

Simulação Numérica Regional para a Temperatura do Ar no Continente Antártico

Regional Numerical Simulation for Air Temperature in the Antarctic Continent

Alcimoni Nelci Comin 

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Viçosa, MG, Brasil

E-mail: alcimoni.comin@gmail.com

Resumo

Este estudo investiga a temperatura do ar no continente Antártico usando o modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*) versão 3.6.1. Para avaliar o desempenho do WRF são analisadas 29 estações meteorológicas, sendo 24 localizadas próximas à costa e 5 no interior do continente, para o período de 1999 a 2018. Em regiões de topografia complexa e de altitude acima de 1450 metros, o WRF apresentou dificuldade em estimar os valores das temperaturas máximas e mínimas. Observou-se uma superestimativa da temperatura mínima, possivelmente devido à dificuldade do WRF em estimar adequadamente a umidade da atmosfera. A camada espessa de neve faz com que o modelo subestime o fluxo de calor do solo, deixando muita energia na superfície que causa um aumento das temperaturas simuladas. O ciclo da temperatura é razoavelmente simulado na maioria das estações, com correlações entre 0,61 a 0,87. Em geral, as simulações com o WRF concordam razoavelmente com as observações, com desvio padrão entre 0,7 e 1,3°C para as estações localizadas entre 180°W a 90°E. Enquanto na região entre 90°E e 180°E, os desvios variam entre 0,6 e 1,4°C. Os resultados mostram, em geral, que as simulações com o WRF podem ser adotadas para preencher a inexistência de dados observados.

Palavras-chave: Temperatura do ar; Modelo WRF; Região polar

Abstract

This study investigates the air temperature in the Antarctic continent using the WRF model (*Weather Research and Forecasting*) version 3.6.1. To assess the performance of the WRF, 29 weather stations are analyzed, 24 located close to the coastal and 5 inland the continent, for the period 1999 to 2018. In regions with complex topography and altitudes above 1450 meters, the WRF has difficulty to estimate the maximum and minimum temperature. The minimum temperature was overestimated, probably due to the difficulty of the WRF to estimate the atmosphere moisture adequately. The thick layer of snow forced the model to underestimate the heat flux of the soil, storing a lot of energy on the surface, which causes an increase in the air temperature simulations. The temperature cycle is reasonably simulated in most stations, with the correlation ranged from 0.61 to 0.87. In general, the WRF simulations reasonably agree with the observations. The standard deviation ranges from 0.7 to 1.3°C for the stations from 180°W to 90°E. While in the region from 90°E to 180°E, the standard deviations ranged between 0.6 to 1.4°C. The results showed, in general, that WRF simulations can be used to fill the gaps related to the observed data.

Keywords: Air temperature; WRF model; Polar region

1 Introdução

O continente Antártico cobre uma área de aproximadamente 10% da superfície terrestre, tem uma altitude média de 2200 metros, podendo chegar até 4528 metros (Convey *et al.*, 2009). O escoamento na Antártica, durante o inverno, é dominado por um vórtice ciclônico próximo ao polo (Waugh & Randel, 1999). A circulação atmosférica é bastante influenciada pelo gelo no mar e pelas geleiras em altitudes acima de 3000 metros nas regiões continentais (Monaghan *et al.*, 2005), isso torna os gradientes horizontais de temperaturas muito intensos. Nas últimas décadas, muitos estudos de modelagem global e regional foram realizados para entender o comportamento climático antártico, principalmente devido à escassez de observações disponíveis. Portanto, modelos numéricos tornaram-se ferramentas apropriadas para estudos nessa região. Os modelos atmosféricos globais e regionais não apresentam bom desempenho em áreas polares, porque muitos esquemas de parametrizações de sub-grade são desenvolvidos com base em observações de latitudes médias (Chapman & Walsh, 2007; Boer *et al.*, 2012; Valkonen *et al.*, 2014).

Além disso, os modelos globais utilizados na Antártica possuem resoluções inadequadas para a representação das propriedades físicas da troposfera, da topografia e dos padrões atmosféricos (Bromwich & Cassano, 2001). Apesar das incertezas, os modelos numéricos têm sido amplamente utilizados tanto para estudos da atmosfera quanto do oceano. O alto albedo e a baixa quantidade de aerossóis, sobre a Antártica, resultam em diferentes interações na atmosfera, que podem influenciar diretamente a temperatura próximo da superfície (Laine, 2008). As altas temperaturas sobre a Antártica Ocidental tornam a camada limite bastante estável, isso intensifica os gradientes verticais de temperatura tornando bastante difícil para os modelos numéricos reproduzir esses gradientes (Tastula & Vihma, 2011; Valkonen *et al.*, 2014).

Experimentos realizados por Bromwich *et al.* (2009) com o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) no Ártico com resolução de 25 km, mostraram que as correlações variaram de 0,54 a 0,8 e a raiz do erro médio quadrático (REQM) entre 0,9 a 4,2°C para os meses de janeiro, junho e agosto de 1998. Wu & Petty (2010) encontraram uma superestimativa de 6°C, próximo da superfície, para os dias 19 e 20 de dezembro de 2003, nas simulações WRF comparada com as observações em regiões de altas latitudes no Hemisfério Norte. Hines & Bromwich (2008) encontraram uma correlação entre 0,76 a 0,91 para a temperatura, entre os dados observados e os dados simulados pelo WRF (com 24 km de resolução horizontal), para os meses de junho de 2001 e dezembro de 2002, na Groelândia.

Enquanto para a Antártica, em 9 estações costeiras e 2 no interior do continente, a REQM variou entre 4,7°C a 6,3°C para o mês de julho de 1998 (Tastula & Vihma, 2011). Bromwich *et al.* (2009) encontraram uma correlação de 0,64 e REQM de 5,53°C em junho de 2007 na Antártica, usando o WRF com 60 km de resolução horizontal. Deb *et al.* (2016) mostraram que em geral, as temperaturas máximas (janeiro de 2013) e mínimas (julho de 2013) foram superestimadas pelo modelo WRF na Antártica. Comin *et al.* (2016) utilizaram o modelo WRF para vários experimentos na Ilha Deception (Antártica) entre os dias 20 a 22 de março de 2003. Eles encontraram uma temperatura diária mais baixa simulada do que nos dados observados, com REQM entre 1,32 a 1,69°C e correlação de 0,51 a 0,82.

