-b (WRF-DF) e 3-d (WRF-SN), mesmo com antecipação da entrada dos cavados no litoral de João Pessoa. Já na Fig. 3-d (WRF-SN), é possível visualizar o eixo do cavado associado ao primeiro evento que atingiu o NEB no final do dia 10, como também observado na Fig. 1.

Vale destacar a semelhança entre as Figs. 2-a (ERA-Interim) e 2-c (WRF-AN), bem como entre as Figs. 3-a (ERA-Interim) e 3-c (WRF-AN). Isto está relacionado ao coeficiente de *nudging* escolhido, já que ele determina o tempo de ajuste do modelo regional em direção aos dados de reanálise do ERA. O valor do coeficiente de *nudging* empregado foi de $0,0003 \text{ s}^{-1}$, que indica um ajuste a cada

hora de simulação, aproximadamente. Destaca-se que a técnica *Analysis Nudging* também foi empregada nos ventos meridional e zonal dentro da CLP, diferentemente da simulação que utilizou a técnica de relaxamento *Spectral Nudging* (Figs. 2-d e 3-d), que foi aplicada apenas acima da CLP.

A simulação com o *nudging* desativado (Figs. 2-b e 3-b) representou os eixos dos cavados associados ao segundo e ao terceiro evento, entretanto não conseguiu reproduzir o quarto evento. A falha nessa representação do quarto evento pode estar relacionada ao acúmulo de erros numéricos da simulação com o passar do tempo, fazendo com que os dados simulados se desviem dos dados de fronteira, já que não houve nenhum ajuste dentro da grade ao longo da simulação.

A simulação com a técnica *Spectral Nudging* (Figs. 2-d e 3-d) representou o deslocamento para oeste do cavado associado ao quarto evento, conforme as observações. Entretanto, diferentemente do observado, o eixo do

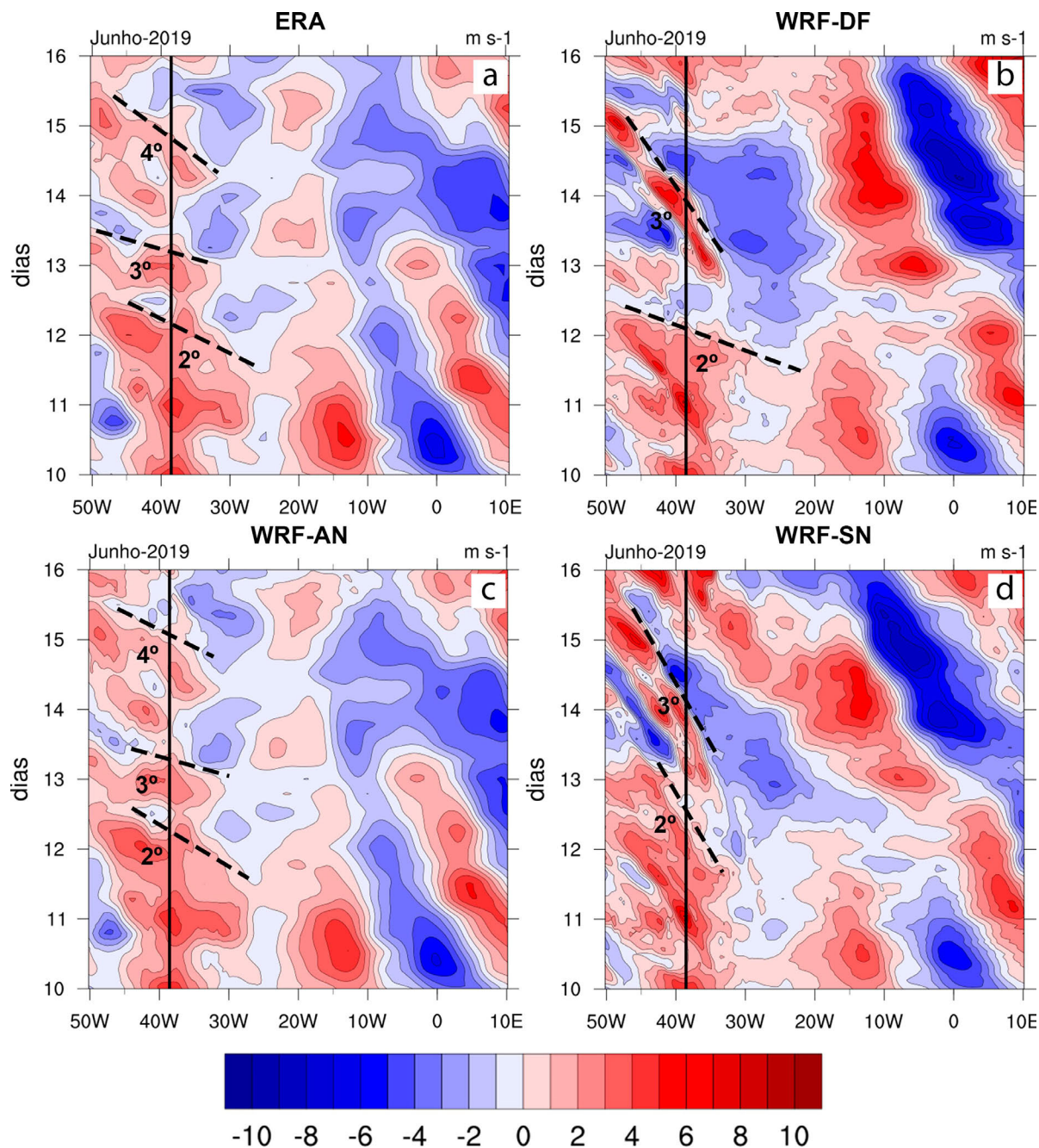


Figura 2 - Componente meridional do vento (m s^{-1}) a 700 hPa na cidade de Fortaleza (linha vertical preta): (a) Reanálise do ERA-Interim, e experimentos (b) WRF-DF, (c) WRF-AN e (d) WRF-SN.

