



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**ANÁLISE SINÓTICA E NUMÉRICA DE EVENTOS  
DE GEADA NO SUDESTE DO BRASIL**

---

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO**

**Camila Ribeiro Sapucci**

**Itajubá, MG, Brasil**

**2018**

# **ANÁLISE SINÓTICA E NUMÉRICA DE EVENTOS DE GEADA NO SUDESTE DO BRASIL**

---

por

**Camila Ribeiro Sapucci**

Monografia apresentada à comissão examinadora do Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Bacharel em Ciências Atmosféricas.**

**Orientadora: Prof. Dra. Vanessa Silveira Barreto Carvalho**  
**Coorientadora: Prof. Dra. Michelle Simões Reboita**

**Itajubá, MG, Brasil**  
**2018**



**Universidade Federal de Itajubá  
Instituto de Recursos Naturais  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

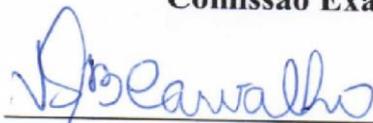
**ANÁLISE SINÓTICA E NUMÉRICA DE EVENTOS DE GEADA NO  
SUDESTE DO BRASIL**

elaborada por

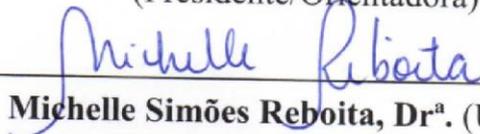
**Camila Ribeiro Sapucci**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Bacharel em Ciências Atmosféricas**

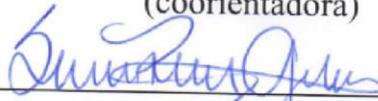
**Comissão Examinadora:**



**Vanessa Silveira Barreto Carvalho, Dr<sup>a</sup>.** (UNIFEI)  
(Presidente/Orientadora)



**Michelle Simões Reboita, Dr<sup>a</sup>.** (UNIFEI)  
(coorientadora)



**Sâmia Regina Garcia Calheiros, Dr<sup>a</sup>.** (UNIFEI)

Itajubá, 30 de outubro de 2018.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, irmãos e demais familiares por todo carinho, apoio e incentivo durante os últimos quatro anos.

À Prof. Vanessa Silveira, por todo o conhecimento transmitido, incentivo e confiança durante os três anos de Iniciação Científica e durante a realização deste trabalho.

Aos demais professores do curso de Ciências Atmosféricas da UNIFEI, em especial a Prof. Michelle Reboita, por todo o conhecimento compartilhado, apoio e prontidão a ajudar.

Aos colegas de Ciências Atmosféricas da turma de 2015, por todos os momentos compartilhados, companheirismo e amizade.

Ao colega da meteorologia e ex-aluno de CAT, Bruno de Campos, por todo o auxílio durante a execução do WRF.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro da Iniciação Científica que resultou neste trabalho.

Ao INMET, ECMWF e NCEP pelo fornecimento dos dados utilizados na execução da pesquisa.

E a todos àqueles que de certa forma contribuíram para que este trabalho fosse possível, seja através de palavras de incentivo, pela amizade e apoio.

## **RESUMO**

Trabalho Final de Curso  
Curso de Graduação em Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

### **ANÁLISE SINÓTICA E NUMÉRICA DE EVENTOS DE GEADA NO SUDESTE DO BRASIL**

AUTORA: CAMILA RIBEIRO SAPUCCI  
ORIENTADORA: PROF. DRA. VANESSA SILVEIRA BARRETO CARVALHO  
COORIENTADORA: PROF. DRA. MICHELLE SIMÕES REBOITA  
Local e Data da Defesa: Itajubá, 30 de outubro de 2018.