Muitos estudos foram realizados para investigar o desempenho do modelo WRF na Antártica, para períodos de alguns dias até escalas anuais, como por exemplo, Powers (2007), Tastula & Vihma (2011), Bromwich *et al.* (2013), Comin & Acevedo (2017). Esses autores encontraram para a temperatura a 2 m da superfície uma correlação variando entre 0,51 a 0,90 e REQM entre 1,3 a 8,1°C. O presente estudo abrange 20 anos de simulações numéricas para a temperatura do ar, portanto as simulações são muito mais longas que outros estudos realizados com WRF no continente. O objetivo principal deste artigo é avaliar o desempenho do WRF usando dados de temperaturas do ar próximo da superfície, provenientes de estações meteorológicas automáticas para o período de 1999 a 2018. No total 120 estações estão disponíveis na Antártica, dessas foram selecionadas 29 estações, e o restante foi descartado por possuírem muitos dados faltantes. Oportunidades para aumentar a cobertura temporal e espacial de observações *in-situ* da atmosfera Antártica são bastante limitadas (Hole *et al.*, 2016), portanto a modelagem numérica pode ser uma ferramenta para a obtenção de dados. Porém as simulações de temperatura dependem diretamente das escolhas dos esquemas de parametrizações físicas e dinâmicas do WRF que são mais adequadas nessa região. A correta modelagem dessa variável requer simulações precisas dos fluxos de umidade, calor e momento (Yver *et al.*, 2013).

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 é dedicada aos materiais e métodos. A Seção 3 para os resultados e discussão. E na Seção 4 são apresentadas as conclusões.

2 Materiais e Métodos

Os dados observados de temperatura do ar a 2m da superfície são de estações meteorológicas automáticas que podem ser obtidos do *Scientific Committee on Antarctic Research* (SCAR) e *Reference Antarctic Data for Environmental Research* (READER; Turner *et al.*, 2005). As estações selecionadas possuem 90% dos dados

disponíveis com uma frequência mensal, abrangendo o período de janeiro de 1999 a dezembro de 2018. Os dados faltantes foram ignorados nas análises. As simulações de séries temporais, para períodos relativamente longos, são importante para investigar a performance do WRF com respeito as amplitudes e os ciclos de temperatura. As simulações do WRF possuem uma resolução temporal de 6 horas, que posteriormente foram calculadas em médias mensais para comparar com as observações. Aqui foram empregadas várias métricas de desempenho diferentes, como: a raiz do erro quadrático médio, as médias das temperaturas mínimas, máximas e médias que são mostradas na Tabela 1. Também foi usado o diagrama de Taylor que mostra as correlações de Pearson (CORR) e os desvios padrão.

2.1 Área de Estudo

A Figura 1 mostra o domínio da grade horizontal de 40 km usada no modelo WRF e a localização geográfica das estações meteorológicas no continente Antártico. A maioria das estações (24) estão localizadas próximo à costa e as 5 restantes estão no interior do continente. As estações próximas a costa têm uma altitude variando de 11 metros em Faraday a 201 metros em Cape Ross, enquanto no interior a altitude pode chegar a 3490 metros em Vostok.

2.2 Configurações Numéricas

O modelo WRF (Skamarock *et al.*, 2008) versão 3.6.1 foi usado neste estudo com uma resolução horizontal de 40 km, com 127 x 134 pontos de grade na horizontal e 38 níveis verticais (1000hPa a 50hPa), cobrindo toda a Antártica (Figura 1). As simulações foram contínuas

para cada ano e abrangem o período de 1° de janeiro de 1999 a 31 dezembro de 2018. Os dados topográficos do WRF foram obtidos do *United States Geological Survey's* (<https://www.usgs.gov/>) com uma resolução de 2 minutos de grau. As condições de contorno inicial e lateral foram obtidas do *National Centers for Environmental Prediction (NCEP) operational global analysis (FNL) Klemm & Lilly* (1978), disponíveis a cada 6 horas com 1° x 1° de resolução (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/>). Neste estudo os esquemas de parametrizações usados foram baseados em revisões bibliográficas de diversos estudos de referência, sendo assim as seguintes parametrizações foram usadas. Esquema Dudhia para radiação de ondas curtas (Dudhia, 1989); o *Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)* para radiação de ondas longas baseado em Mlawer *et al.* (1997); o esquema de energia cinética turbulenta de Monin-Obhukov-Janjic (Janjic, 2001). Bromwich *et al.* (2013) encontraram para a temperatura uma boa concordância entre os dados observados e simulados pelo WRF usando esses esquemas de parametrizações na Antártica. Também usamos o esquema de microfísica WSM6 (Hong *et al.*, 2004). Comin *et al.* (2018) avaliaram vários esquemas microfísicos para eventos extremos de neve em topografia complexa nos Andes e identificaram que o WSM6 é mais adequado. Wu & Petty (2010) mostraram que o esquema WSM6 parece reproduzir os processos de nuvem e precipitação de maneira mais realista, comparados com outros esquemas de microfísica sobre as altas latitudes do Hemisfério Norte. A parametrização cúmulus de Kain-Fritsch (Kain, 2004), que é baseada em um modelo de nuvem simplificado que também inclui convecção superficial. Essa parametrização foi utilizada por Bromwich *et al.* (2016) em simulações no Ártico. O esquema não-local da camada limite planetária (CLP) da Yonsei University (YSU, Hong *et al.*, 2006;

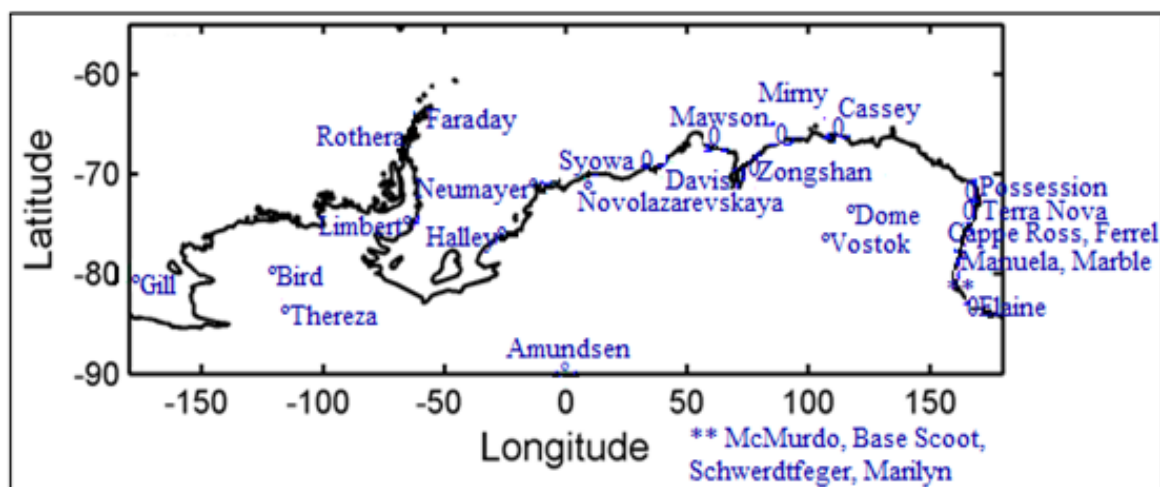


Figura 1 Localização geográfica das estações meteorológicas na Antártica sobre o domínio da grade de resolução horizontal de 40 km usada pelo WRF.