cavado não entrou no litoral do NEB no dia 15. Não obstante, evidencia-se que, mesmo sem o ajuste dentro da CLP, esta técnica conseguiu representar o cavado de maneira semelhante à simulação que utiliza o *nudging* desativado, porém com o WRF-SN simulando valores mais intensos comparado ao WRF-DF. A comparação desses resultados apontam uma possível necessidade do uso desta técnica dentro da CLP para uma melhor representação dos DOLs.

4.2. Vorticidade relativa

As Figs. 4 e 5 apresentam a componente meridional e zonal do vento (em linhas de corrente) e a Vorticidade Relativa (VR, em cores), em 700 hPa e 800 hPa (respectivamente), para os dias 11/06 até 14/06, a partir da Reanálise do ERA-Interim, e das simulações WRF-DF, WRF-AN e WRF-SN (da esquerda para a direita, em ambas as figuras).

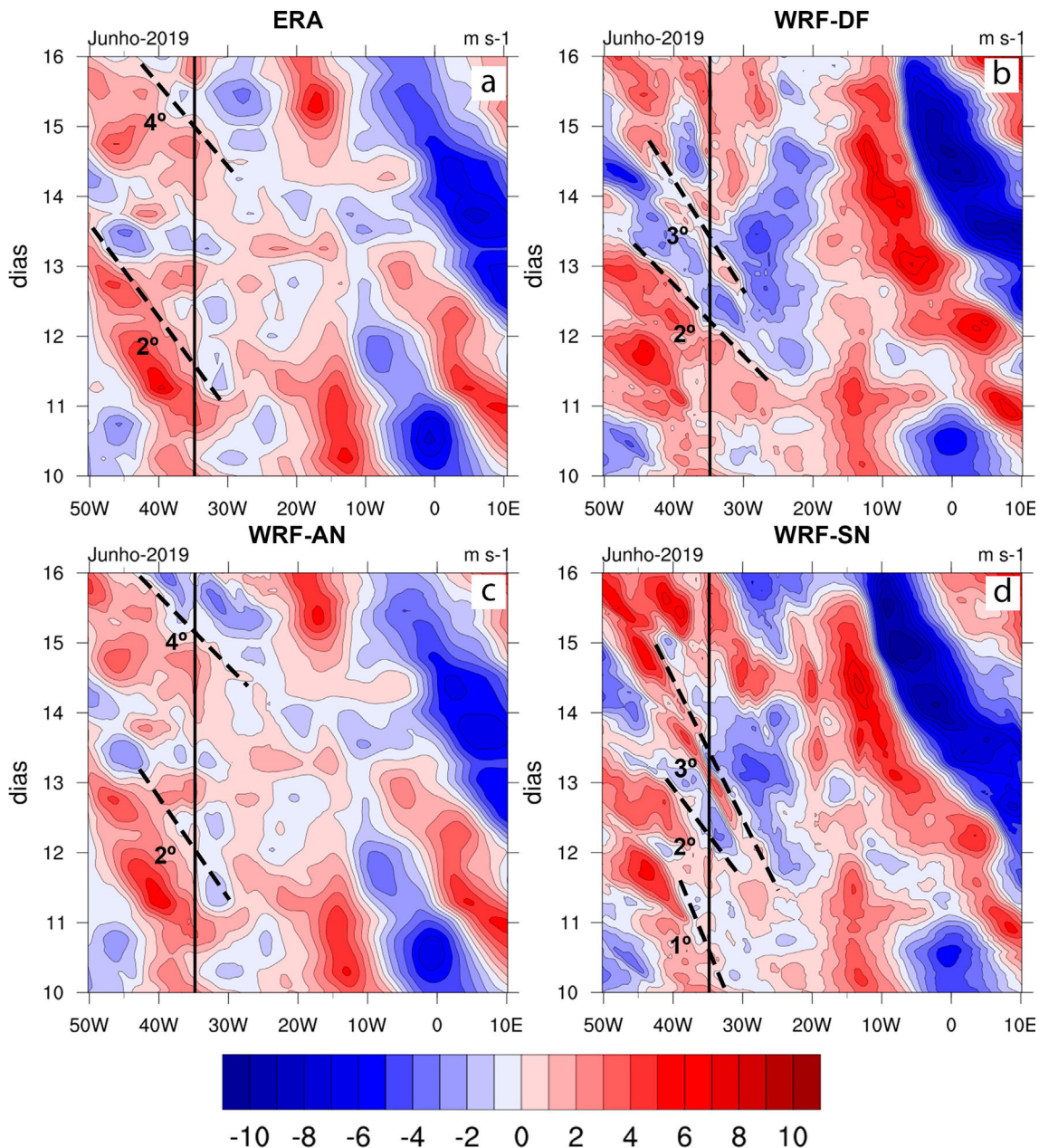


Figura 3 - Componente meridional do vento ($m s^{-1}$) a 700 hPa na cidade de João Pessoa (linha vertical preta): (a) Reanálise do ERA-Interim, e experimentos (b) WRF-DF, (c) WRF-AN e (d) WRF-SN.