A geada é um fenômeno meteorológico que ocorre sob condições de temperatura do ar de zero grau ou abaixo e que pode causar danos às plantas, impactando o setor econômico da agricultura. A região Sudeste do Brasil registra a ocorrência de geadas, principalmente, durante os meses de maio a setembro. A maioria dos estudos sobre a ocorrência de geadas no Sudeste se dá de forma indireta através da análise de ondas de frio. Diante da necessidade de ampliar a literatura desse tema e do impacto que as geadas acarretam na produção agrícola, o presente estudo tem por objetivo avaliar as condições sinóticas predominantes durante a ocorrência de eventos de geada na região Sudeste. Para tanto, um levantamento da ocorrência de geadas no Sudeste entre os anos de 2009 e 2017 foi realizado. Considerando-se as cidades em estudo, obteve-se uma frequência de ocorrência de geadas de aproximadamente 20 dias por ano. Foram selecionados três períodos com ocorrência de geada para análise sinótica e numérica. Foram comparados os campos meteorológicos construídos com dados de reanálise e os campos provenientes das simulações com o modelo de mesoescala WRF. Em geral, a condição predominante para ocorrência de geadas no Sudeste é a atuação de alta pressão associada ao Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul sobre a região, que promove intenso resfriamento noturno. O WRF apresentou elevada habilidade em simular os campos meteorológicos de escala sinótica, de modo que as saídas do modelo podem ser utilizadas com eficácia na análise de padrões sinóticos que forneçam indicativos para a ocorrência de geadas no Sudeste. A previsão pontual de geadas utilizando o modelo não é indicada, já que o WRF apresenta deficiências na representação da topografia e conseqüentemente das variáveis associadas com a ocorrência do fenômeno.

Palavras-chave: Geadas. Sistemas Atmosféricos. WRF. Análises Estatísticas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Padrão sinótico de Poço dos Andes.....	3
Figura 2 – Gráfico de Belfort de Matos.....	5
Figura 3 – Topografia da Região Sudeste com destaque para a região da Serra da Mantiqueira.....	8
Figura 4 – Componentes do ARW.....	11
Figura 5 – Representação das grades simuladas pelo WRF.....	13
Figura 6 – Composições geradas para os casos de geada ocorridos na região Sudeste no período de 2009 a 2017: (a) média de PNMM, temperatura e vento em 925 hPa; (b) climatologia de PNMM, temperatura e vento em 925 hPa para o período de maio a setembro de 1980 a 2016; (c) anomalia de PNMM, temperatura e vento em 925 hPa; (d) média de altura geopotencial em 500 hPa; (e) climatologia de altura geopotencial em 500 hPa para o período de maio a setembro de 1980 a 2016; (f) anomalia de altura geopotencial em 500 hPa. Nas Figuras (a), (b) e (c), a temperatura (em °C) é representada pelas cores, a PNMM (em hPa) pelas linhas contínuas na cor preta e a direção e intensidade do vento (em m/s) por vetores. Nas Figuras (d), (e) e (f) a altura geopotencial (em m) é representada por linhas na cor azul.....	20
Figura 7 – Campos sinóticos do evento 1 do horário das 12:00 Z para os dados da ERA-Interim e dados do WRF de PNMM (em hPa, representada por linhas contínuas na cor preta) e espessura da camada de 1000-500 hPa (em m, representada por linhas tracejadas em vermelho), altura geopotencial (em m, representada por linhas contínuas na cor azul) em 500 hPa e temperatura (em °C, representada pelas cores) e vento em 925 hPa (em m/s, representado por vetores), respectivamente, para os dias: (a), (b), (c), (d), (e) e (f) 20/jun; (g), (h), (i), (j), (k) e (l) 22/jun; (m), (n), (o), (p), (q) e (r) 23/jun. As figuras (s), (t), (u), (v), (w) e (x) são imagens do satélite GOES-10 no canal do visível para os dias 19/jun, 20/jun, 21/jun, 22/jun, 23/jun e 24/jun, respectivamente, para o horário das 16:00 Z.....	23