Hong *et al.*, 2010). Tastula & Vihma (2011) encontraram melhores resultados para a temperatura, na Antártica, usando este esquema de YSU. Os esquemas não-locais, em geral, representam uma circulação profunda de CLP com mais precisão do que os esquemas locais (Stull, 1991). O esquema de CLP afeta os perfis de umidade e temperatura na troposfera inferior que interagem na formação de nuvens e precipitação (Comin *et al.*, 2020). As simulações de superfície terrestre e gelo marinho são realizadas usando o esquema de superfície terrestre de Noah *land surface scheme* (Noah LSM, Chen & Dudhia, 2001). Este esquema é amplamente utilizado em simulações de eventos extremos, como temperatura, chuva e nevascas (por exemplo, Zeng

et al., 2012; Bromwich *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2013; Sultan *et al.*, 2016; Comin *et al.*, 2018).

3 Resultados e Discussão

3.1 Simulações Numéricas versus Observações

As Figuras 2, 3 e 4 mostram em detalhes as simulações numéricas versus observações para cada estação mostrada na Figura 1. A Tabela 1 mostram os resultados da REQM entre os dados simulados e observados, assim como as médias das temperaturas mínimas (T_{min}), máximas (T_{max}) e médias (T_{med}) para os dados simulados (WRF)

Tabela 1 Raiz do erro quadrático médio (REQM) para a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) entre os dados simulados e observados para cada estação meteorológica e valores de temperaturas máxima (T_{max}), mínima (T_{min}) e média (T_{med}) para os dados simulados (WRF) e observados (Obs).

Estações	REQM	T_{min} WRF	T_{min} Obs	T_{max} WRF	T_{max} Obs	T_{med} WRF	T_{med} Obs
Amundsen Scott	8,8	-53,9	-59,8	-21,2	-26,0	-42,7	-48,8
Byrd	6,7	-39,0	-34,5	-9,3	-14,3	-27,4	-26,0
Cape Ross	4,5	-23,1	-25,8	-4,9	-2,2	-15,7	-16,0
Casey	3,9	-14,9	-15	-1,8	-0,2	-10,5	-9,2
Davis	4,4	-18,3	-17,5	-4,2	0,6	-12,4	-10,0
Dome C II	7,2	-59,1	-62,0	-25,0	-24,6	-48,6	-50,9
Elaine	8,3	-26,0	-31,8	-5,1	-5,0	-17,2	-22,6
Faraday/Vernadsky	2,2	-4,7	-4,9	0,0	0,9	-2,6	-2,5
Ferrell	5,7	-30,2	-34,0	-9,1	-8,0	-20,8	-22,8
Gill	8,7	-42,6	-47,5	-15,7	-8,9	-34,7	-27,8
Halley	6,3	-24,5	-28,6	-3,8	-5,1	-15,0	-19,0
Limberty	7,6	-28,2	-33,0	-11,3	-7,7	-19,4	-21,9
Manuela	5,0	-23,3	-27,6	-4,9	-3,0	-15,7	-18,2
Marble_Point	5,0	-20,9	-26,1	-2,5	-2,1	-14,9	-16,3
Marilyn	5,8	-29,2	-32,7	-7,0	-7,0	-20,0	-22,8
Mawson	4,9	-20,9	-18,3	-4,6	-0,3	-14,2	-11,2
McMurdo	4,4	-26,1	-26,0	-5,6	-3,3	-17,3	-16,2
Mirny	3,8	-15,2	-16,1	-2,1	-1,3	-10,6	-11,1
Neumayer	8,4	-22,5	-25,6	-3,7	-3,0	-11,9	-16,0
Novolazarevskaya	5,1	-20,0	-17,9	-5,9	-0,5	-13,7	-10,1
Possession Island	6,0	-21,1	-20,5	-5,0	0,3	-13,9	-11,2
Rothera	4,1	-7,9	-9,7	-0,2	1,2	-3,4	-3,9
Schwerdtfeger	6,1	-33,2	-36,8	-9,0	-9,0	-23,4	-26,1
Scott Base	5,2	-26,2	-29,0	-6,4	-4,7	-17,3	-19,5
Syowa	3,6	-17,1	-17,5	-3,7	-1,2	-10,6	-10,5
Terra Nova Bay	4,9	-21,1	-21,1	-2,9	-1,0	-15,2	-14,1
Theresa	5,2	-34,8	-30,1	-10,0	-11,5	-25,1	-22,3
Vostok	8,2	-61,3	-65,9	-29,7	-31,0	-49,4	-54,5
Zhongshan	5,3	-19,0	-15,3	-4,4	-1,5	-12,4	-10,1

e observados (Obs). Observa-se, que em geral, as estações localizadas no interior do continente apresentaram as maiores REQM variando de 5,2°C (na estação de Thereza) a 8,8°C (em Amundsen Scott). As REQM também foram acentuadas nas regiões entre o Polo e próximas de 78°S. Isso se deve ao fato, de que as parametrizações do WRF, não foram aprimoradas o suficiente para simulação de temperatura próximo da superfície no Polo Sul, pois os esquemas de parametrização de sub-grade do WRF foram baseados em observações de latitudes médias (Boer *et al.*, 2012; Valkonen *et al.*, 2014). Nas outras estações a REQM variou entre 2,2°C em Faraday/Vernadsky a 8,8°C em Amundsen Scott. A T_{min} simulada pelo WRF foi superestimada em 22 estações comparada com as observações. Enquanto a temperatura máxima simulada foi superestimada em apenas 5 estações (Amundsen Scott, Byrd, Halley, Theresa e Vostok). Isso mostra que as simulações do modelo WRF possuem um ciclo de temperatura menos intenso do que nos dados observados, ou seja, a amplitude de temperatura simulada foi menor do que as observações. Em geral, a diferença entre T_{min}_WRF e T_{min}_Obs variaram entre 2

a 3°C com valores extremos entre 0,1°C (Cassey) a 5,9°C (Amundsen Scott), indicando que as simulações foram razoáveis, considerando que a Antártica possui os mais intensos gradientes de temperatura da terra (Hudson & Brandt, 2005).

As taxas da diferença entre T_{max}_WRF e T_{max}_obs variaram entre 0,4°C na estação de Marble Point a 6,8°C em Gill, mas na maior parte das estações as diferenças foram menores do que 3°C mostrando que as simulações foram consistentes. Na maioria das estações, em 22 delas, as temperaturas médias simuladas (T_{med}_WRF) concordam razoavelmente bem com as observações (T_{med}_Obs).

A Figura 2 mostra a dispersão da temperatura do ar média para as estações localizadas no setor oeste da Antártica (180°W a 0°W). Na Figura 2 A e C, notou-se uma subestimativa da temperatura simulada nas estações de Gill e Theresa com relação as observações. Nas outras estações (Fig. 2 B, D, E e G) a temperatura mínima foi superestimada no WRF. Para as temperaturas máximas os valores convergiram próximo da linha tangencial aos vértices, significando que as temperaturas foram bem reproduzidas.