De acordo com a Fig. 4, no dia 11/06, observou-se duas regiões com valores negativos de VR (retângulos pretos) em 700 hPa, com centro em aproximadamente 30° W e 20° W, no Atlântico Sul, a partir da reanálise do ERA e na simulação WRF-AN. Na Fig. 5 (em 800 hPa), também é possível identificar esses dois cavados nas mesmas localizações. Além disso, existe uma região com valores negativos de VR ao norte do NEB, como apresentado nas Figs. 4 e 5. Estes valores devem estar relacionados à passagem do primeiro evento que atingiu a região no dia 10/06.

Ainda no mesmo dia, em 700 hPa (primeira linha da Fig. 4), nas simulações WRF-DF e WRF-SN, notou-se uma extensa região com valores negativos de VR (retângulo preto) ao leste do NEB. Em 800 hPa (Fig. 5), identificou-se dois cavados ao leste do NEB. Porém nestes dois experimentos (WRF-DF e WRF-SN), não fica claro uma formação de 2 núcleos como observado na reanálise do ERA e na simulação WRF-AN. Também é possível perceber uma região sobre o oceano, ao norte do NEB, com valores negativos de VR, presente nas duas imagens referentes às simulações, sendo possível perceber um cavado

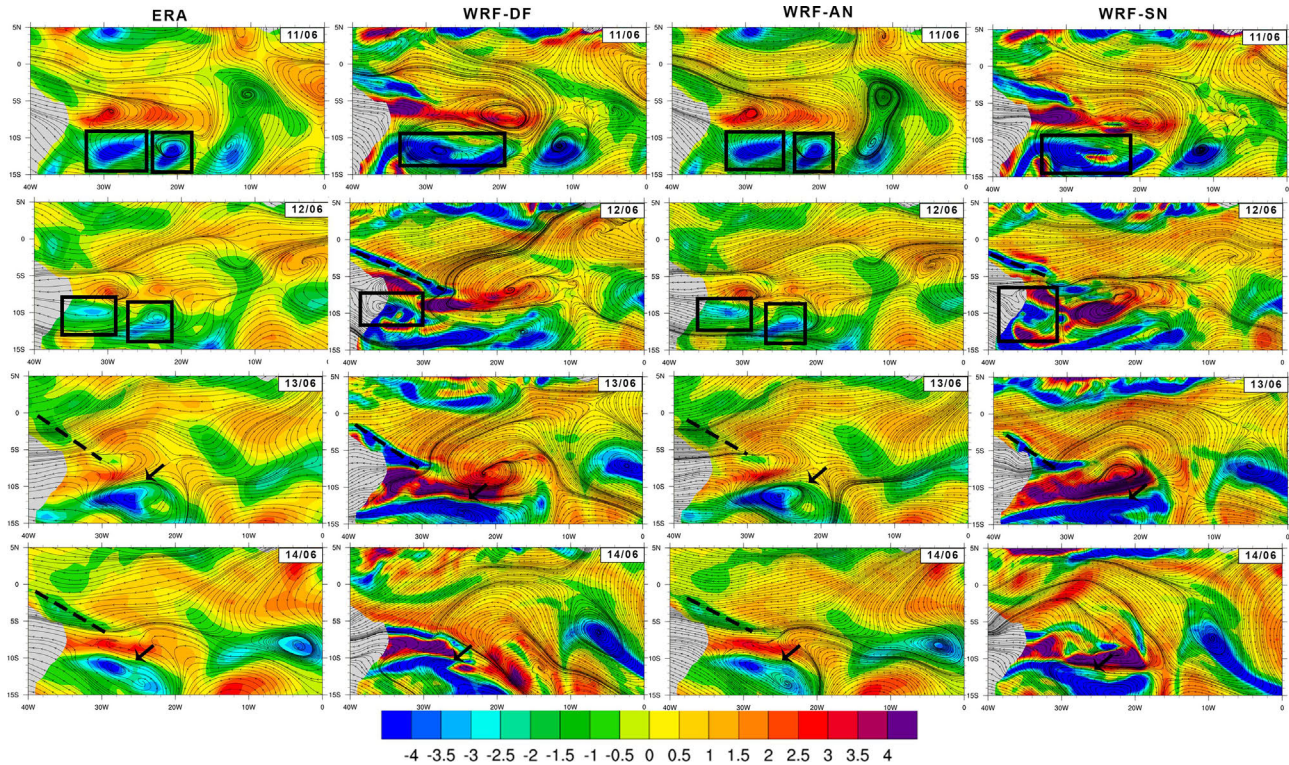


Figura 4 - Ventos meridional e zonal (linhas de corrente) e vorticidade relativa (em cores, s^{-1}) a 700hPa, do dia 11/06 até o 14/06, todos às 12:00 UTC: Reanálise ERA-Interim, e simulações WRF-DF, WRF-AN e WRF-SN (da esquerda para a direita, respectivamente).