Figura 8 – Comparação entre os resultados obtidos com o WRF e os dados observados de T, Td e UR, respectivamente, para as cidades de: (a), (b) e (c) Caldas; (d), (e) e (f) Maria da Fé; (g), (h) e (i) Passa Quatro.....	28
Figura 9 – Comparação entre a direção e velocidade do vento observada e simulada pelo WRF, respectivamente, para as cidades de: (a) e (b) Caldas; (c) e (d) Maria da Fé; (e) e (f) Passa Quatro.....	30
Figura 10 – Campos sinóticos do evento 2 do horário das 12:00 Z para os dados da ERA-Interim e dados do WRF de PNMM (em hPa, representada por linhas contínuas na cor preta) e espessura da camada de 1000-500 hPa (em m, representada por linhas tracejadas em vermelho), altura geopotencial (em m, representada por linhas contínuas na cor azul) em 500 hPa e temperatura (em °C, representada pelas cores) e vento em 925 hPa (em m/s, representado por vetores), respectivamente, para os dias: (a), (b), (c), (d), (e) e (f) 01/jul; (g), (h), (i), (j), (k) e (l) 05/jul; (m), (n), (o), (p), (q) e (r) 09/jul. As figuras (s), (t), (u), (v), (w) e (x) são imagens do satélite GOES-12 no canal do visível para os dias 01/jul, 03/jul, 05/jul, 07/jul, 08/jul e 09/jul, respectivamente, para o horário das 16:00 Z.....	32
Figura 11 – Comparação entre os resultados obtidos com o WRF e os dados observados de T, Td e UR, respectivamente, para as cidades de: (a), (b) e (c) Campos do Jordão (d), (e) e (f) Maria da Fé.....	36
Figura 12 – Comparação entre a direção e velocidade do vento observada e simulada pelo WRF, respectivamente, para a cidade de Maria da Fé.....	37
Figura 13 – Comparação entre os resultados obtidos com o WRF e os dados observados de T, Td e UR, respectivamente, para as cidades de: (a), (b) e (c) Caldas; (d), (e) e (f) Campos do Jordão; (g), (h) e (i) Maria da Fé.....	40
Figura 14 – Comparação entre a direção e velocidade do vento observada e simulada pelo WRF, respectivamente, para as cidades de: (a) e (b) Caldas; (c) e (d) Maria da Fé.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Períodos selecionados para análise sinótica e numérica da ocorrência de geadas no Sudeste do Brasil.....	12
Tabela 2 – Ocorrência de geadas no Sudeste do Brasil, por cidade, no período de 2009 a 2017.....	18
Tabela 3 – Ocorrência mensal de geadas no Sudeste do Brasil, por cidade, no período de 2009 a 2017.....	18
Tabela 4 – Datas de ocorrência dos casos de geada do evento 1 por cidade.....	21
Tabela 5 – Estatísticas calculadas para as estações meteorológicas de Caldas, Maria da Fé e Passa quatro e para os resultados do WRF extraídos para essas localidades para o evento 1.....	26
Tabela 6 – Datas de ocorrência dos casos de geada do evento 2 por cidade.....	31
Tabela 7 – Estatísticas calculadas para as estações meteorológicas de Campos do Jordão e Maria da Fé para os resultados do WRF extraídos para essas localidades para o evento 2.....	35
Tabela 8 – Datas de ocorrência dos casos de geada do evento 3 por cidade.....	38
Tabela 9 – Estatísticas calculadas para as estações meteorológicas de Caldas, Campos do Jordão e Maria da Fé e para os resultados do WRF extraídos para essas localidades para o evento 3.....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ASAS – Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

ARW – *Advanced Research WRF*

CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

d – Índice de concordância

ECMWF – *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

GFS – *Global Forecast System*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

ME – Erro médio

NCAR – *National Center for Atmospheric Research*

NCEP – *National Centers for Environmental Prediction*

NMM – *Nonhydrostatic Mesoscale Model*

PNMM – Pressão ao nível médio do mar

PNT – Previsão numérica de tempo

r – Coeficiente de correlação de Pearson

RMSE – Raiz quadrada do erro médio quadrático

T – Temperatura do ar

Td – Temperatura do ponto de orvalho

UR – Umidade relativa

WRF – *Weather and Research Forecast*

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

$\bar{x}$  – Média da variável observada

$\bar{y}$  – Média da variável simulada

$\sigma_x$  – Desvio-padrão da variável observada

$\sigma_y$  – Desvio-padrão da variável simulada

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1 Objetivos Geral e Específicos</b> .....	6
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	8
<b>2.1 Descrição da área de estudo</b> .....	8
<b>2.2 O modelo de mesoescala WRF</b> .....	9
<b>2.3 Levantamento da ocorrência de geadas e seleção dos períodos de estudo</b> .....	11
<b>2.4 Análise sinótica da ocorrência de geadas no Sudeste do Brasil</b> .....	12
<b>2.5 Análise numérica da ocorrência de geadas no Sudeste do Brasil: simulação com o WRF e validação dos resultados</b> .....	13
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	17
<b>3.1 Levantamento da ocorrência de geadas no Sudeste e condições sinóticas associadas</b> .....	17
<b>3.2 Análise dos casos selecionados</b> .....	20
<b>3.2.1 Evento 1</b> .....	21
<b>3.2.2 Comparação com dados observados para o evento 1</b> ..	25
<b>3.2.3 Evento 2</b> .....	30
<b>3.2.4 Comparação com dados observados para o evento 2</b> ..	34
<b>3.2.5 Evento 3</b> .....	37
<b>3.2.6 Comparação com dados observados para o evento 3</b> ..	38
<b>4. CONCLUSÃO</b> .....	44
<b>5. REFERÊNCIAS</b> .....	47
<b>APÊNDICE</b> .....	55

## 1. INTRODUÇÃO

As geadas são fenômenos meteorológicos que se formam sob condições de temperatura de relva igual ou inferior a 0 °C, formando cristais de gelo sobre a superfície pela sublimação do vapor d'água (VAREJÃO-SILVA, 2005).