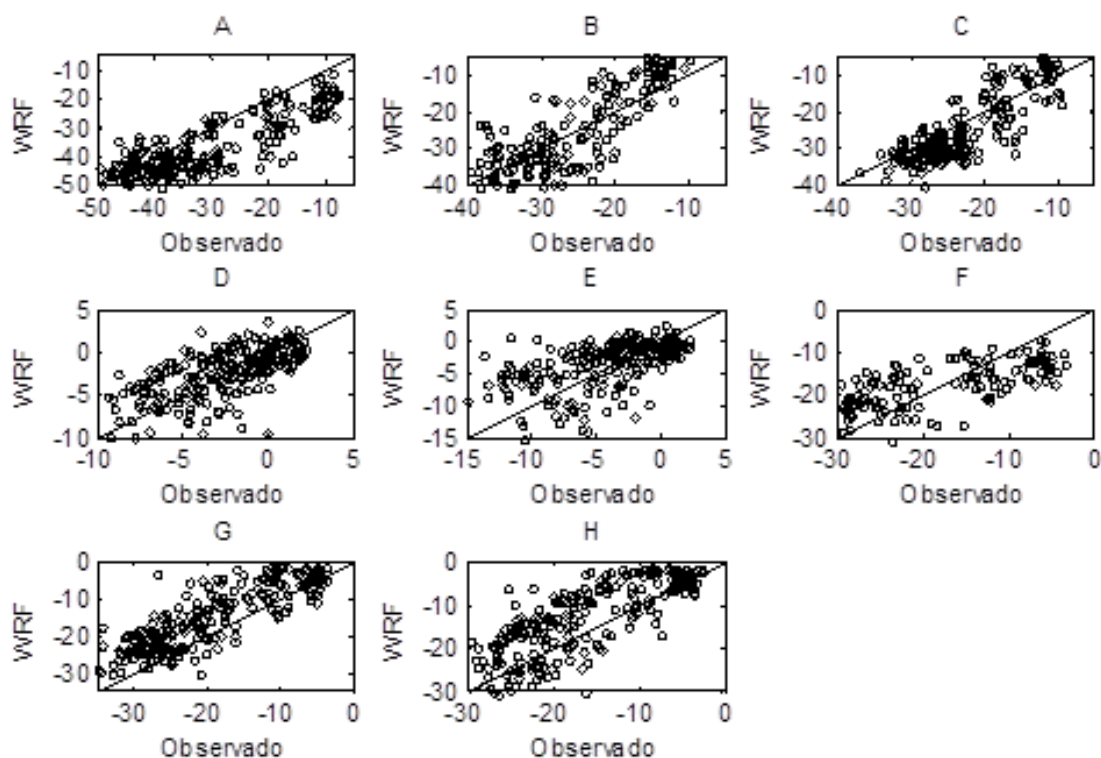


Figura 2 Temperatura do ar média mensal entre os dados observados e simulados pelo WRF para o período 1999-2018, para as estações localizadas entre 180°W a 0°W. A. Gill; B. Byrd; C. Theresa; D. Faraday/Vernadsky; E. Rothera; F. Limbert; G. Halley; H. Neumayer.

Exceto na estação de Limbert (Figura 2 F) em que as temperaturas mínimas foram superestimadas e as máximas subestimadas, possivelmente devido à grande complexidade topográfica a oeste da estação, que pode chegar até 2500 metros de altitude (Lachlan-Cope *et al.*, 2010). Observa-se, que alguns pontos estão espalhados horizontalmente, isso indica uma discrepância entre os valores do WRF e as observações, significando que o modelo não foi capaz de representar com precisão a variabilidade observada da temperatura. Este problema pode ser devido à má representação da umidade específica e de água precipitável pelo modelo, que prejudica o desempenho da simulação da temperatura do ar (Bromwich *et al.*, 2013) e pelo déficit no fluxo de ondas longas (Guo *et al.*, 2003) sobre a Antártica. Outros estudos mostraram que o modelo WRF não simulou adequadamente a precipitação de chuva de nuvens estratiformes, por exemplo, Snively & Gallus Jr. (2014). Essa deficiência na cobertura de nuvens simulada pelo WRF pode impactar na correta estimativa das temperaturas. Outro problema atribuído pode ser devido à falta de uma adequada representação de cobertura de neve do WRF, que limita a qualidade do desempenho das variáveis termodinâmicas, conforme constatado por Comin (2012) em estudos realizados na região da península Antártica para o período 5 a 23 de fevereiro de 2011.

A Figura 3 mostra a dispersão da temperatura para as estações entre 0°E a 90°E na Antártica. Na estação de Amundsen (Figura 3A), localizada sobre o Polo, o WRF não reproduziu satisfatoriamente a temperatura, observou-se uma superestimativa em praticamente todo o período, indicando que o ciclo simulado foi suavizado comparado com as observações. Nas outras estações (Figura 3 B-F),

entre 66°S a 71°S, as simulações foram bem razoáveis, apesar de ter uma superestimativa da temperatura mínima e subestimativa da temperatura máxima. Nessa região de latitudes mais baixas, o desempenho do WRF foi melhor se comparado com outras estações ao sul de 78°S (ver REQM Tabela 1) e com as estações localizadas no interior da Antártica.

A Figura 4 mostra as estações entre 90°E a 180°E. A superestimativa da Tmin foi bastante evidente para a maioria dessas estações, ao contrário, a Tmax foi melhor simulada em comparação com as observações (Tabela 1). A Figura 4 (A, C, D, G, H, I, N e O) a Tmax foi razoavelmente bem reproduzida, nas outras estações foi subestimada. Na estação de Elaine (Figura 4 P) a temperatura simulada pelo WRF foi superestimada em todo o período.