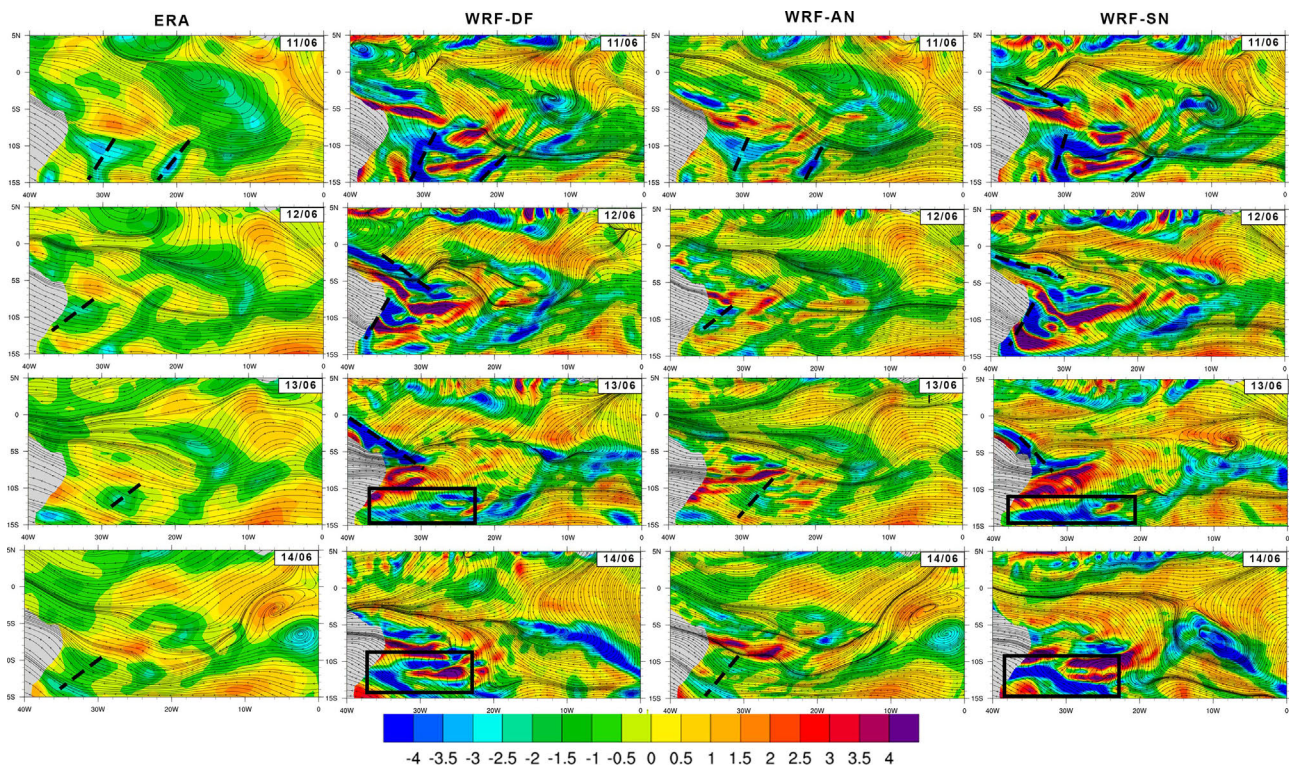


Figura 5 - Ventos meridional e zonal (linhas de corrente) e vorticidade relativa (em cores, s^{-1}) a 800hPa, do dia 11/06 até o 14/06, todos às 12:00 UTC: Reanálise ERA-Interim, e simulações WRF-DF, WRF-AN e WRF-SN (da esquerda para a direita, respectivamente).

na simulação WRF-SN, na Fig. 5. Semelhante ao discutido anteriormente, essa região com valores negativos de VR ao norte do NEB, nas simulações WRF-DF e WRF-SN, pode estar relacionada à passagem do primeiro evento de DOL, no dia 10/06. Entretanto, para os experimentos WRF-DF e WRF-SN, a extensão e a intensidade são superiores ao observado na reanálise do ERA e na simulação WRF-AN.

No dia 12 (segunda linha nas Figs. 4 e 5), percebe-se o deslocamento das duas regiões com valores negativos de VR (localizadas no Atlântico Sul) para oeste. A mais próxima do continente, alcança o litoral leste do NEB na reanálise do ERA e na simulação WRF-AN em 700 hPa (Fig. 4). Já em 800 hPa (Fig. 5), percebe-se um cavado entrando no litoral leste do NEB, porém não é possível determinar a localização do outro cavado observado no dia 11/06. Além disso, a região ao norte do NEB, que apresentava valores negativos de VR, deslocou-se para oeste.

Ainda no dia 12/06, as simulações WRF-DF e WRF-SN mostraram que a região com valores negativos de VR no Atlântico Sul dividiu-se em duas partes. Uma atingiu o litoral leste do NEB (retângulo preto), conforme apresentado na Fig. 4 (segunda linha, segunda e quarta coluna), semelhante ao observado na reanálise do ERA e na simulação do WRF-AN. Pode-se notar também que a região com valores negativos de VR ao norte do NEB (observada no dia 11/06) evoluiu para um cavado nas duas simulações e aproximou-se do litoral norte. Em 800 hPa (Fig. 5), notou-se nas imagens referentes às simulações um cavado entrando no litoral leste do NEB e um cavado se aproximando do litoral norte do NEB. O cavado entrando no litoral na reanálise do ERA e nas simulações do WRF coincide com a chegada do segundo evento, como discutido e observado nas Figs. 1, 2 e 3.

No dia 13/06 (terceira linha, Figs. 4 e 5), para a Reanálise do ERA e na simulação WRF-AN (primeira e terceira coluna), percebeu-se que o cavado que atingiu o NEB no dia 12/06 já havia se dissipado e que a segunda região (identificada pela seta preta) intensificou-se e continuou se deslocando para oeste em 700 hPa (Fig. 4). Notou-se também a presença de um cavado na região do Atlântico ao norte do NEB, do mesmo modo que foi observado nas simulações WRF-DF e WRF-SN no dia 12/06. Em 800 hPa (Fig. 5), é possível perceber um cavado na região do Atlântico Sul, ao leste do NEB, representado por linhas pontilhadas na reanálise do ERA e, na simulação do WRF-AN, na mesma localização onde é apontada por setas em 700 hPa (Fig. 4). Nas simulações WRF-DF e WRF-SF, assim como aconteceu na reanálise do ERA e na simulação do WRF-AN, a região com valores negativos de VR que atingiu o NEB se dissipou, como apresentado na Fig. 4 (em 700 hPa), e o cavado na região norte do NEB se aproximou do litoral, como apresentado na Fig. 5 (em 800 hPa). Também é possível observar uma região com altos valores de VR ao leste do NEB nas simulações

WRF-DF e WRF-SN (segunda e quarta coluna), apresentadas nas Figs. 4 e 5.