A parametrização de Noah LSM, amplamente usada no WRF, possui um viés negativo para o equivalente da água em neve no início da primavera (Jin & Miller, 2007). As simulações com o esquema de superfície Noah LSM superestimam a precipitação devido a uma atmosfera instável que causa um aumento do movimento ascendente e conseqüentemente aumenta taxas de evaporação na superfície (Livneh *et al.*, 2010). Isso pode contribuir para uma superestimativa da temperatura mínima simulada na Antártica e uma subestimativa nas temperaturas máximas. A camada espessa de neve tende a subestimar o fluxo de calor do solo, deixando muita energia na superfície da neve e sendo portanto, muito favorável ao derretimento da neve e aumento das temperaturas (Niu *et al.*, 2011). Comin *et al.* (2016) fizeram vários experimentos com WRF na ilha Deception, Antártica, e encontraram um ciclo para a temperatura menos amplo nas simulações WRF do que nos

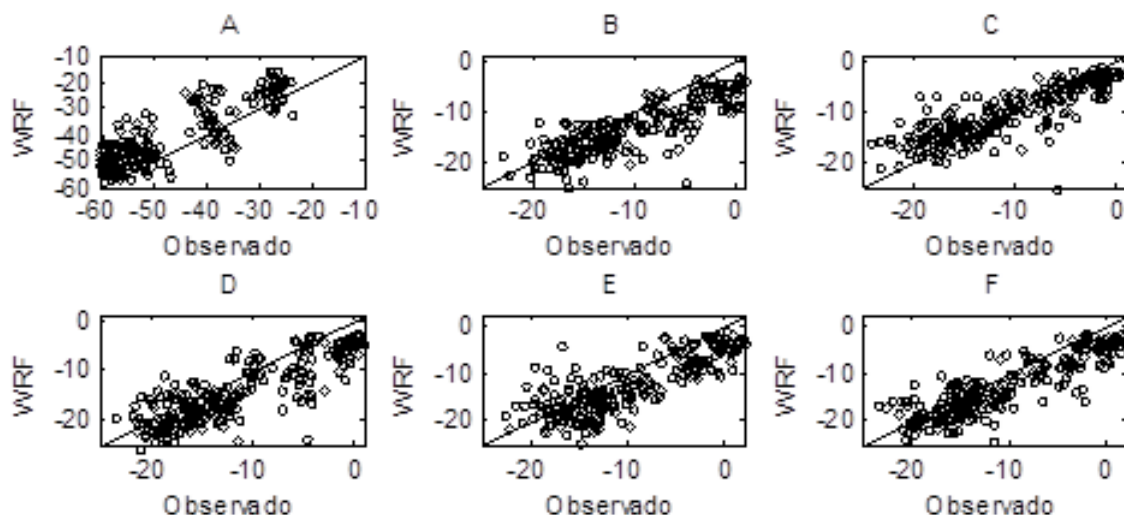


Figura 3 Temperatura do ar média mensal entre os dados observados e simulados pelo WRF para o período 1999-2018, para as estações localizadas entre 0°E a 90°E. A. Amundsen; B. Novolazarevskaya; C. Syowa; D. Mawson; E. Zhongshan; F. Davis.

dados observados. Eles encontraram uma superestimativa na temperatura mínima simulada de 2°C em comparação com as observações. Yao *et al.* (2016) mostraram que o WRF (usando Noah LSM) superestima a temperatura anual em

aproximadamente 6°C na Antártica. Na Península Antártica, a superestimativa de temperatura na região leste variou entre 0 e 1°C, e na região oeste entre 2 e 3°C em experimentos WRF para fevereiro de 2010 (Listowski & Lachlan-Cope, 2017).

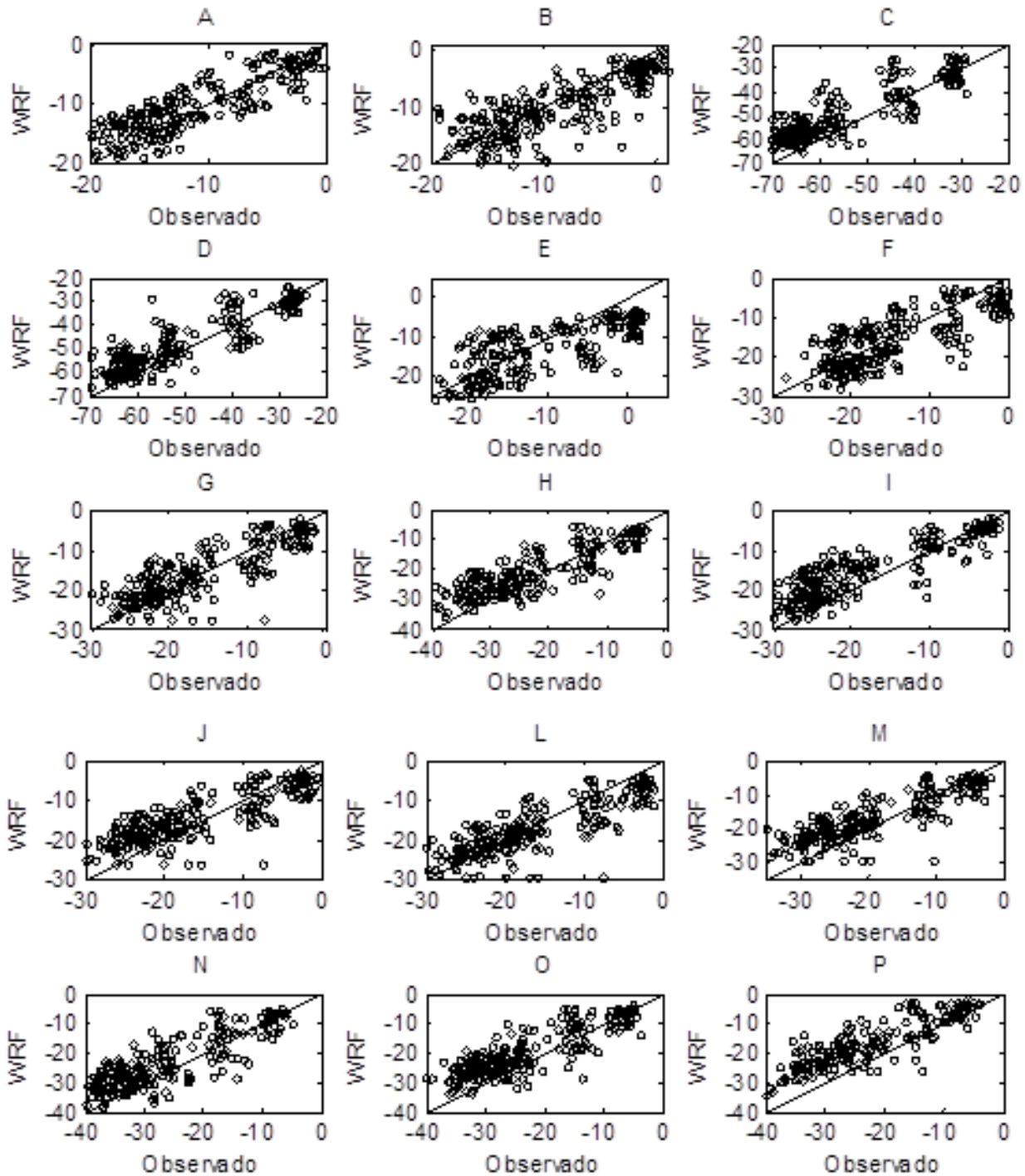


Figura 4 Temperatura do ar média mensal entre os dados observados e simulados pelo WRF para o período 1999-2018, para as estações localizadas entre 90°E a 180°E. A. Mirny; B. Casey; C. Vostok; D. Dome; E. Possession; F. Terra Nova Bay; G. Cape Ross; H. Ferrel; I. Manuela; J. Marble Point; L. McMurdo; M. Scott; N. Schwerdtfeger; O. Marilyn; P. Elaine.

As maiores diferenças entre a temperatura observada e simulada pelo WRF, pode ser atribuídas também a dificuldade do modelo em representar a topografia, principalmente nas estações em altas altitudes como: Amundsen (2835 m de altitude), Byrd (1515 m de altitude), Theresa (1463 m de altitude) e Vostok (1490 m de altitude), devido a baixa resolução horizontal do WRF. A topografia é suavizada em modelos numéricos (Comin, 2012). Esse problema também foi evidente em regiões vizinhas de topografia acentuada, como nas estações de Elaine, Limbert e Ferrell.

3.2 Análise Estatística

A capacidade do modelo WRF para simular a temperatura foi analisada usando o Diagrama de Taylor

(Taylor, 2001). O diagrama fornece o coeficiente de correlação linear (CC) e o desvio padrão (DP) entre simulações e observações com nível de significância de 95%. Portanto, $CC = 1$ e $DP = 1$ indicam uma combinação perfeita na região considerada. O diagrama de Taylor mostrou uma análise estatística concisa para temperatura do modelo WRF comparado com as observações. Em geral, todas as estações meteorológicas (Figura 5 A, B, C) foram bem representadas com correlações entre 0,61 a 0,87 com nível de confiabilidade de 95%, e desvio padrão variando de 0,5 a 1,5°C para a maioria das estações. Nas estações localizadas na Antártica Ocidental (de 0°W a 180°W) o desvio padrão variou entre 0,7 a 1,3°C, exceto a estação de Limbert que teve maior desvio padrão 2°C, possivelmente devido a grande complexidade topográfica a oeste da estação. Na Antártica Oriental, na região de 0°E a 90°E,

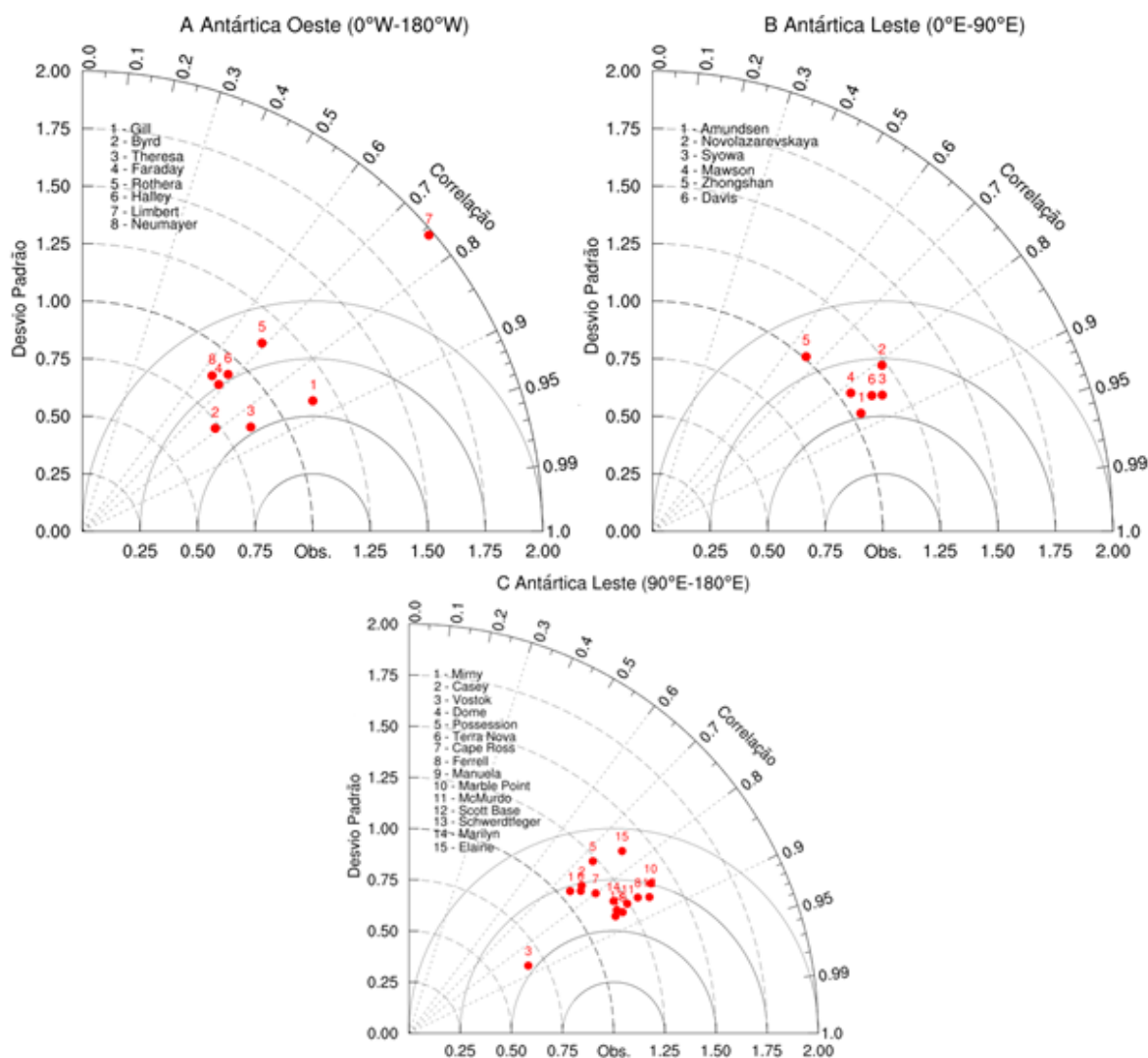


Figura 5 Diagrama de Taylor mostrando os desvios padrão e as correlações para as estações na Antártica nas seguintes regiões: A. 0°W a 180°W; B. 0°E a 90°E; C. 90°E a 180°E.

o desvio padrão variou entre 1 a 1,3°C, e nas estações entre 90°E a 180°E, a taxa de desvio padrão foi entre 0,6 a 1,4°C para a maioria das estações, mostrando que as simulações WRF foram consistentes com as observações.

Tastula & Vihma (2011) realizaram simulações com WRF para a temperatura do ar para julho de 1998 na Antártica. Nas estações de Cassey, Davis, Halley, Neumayer, Rothera, Syowa e Vostok eles encontraram uma taxa de correlação entre 0,6 a 0,9, resultados semelhantes aos mostrados aqui. Outros estudos utilizando WRF, na Antártica, mostram correlação para a temperatura do ar variando de 0,59 a 0,61 em janeiro de 2007, enquanto em julho de 2007 a correlação foi de 0,77 (Bromwich *et al.*, 2013). Deb *et al.* (2016) usando o WRF encontraram, por exemplo, na estação de Byrd, uma correlação de 0,79 para a temperatura do ar. De acordo com as estatísticas, os resultados do modelo concordaram razoavelmente com as observações, indicando que o WRF foi adequado para simular os fortes gradientes termais nessa região.