No dia 14/06 (última linha nas Figs. 4 e 5), a partir da reanálise do ERA, bem como representado pela simulação WRF-AN, em 700 hPa (Fig. 4), o cavado ao norte do NEB se aproximou do litoral mas não o atingiu e a região com valores negativos de VR (identificada pela seta preta) continuou se deslocando para oeste. Em 800 hPa (Fig. 5), o cavado ao leste do NEB continuou se aproximando do litoral. Nas simulações WRF-DF e WRF-SF, percebeu-se que a região com valores negativos (identificada pela seta preta) de VR aproximou-se do litoral leste do NEB e que o cavado ao norte do NEB atingiu o litoral (conforme observado nas Figs. 4 e 5). A chegada do cavado ao norte do NEB nas simulações WRF-DF e WRF-SN coincide com a intensificação da nebulosidade associada ao terceiro evento, com discutido e apresentado na Fig. 1.

Levando em consideração a posição e a evolução temporal da região com valores negativos de VR (identificada pela seta preta) e do cavado, ao leste do NEB, nos dias 13/06 e 14/06, apresentados nas Figs. 4 e 5, pode-se concluir que este cavado está associado ao quarto evento que atingiu o NEB no dia 15 de junho de 2019.

De uma forma geral, nos níveis de 800 hPa e 700 hPa, os valores negativos de vorticidade relativa e movimento ciclônico dos ventos (sentido horário) foram observados em todas as simulações realizadas, caracterizando um movimento ascendente na atmosfera. Além disso, o seu comportamento no tempo apresentou um padrão ondulatório característicos de DOLs como pode ser observado nas Figs. 4 e 5.

4.3. Precipitação

A Fig. 6 apresenta a precipitação acumulada diária para os dias 12, 13 e 14 de junho (primeira a terceira linha, respectivamente), a partir do TMPA (primeira coluna) e das simulações WRF-DF, WRF-AN e WRF-SN (da segunda para quarta coluna, respectivamente).

No dia 12/06, a nebulosidade mais intensa atingiu o NEB apenas no final do dia, como pode ser observado na Fig. 1. Por esse motivo a precipitação estimada pelo TMPA concentrou-se quase que totalmente sobre o oceano, nas proximidades do litoral do NEB. Pelas simulações do WRF, percebeu-se que o eixo do cavado associado ao segundo evento não atingiu o litoral do NEB até as 12:00h (Fig. 5). Isto coincide com o fato das simulações apresentarem uma grande quantidade de chuva ao norte do NEB (Fig. 6, primeira linha da segunda para a quarta coluna). Notadamente, a simulação WRF-AN apresentou um maior volume de chuva.

No dia 13/06, a nebulosidade associada ao segundo evento estava localizada sobre o leste do NEB e é possível observar que no final do dia surgiu uma nebulosidade na direção noroeste-sudeste associada ao terceiro evento