4 Conclusões

Em geral, as simulações com o modelo WRF mostraram que podem ser usadas como uma ferramenta adequada para fornecer informações próximas da realidade em uma região de gradientes térmicos intensos como a Antártica. Exceto para algumas estações, em altas altitudes, por exemplo, Amundsen e Elaine, em que a temperatura apresentou uma discrepância entre os dados simulados e observados, problemas que podem ser atribuídos a baixa resolução espacial nas simulações. Nessas estações o WRF superestimou as temperaturas durante todo o período. As temperaturas máximas foram melhores reproduzidas do que as temperaturas mínimas. Em geral, observou-se uma superestimativa da temperatura mínima e subestimativa da temperatura máxima. Esse problema pode ser devido a dificuldade do modelo em estimar a quantidade correta de umidade da atmosfera e pela subestimativa do fluxo de calor do solo, devido a camada de neve espessa em superfície (Niu *et al.*, 2011). Para a maioria das estações as simulações WRF concordam razoavelmente com as observações, as correlações entre os dados simulados e observados são significativas variando entre 0,61 a 0,87 e os desvios padrão entre 0,5 a 1,5°C. O ciclo de temperatura mensal é razoavelmente representado pelo WRF (não mostrado).

Os resultados discutidos e apresentados no presente artigo mostraram que o modelo WRF e as parametrizações adotadas foram eficazes na representação da temperatura do ar na Antártica, uma vez que houve uma concordância com os dados observados e por isso podem ser usados para dar suporte à inexistência de dados. E também poderá ser usado para obtenção de dados em outros estudos, por exemplo, na previsão de temperatura horária, facilitando o trabalho de pesquisadores e cientistas nessa região.

5 Agradecimentos

Este estudo foi financiado com recurso próprio. Agradeço parcialmente a CAPES-PNPD (1671778).

6 Referências

- Boer, G.; Chapman, W.; Kay, J.E.; Medeiros, B.; Shupe, M.D.; Vavrus, S. & Walsh, J. 2012. A characterization of the present-day Arctic atmosphere in CCSM4. *Journal of Climate*, 25(8): 2676-2695. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00228.1>
- Bromwich, D.H.; Hines, K.M. & Bai, L.S. 2009. Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting model: 2. Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 114(D08122): 1-22. <https://doi.org/10.1029/2008JD010300>
- Bromwich, D.H. & Cassano, J.J. 2001. Meeting Summary: Antarctic Weather Forecasting Workshop. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82: 1409-1413.
- Bromwich, D.H.; Otieno, F.O.; Hines, K.M.; Manning, K.W. & Shilo, E. 2013. Comprehensive evaluation of polar weather research and forecasting model performance in the Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118: 274-292. <https://doi.org/10.1029/2012JD018139>
- Bromwich, D.H.; Wilson, A.B.; Bai, L.S.; Moore, G.W. K. & Bauer, P. 2016. A comparison of the regional Arctic System reanalysis and the global ERA-Interim Reanalysis for the Arctic. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142: 644-658. <https://doi.org/10.1002/qj.2527>
- Chen, F. & Dudhia, J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129: 569-585. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2)
- Comin, A.N. 2012. *Sensibilidade às parametrizações físicas do WRF nas previsões dos parâmetros atmosféricos em Shetland do Sul e Deception*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, 72p.
- Comin, A.N. & Acevedo, O.C. 2017. Numerical simulation of sea breeze convergence over Antarctic peninsula. *Advances in Meteorology*, 2017(ID7686540): 1-11. <https://doi.org/10.1155/2017/7686540>
- Comin, A.N.; Schumacher, V.; Justino, F. & Fernández, A. 2018. Impact of Different Microphysical Parameterizations on Extreme Snowfall Events in the Southern Andes. *Weather and Climate Extremes*, 21: 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.07.001>
- Comin, A.N.; Souza, R.B.; Acevedo, O.C. & Anabor, V. 2016. Analysis of Weather Research and Forecasting (WRF) Model with Different Schemes Microphysics and Planetary Boundary Layer on the Island Deception, Antarctica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 3(4): 415-427. <https://doi.org/10.1590/0102-778631231420150027>
- Comin, A.N.; Justino, F.; Pezzi, L.; Gurjão, C.D.; Schumacher, V.; Fernández, A. & Sutil, U.A. 2020. Extreme rainfall event in the Northeast coast of Brazil: a numerical sensitivity study. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2020: 1-22. <https://doi.org/10.1007/s00703-020-00747-0>