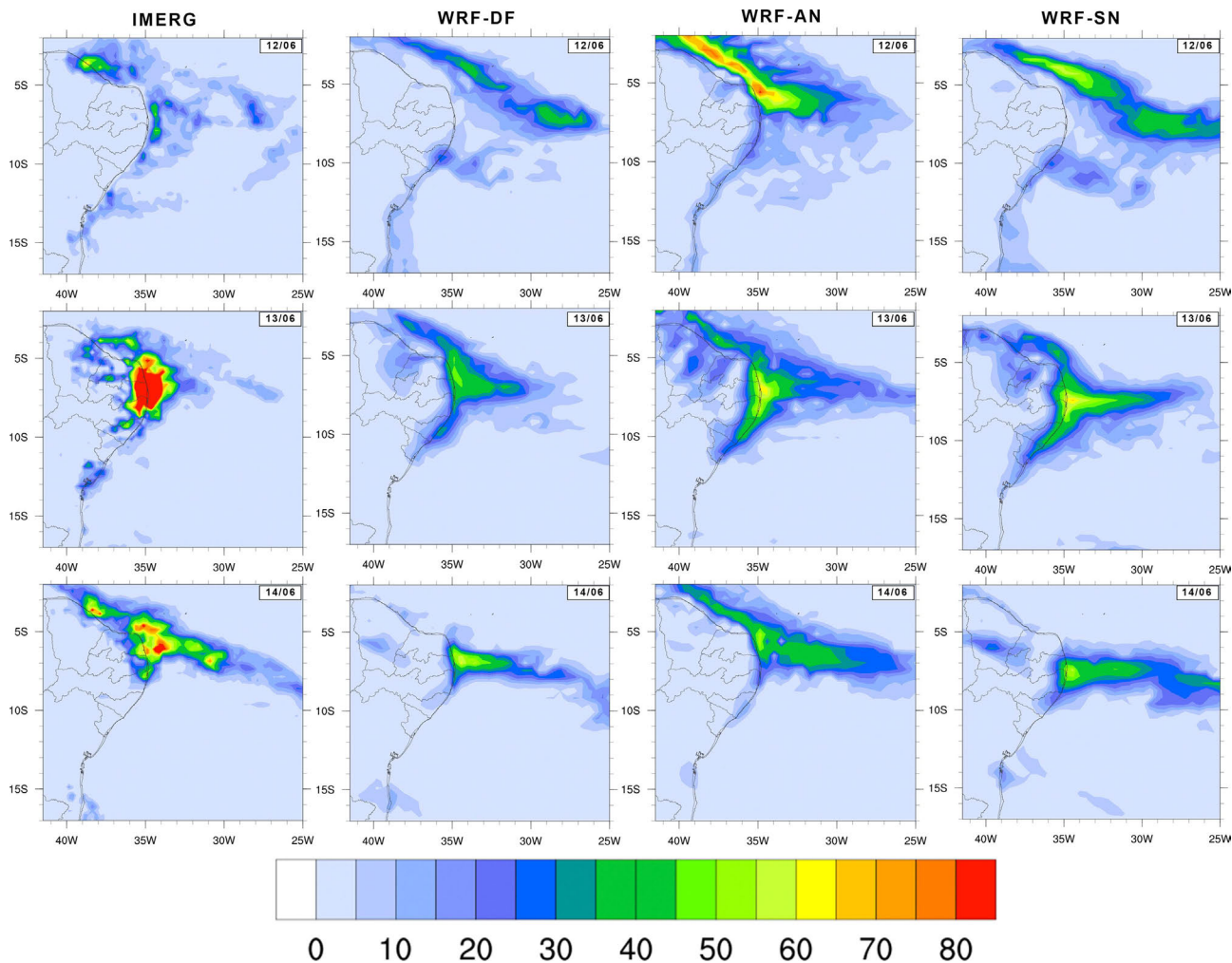


Figura 6 - Precipitação acumulada diária (mm) para os dias de 12 a 14 de junho (da primeira até a terceira linha) a partir do TMPA (primeira coluna), e das simulações WRF-DF, WRF-AN e WRF-SN (da segunda para quarta coluna, respectivamente).

(Fig. 1). Já a precipitação estimada pelo TMPA associada a estes eventos se concentrou no litoral leste do NEB e na Mesorregião do Jaguaribe. Nas simulações do WRF, o eixo do cavado associado ao segundo evento não é mais observado no dia 13 (Fig. 5), indicando que ele atingiu o litoral e se dissipou. Já a precipitação se concentrou no leste do NEB, semelhante ao observado no TMPA, mas com uma intensidade menor, apresentando também precipitação em uma extensão maior no oceano. Percebe-se também grandes volumes de chuva no Estado do Ceará, principalmente na simulação WRF-AN.

No dia 14/06, a nebulosidade associada ao terceiro evento se encontrava sobre o litoral norte do NEB nas primeiras horas do dia e depois se dissipou (Fig. 1). Já a precipitação estimada pelo TMPA se concentrou no norte e no leste do NEB (Fig. 6). Nas simulações do WRF-DF e WRF-SN, a evolução do cavado associado ao terceiro evento é representada de maneira satisfatória, mas a chuva associada a este evento não é bem representada nessas simulações. Já na simulação WRF-AN, o cavado asso-

ciado ao terceiro evento não atinge o litoral norte, mas o modelo representa bem a distribuição espacial de precipitação associada a este evento (Fig. 6).

A partir de medidas da componente zonal e meridional do vento, da vorticidade relativa e da precipitação, foi possível demonstrar que o modelo WRF é capaz de realizar simulações de curto prazo da evolução no tempo dos DOLs e da precipitação associada a este sistema. Além disso, a estrutura e o deslocamento do fenômeno seguiram o modelo conceitual definido por Hall em (1989) e Coutinho e Fisch em (2007).

5. Conclusões

Neste estudo foram analisados os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) que atingiram o litoral norte e leste do Nordeste Brasileiro (NEB) durante o período de 12 a 14 de junho de 2019, com enfoque em modelagem atmosférica regional utilizando o *Weather Research and Forecasting Model* (WRF). Foram realizadas simulações

para avaliar o impacto das diferentes abordagens do uso da técnica de *nudging* presentes no modelo: *nudging* desativado (WRF-DF), *Analysis Nudging* (WRF-AN) e *Spectral Nudging* (WRF-SN). Essa análise tem grande importância uma vez que a boa representação desses sistemas pode auxiliar na previsão operacional em centros de meteorologia nacionais e estaduais.

Ao analisar os resultados das simulações, percebeu-se uma melhor representação do deslocamento do cavado associada ao segundo e ao terceiro eventos na simulação WRF-SN e uma melhor distribuição temporal e espacial da precipitação na simulação WRF-AN. Isto pode estar relacionado ao fato da técnica *Analysis Nudging* ter sido empregada no vento meridional e zonal dentro da CLP, diferente da simulação utilizando a técnica de relaxamento *Spectral Nudging* que foi aplicada apenas acima da CLP. Outro fator que pode influenciar na qualidade das simulações é o coeficiente de *nudging* e o número de ondas na técnica *Spectral Nudging*. O primeiro, determina a influência da forçante de grande escala, no caso a reanálise do ERA-Interim, nas simulações. Quanto maior for esse coeficiente, maior será a similaridade entre a reanálise e o resultado das simulações. Já o segundo, designa a frequência máxima das ondas que serão filtradas. Teoricamente, quando a onda de corte for a menor possível para um determinado domínio, os resultados encontrados através desta técnica serão iguais aos obtidos utilizando a técnica de *Analysis Nudging*, com exceção da precisão perdida devido ao algoritmo de transformação (Gomes e Miguez-Macho, 2017).