- Chapman, W.L. & Walsh, J.E. 2007. Simulations of Arctic temperature and pressure by global coupled models. *Journal of Climate*, 20: 609-632. <https://doi.org/10.1175/JCLI4026.1>
- Convey, P.; Bindschadler, R.; Prisco, G.; Fahrbach, E.; Gutt, J.; Hodgson, D.A.; Mayewski, P.A.; Summerhayes, C.P. & Consortium, A.C.C.E. 2009. Antarctica climate change and the environment. *Antarctic Sciences*, 21(6): 541-563. <https://doi.org/10.1017/S0954102009990642>
- Deb, P.; Orr, A.; Hosking, J. S.; Phillips, T.; Turner, J.; Bannister, D.; Pope, J.O. & Colwell, S. 2016. An assessment of the Polar Weather Research and Forecast (WRF) model representation of near-surface meteorological variables over West Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121: 1532-1548. <https://doi.org/10.1002/2015JD024037>
- Dudhia, J. 1989. Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon 661 Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46: 3077-3107. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2)
- Guo, Z.; Bromwich, D.H. & Cassano, J.J. 2003. Evaluation of Polar MM5 simulations of Antarctic atmospheric circulation. *Monthly Weather Review*, 131: 384-411. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0384:EOPMSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0384:EOPMSO>2.0.CO;2)
- Hines, K.M. & Bromwich, D.H. 2008. Development and Testing of Polar Weather Research and Forecasting (WRF) Model. Part I: Greenland Ice Sheet Meteorology. *Monthly Weather Review*, 136: 1971-1989. <https://doi.org/10.1175/2007MWR2112.1>
- Hole, L.; Bello, A.; Roberts, T., Voss, P. & Vihma, T. 2016. Measurements by controlled meteorological balloons in coastal areas of Antarctica. *Antarctic Science*, 28(5): 387-394. <https://doi.org/10.1017/S0954102016000213>
- Hong, S.-Y.; Dudhia, J. & Chen, S.-H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 132: 103-120. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2)
- Hong, S.Y.; Noh, Y. & Dudhia, J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134(9): 2318-2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Hong, S.Y.; Lee, Y.-H.; Ha, J.-C.; Kim, H.-W.; Ham, S.-J. & Dudhia, J. 2010. Evaluation of the WRF double-moment 6-class microphysics scheme for precipitating convection. *Advances in Meteorology*, 2010(ID707253): 1-11. <https://doi.org/10.1155/2010/707253>
- Hudson, S.R. & Brandt, R.E. 2005. A Look at the Surface-Based Temperature Inversion on the Antarctic Plateau. *Journal of Climate*, 18: 1673-1696. <https://doi.org/10.1175/JCLI3360.1>
- Janjic, Z.I. 2001. Nonsingular implementation of the Mellor–Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model. *NCEP Technical Report*, 437: 1-61.
- Jin, J. & Miller, N.L. 2007. Analysis of the impact of snow on daily weather variability in mountainous regions using MM5. *Journal of Hydrometeorology*, 8: 245-258. <https://doi.org/10.1175/JHM565.1>
- Kain, J.S. 2004. The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, 43: 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
- Klemp, J.B. & Lilly, D.K. 1978. Numerical simulation of hydrostatic mountain waves. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35: 78-107. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1978\)035<0078:NSOHMW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1978)035<0078:NSOHMW>2.0.CO;2)
- Lachlan-Cope, T.; Listowski, C. & O’Shea, S. 2017. The microphysics of clouds over the Antarctic Peninsula – Part 1: Observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16: 15605-15617. <https://doi.org/10.5194/acp-16-15605-2016>
- Laine, V. 2008. Antarctica ice sheet and sea ice regional albedo and temperature change, 1981-2000, from AVHRR Polar Pathfinder data. *Remote Sensing of Environment*, 112: 646-653. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.005>
- Li, D.; Zeid, E.B.; Baeck, M.L.; Jessup, S. & Smith, J.A. 2013. Modeling Land Surface Processes and Heavy Rainfall in Urban Environments: Sensitivity to Urban Surface Representations. *Journal of Hydrometeorology*, 14: 1098-1118. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0154.1>
- Listowski, C. & Lachlan-Cope, T. 2017. The microphysics of clouds over the Antarctic Peninsula – Part 2: modelling aspects with in Polar WRF. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17: 10195-10221. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10195-2017>
- Livneh, B.; Xia, Y.; Mitchell, K.E.; Ek, M.B. & Lettenmaier, D.P. 2010. Noah LSM snow model diagnostics and enhancements. *Journal of Hydrometeorology*, 11(3): 721-738. <https://doi.org/10.1175/2009JHM1174.1>
- Mlawer, E.J.; Taubman, S.J.; Brown, P.D.; Iacono, M.J. & Clough, S.A. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, 102: 16663-16682. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>
- Monaghan, A.J.; Bromwich, D.H.; Powers, J.G.; Manning, K.W. 2005. The climate of the McMurdo, Antarctica, region as represented by one year of forecasts from the Antarctic Mesoscale Prediction System. *Journal of Climate*, 18: 1174-1189. <https://doi.org/10.1175/JCLI3336.1>
- Niu, G.U.; Yang, Z.L.; Kenneth, E.M.; Chen, F.; Michael, B.E.; Barlage, M.; Kumar, A.; Niyogi, D.; Rosero, E.; Tewari, M. & Xia, Y. 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research*, 116(D12019):1-19. <https://doi.org/10.1029/2010JD015139>
- Powers, J.G. 2007. Numerical Prediction of an Antarctica Severe Wind Event with the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Monthly Weather Review*, 135: 3134-3157. <https://doi.org/10.1175/MWR3459.1>
- Skamarock, W.C.; Klemp, J.B.; Dudhia, J.; Gill, D.O.; Barker, D.M.; Wang, W. & Powers, J.G. 2008. A description of the Advanced Research WRF Version 3. *National Center for Atmospheric Research Technical Note*. Boulder, USA, p. 1-113. (Series TN-475+STR). <http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- Snively, D.V.; Gallus Jr. & W.A. 2014. Prediction of convective morphology in near-cloud-permitting WRF model simulations. *Weather and Forecasting*, 29: 130-149. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-13-00047.1>

- Stull, R.B. 1991. Static stability-An update. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 72: 1521-1529. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1991\)072<1521:SSU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1991)072<1521:SSU>2.0.CO;2)
- Sultan, S.; Hui, L.; Riaz, M.; Babar, Z.A.; Renguang, W.; Ahmad, I.; Shad, M.A. & Aslam, C.M. 2016. Impact of land surface models on simulation of extreme rainfall events over upper 888 catchments of the River Indus. *Pakistan Journal of Meteorology*, 13: 39-49.
- Tastula, E.-M. & Vihma, T. 2011. WRF model experiments on the Antarctica atmosphere in winter. *Monthly Weather Review*, 139: 1279-1291. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3478.1>
- Taylor, K.E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, 106(D7): 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Turner, J.; Colwell, S.R.; Marshall, G.J.; Lachlan-Cope, T.A.; Carleton, A.M.; Jones, P.D.; Lagun, V.; Reid, P.A. & Iagovkina, S. 2005. Antarctic climate change during the last 50 Years. *International Journal of Climatology*, 25: 279- 294. <https://doi.org/10.1002/joc.1130>
- Valkonen, T.; Vihma, T.; Johansson, M.M. & Launiainen, J. 2014. Atmosphere–sea ice interaction in early summer in the Antarctica: Evaluation and challenges of a regional atmospheric model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140: 1536-1551. <https://doi.org/10.1002/qj.2237>
- Waugh, D.W. & Randel, W.J. 1999. Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56: 1594-1613. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1594:COAAAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1594:COAAAP>2.0.CO;2)
- Wu, L. & Petty, G.W. 2010. Intercomparison of Bulk Microphysics Schemes in Model Simulations of Polar Lows. *Monthly Weather Review*, 138: 2211-2228. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3122.1>
- Yao, Y.; Huang, J.; Luo, Y. & Zhao, Z. 2016. An upgraded scheme of surface physics for Antarctic ice sheet and its implementation in the WRF. *Science Bulletin*, 61(7): 576-584. <https://doi.org/10.1007/s11434-016-1029-7>
- Yver, C.E.; Graven, H.D.; Lucas, D.D.; Cameron-Smith, P.J.; Keeling, R.F. & Weiss, R.S. 2013. Evaluating transport in the WRF model along the California coast. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13: 1837-1852. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1837-2013>
- Zeng, X.M.; Wu, Z.H.; Song, S.; Xiong, S.Y.; Zheng, Y.Q.; Zhou, Z.G. & Liu, H.Q. 2012. Effects of different land-surface schemes on the simulation of a heavy rainfall event by WRF. *Chinese Journal of Geophysics*, 55: 394–408. <https://doi.org/10.1002/cjg2.1734>

Recebido em: 15/07/2020

Aprovado em: 18/11/2020

How to cite:

Comin, A.N. 2021. Simulação Numérica Regional para a Temperatura do Ar no Continente Antártico. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44: 36417. DOI 1982-3908_2021_44_36417