Nas variáveis analisadas, a simulação WRF-DF apresentou características semelhantes à simulação WRF-SN. Isto indica que a utilização da técnica *Spectral Nudging* apenas acima da CLP não influencia de maneira expressiva o comportamento dos ventos ou o número de onda escolhido não é o adequado para estudar os DOLs. Entretanto, percebeu-se um aumento na quantidade de chuva na simulação WRF-SN em relação à WRF-DF. Da mesma forma, a reanálise do ERA-Interim e a simulação WRF-AN apresentaram resultados semelhantes. Este fato pode estar relacionado ao coeficiente de *nudging* escolhido, já que ele determina o tempo de ajuste do modelo regional em direção aos dados de reanálise do ERA. Por esse motivo, com relação às simulações realizadas neste trabalho, faz-se necessário o emprego de um coeficiente de *nudging* menor para aumentar a liberdade do MCR em relação à forçante de grande escala (reanálise do ERA-Interim).

Este estudo foi conduzido utilizando uma zona de simulação contínua na direção meridional, mais conhecido como canal tropical. Nenhum outro trabalho voltado para DOLs sobre a região do NEB, no momento, utilizou este recurso. Devido às limitações computacionais, os autores puderam utilizar um espaçamento de grade de 50 km. De fato, para rodadas de previsão numérica de tempo esta

resolução espacial horizontal não é a ideal, visto que, por exemplo, o NCEP (*National Centers for Environmental Predictions*) disponibiliza as previsões do GFS (*Global Forecast System*) para um espaçamento de grade horizontal de 0.25 ° para diversos usos. Além disso, outros testes devem ser realizados para saber se é vantajoso o uso do canal tropical para estudos de DOLs, comparado as grades menores (como por exemplo, uma com limites entre a borda oeste da América do Sul até a borda oeste da África, na região tropical), ou com espaçamento horizontal inferior a 50 km. Porém, vale destacar que os resultados iniciais apresentados aqui, são promissores para estudos que possam dar continuidade às diferentes aplicações de técnicas de *nudging*, canal tropical e DOLs.

Como continuidade para este estudo e recomendações para trabalhos futuros sugere-se: testes de grades com maior resolução horizontal e testes com grades aninhadas para casos de interesse, otimização do coeficiente de *nudging*, otimização do número de onda, estudo da influência do *nudging* na camada limite planetária e determinar a influência da temperatura superfície do mar na intensidade do DOL.

Agradecimentos

Aos revisores pelas críticas e sugestões apresentadas, a Universidade Estadual do Ceará (UECE) pela infraestrutura disponibilizada para a pesquisa, ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pelos dados das PCDs, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) pelos dados precipitação TMPA, a *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) pelos dados de reanálise, ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) pelas imagens de satélite e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor.

Referências

- ALEXANDRU, A.; ELIA, R.; LAPRISE, R. Internal variability in regional climate downscaling at the seasonal scale. *Monthly Weather Review*, v. 135, n. 9, p. 3221-3238, 2007.
- ALMEIDA, V.A.; MARTON, E. Chuvas intensas em Santa Catarina: análise sinótica de um evento extremo e simulação numérica com o modelo atmosférico WRF. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 37, n. 2, p. 169-179, 2014.
- ALVES, K.; CAVALCANTI, L.D.S.; NÓBREGA, R.S. Eventos extremos e risco de inundação: uma análise do comportamento evolutivo dos distúrbios ondulatórios de leste em junho de 2010 sobre a bacia do Rio Una Pernambuco. *Geotextos*, v. 9, n. 2, p. 173-189, 2013.
- BELLPRAT, O.; KOTLARSKI, S.; LÜTHI, D.; DE ELÍA, R.; FRIGON, A. *et al.* Objective calibration of regional climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 117, n. D23, 2012.

- BLUESTEIN, H.B. **Synoptic-Dynamic Meteorology in Mid-latitudes: Observations and Theory of Weather Systems**. Oxfordshire: Taylor & Francis, 1992.
- BULLOCK, O.R.; ALAPATY, K.; HERWEHE, J.A.; MALLARD, M.S.; OTTE, T.L. *et al.* An observation-based investigation of nudging in WRF for downscaling surface climate information to 12-km grid spacing. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, n. 1, p. 20-33, 2014.
- COMIN, A.N.; JUSTINO, F.; PEZZI, L.; DE SOUSA GURJÃO, C.D.; SHUMACHER, V.; *et al.* Extreme rainfall event in the Northeast coast of Brazil: a numerical sensitivity study. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 133, n. 2, p. 141-162, 2020.
- COUTINHO, E.C.; FISCH, G. Distúrbios ondulatórios de leste (DOLs) na região do centro de lançamento de Alcântarama. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 193-203, 2007.
- DANTAS, V.A.; FILHO, V.P.S.; SANTOS, E.B.; GANDU, A.W. 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). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 754-767, 2019.
- FERREIRA, A.G.; MELLO, N.G. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 15-28, 2005.
- GOMES, H.B.; AMBRIZZI, T.; HERDIES, D.L.; HODGES, K.; PONTES DA SILVA, B.F. Easterly wave disturbances over Northeast Brazil: an observational analysis. **Advances in Meteorology**, v. 2015, 2015.
- GOMES, H.B.; AMBRIZZI, T.; DA SILVA, B.F.P.; HODGES, K.; DIAS, P.L.S. *et al.* Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 3-4, p. 1393-1411, 2019.
- GÓMEZ, B.; MIGUEZ-MACHO, G. The impact of wave number selection and spin-up time in spectral nudging. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 143, n. 705, p. 1772-1786, 2017.
- HALL, B.A. Westward-moving disturbances in the South Atlantic coinciding with heavy rainfall events at Ascension Island. **Meteorology Magazine**, v. 118, n. 1405, p. 175-181, 1989.
- HONG, S.Y.; LIM, J.O.J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). **Journal of Korean Meteorological Society**, v. 42, n. 2, p. 129-151, 2006.
- HONG, S.Y.; NOH, Y.; DUDHIA, J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. **Monthly Weather Review**, v. 134, n. 9, p. 2318-2341, 2006.
- HOURDIN, F.; MAURITSEN, T.; GETTELMAN, A.; GOLAZ, J.-C.; BALAJI, V. *et al.* The art and science of climate model tuning. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 3, p. 589-602, 2017.
- HUFFMAN, G.J.; ADLER, R.F.; BOLVIN, D.T.; NELKIN, E.J. The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA). In: GEBREMICHAEL, M.; HOSSAIN, F. (eds). **Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology**. Dordrecht: Springer, 2010.
- IACONO, M.J.; DELAMERE, J.S.; MLAWER, E.J.; SHEPHARD, M.W.; CLOUGH, S.A. *et al.* Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. D13, p. 1984-2012, 2008.
- JIMÉNEZ, P.A.; DUDHIA, J.; GONZÁLEZ-ROUCO, J.F.; NAVARRO, J.; MONTÁVEZ, J.P. *et al.* A revised scheme for the WRF surface layer formulation. **Monthly Weather Review**, v. 140, n. 3, p. 898-918, 2012.
- KAIN, J.S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. **Journal of Applied Meteorology**, v. 43, n. 1, p. 170-181, 2004.
- KOUADIO, Y.K.; MACHADO, L.A.; SERVAIN, J.; Tropical atlantic hurricanes, easterly waves, and west african mesoscale convective systems. **Advances in Meteorology**, v. 2010, 2010.
- LO, J.C.F.; YANG, Z.L.; PIELKE SR, R. A. Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 113, n. D9, 2008.
- MACEDO, L.R.; ALVES, R.C.M.; BASSO, J.L.M.; YAMASAKI, Y. Análise do desempenho do modelo WRF com alta resolução espacial na previsão de precipitação acumulada. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 2, 2014.
- MACHADO, C.; NÓBREGA, R.S.; OLIVEIRA, T.H.; SILVA ALVES, K.M. A. Distúrbio ondulatório de leste como condicionante a eventos extremos de precipitação em Pernambuco. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 11, 2012.
- MACHADO, L.A.; FERREIRA, N.J.; LAURENT, H.; DIEDHIOU, A. Distúrbios ondulatórios de leste. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J.; DIAS, M.A.F.S. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de textos, 2009.
- MOLION, L.; BERNARDO, S. A review of rainfall dynamics over northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 2-10, 2002.
- MOLLMANN JUNIOR, R.A.; ALVES, R.C.M.; MUCHOW, G.B.; RODRIGUES, B.D.; SILVA JUNIOR, R.S. *et al.* 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. 9, n. 2, p. 368-383, 2016.
- NEVES, D.J.D.; ALCANTARA, C.R.; SOUZA, E.P. Estudo de caso de um distúrbio ondulatório de leste sobre o Estado do Rio Grande do Norte - Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 490-505, 2016.
- OLIVEIRA, E.M.G.; PIVA, E.D.; SANTOS, D.C.; WEBLER, G.; GUERRA, V.S. Avaliação do modelo WRF com diferentes parametrizações convectivas para um caso de ciclo-gênese na Bacia do Prata. **Ciência e Natura**, v. 35, p. 119-121, 2013.
- RAY, P.; ZHANG, C.; DUDHIA, J.; LI, T.; MITCHELL, W. Tropical Channel Model. In: DRUYAN, L. (Ed) . **Climate Models**. Rijeka: InTech, 2012.
- RIEHL, H. **Tropical Meteorology**. New York: McGraw-Hill, 1954.
- SANTOS, A.H.M.D.; ARAGÃO, M.R.D.S.; CORREIA, M.D.F.; ARAUJO, H.A.D.; SILVA, A.B; Distúrbio ondu-

- tório de leste e seus impactos na cidade de Salvador. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 3, p. 355-364, 2012.
- SANTOS, D.C.; NASCIMENTO, E.L. Simulações numéricas em alta resolução de um complexo convectivo de mesoescala com diferentes condições iniciais e de contorno. **Ciência e Natura**, v. 35, p. 247-250, 2013.
- SILVA, M.C.; SILVA JUNIOR, R.S.S.; NASCIMENTO, G.C.; GOMES, H.B.; HOLANDA, S.C. Sistema de alerta para áreas de risco, utilizando o modelo de mesoescala WRF para o município de Maceió-Alagoas em julho de 2013. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 7, p. 2213-2224, 2016.
- TEWARI, M.; CHEN, F.; WANG, W.; DUDHIA, J.; LEMONE, M.A. *et al.* Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. In: **20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction**. Seattle, Washington. 2004.
- VUKICEVIC, T.; ERRICO, R.M. The influence of artificial and physical factors upon predictability estimates using a complex limited-area model. **Monthly Weather Review**, v. 118, n. 7, p. 1460-1482, 1990.
- WU, W.; LYNCH A.H.; RIVERS, A. Estimating the uncertainty in a regional climate model related to initial and lateral boundary conditions. **Journal of Climate**, v. 18, n. 7, p. 917-933, 2005.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.