O setor da economia mais afetado pela ocorrência de geadas é o agrícola e os danos ocasionados pela geada às plantas são denominados de geladuras (MELO-ABREU, 2010; SNYDER; MELO-ABREU, 2005). Do ponto de vista agrônomo, a geada é definida como um fenômeno que acarreta a morte da planta ou de suas partes devido a lesões por congelamento (CARAMORI et al., 2000; SELUCHI, 2009).

Diversos estudos têm avaliado os impactos das geadas em culturas como o café (BUCENE; RODRIGUES; MEIRA et al., 2002; MORICOCHI et al., 1995), trigo (AL-ISSAWI et al., 2013; BARLOW et al., 2015), feijão (FARINELLI et al., 2010), milho (XIMENES et al., 2004), entre outras. Em geral, a suscetibilidade das plantas à geada depende da espécie vegetal, do seu estágio fenológico e dos limiares de temperatura suportados pela planta (CAMARGO et al., 1993). Mota (1981) sugere que, para culturas menos resistentes ao frio, como a banana, o feijão e o trigo, as geadas causam danos às plantas quando a temperatura da folha atinge valores inferiores a -2 °C. Enquanto que, para espécies mais resistentes, como a cana-de-açúcar e o cafeeiro, esse limiar é estimado em -4 °C (MORAIS et al., 2002). Dentre os diversos danos causados pelas geadas às plantas, destacam-se a danificação de frutos e folhas e a destruição dos tecidos vegetais; além disso, as geadas podem tornar as plantas mais suscetíveis à infecção por patógenos, ocasionar infertilidade às flores, afetar o enchimento de grãos e diminuir a produtividade (MONTEIRO et al., 2009).

Quanto ao processo de formação, as geadas podem ser classificadas em geadas de radiação, geadas de advecção e mistas, e em relação ao aspecto visual, podem ser classificadas em geadas brancas e geadas negras (CASTILLO; SENTIS, 2001; BISCARO, 2007; SNYDER; MELO-ABREU, 2005).

De acordo com Castillo e Sentis (2001), as geadas de radiação se formam em noites de céu limpo, sem nuvens, e com ventos fracos ou ausentes, o que permite

um intenso resfriamento da superfície pela emissão de radiação de onda longa para a atmosfera. Seluchi (2009) destaca que, no Brasil, as geadas de radiação ocorrem quando há atuação de um anticiclone migratório que sucede uma frente fria (SILVA; REBOITA; ROCHA, 2014). Já as geadas de advecção são decorrentes da advecção de ar frio promovida pela incursão de massas de ar polar sobre as latitudes subtropicais, promovendo queda significativa da temperatura do ar e ventos intensos (SNYDER; MELO-ABREU, 2005). Pode ocorrer ainda a combinação de características das geadas de advecção e radiação, o que caracteriza um tipo denominado de geadas mistas (SELUCHI, 2009).

As geadas brancas se formam em condições de elevada umidade do ar e decorrem do congelamento do orvalho ou sublimação do vapor, sendo caracterizadas pela presença de cristais de gelo sobre a superfície, enquanto que as geadas negras são formadas em condições de menor umidade relativa, havendo congelamento da água no interior das células das plantas, o que ocasiona a morte do tecido vegetal da planta (BISCARO, 2007; SNYDER; MELO-ABREU, 2005). As geadas negras são bastante prejudiciais, uma vez que afetam o interior da planta. Esse tipo de geada devastou as plantações de café do estado do Paraná no ano de 1975, o que representou prejuízos de cerca de 75 milhões de dólares na época; no ano seguinte, a produção de café do estado caiu de 10,2 milhões para 3,8 mil sacas, o que obrigou a migração da cultura do café para outros estados, como o Mato Grosso (REVISTA CAFEICULTURA, 2010).

No Brasil, as geadas ocorrem majoritariamente nas latitudes das regiões Sudeste e Sul do país, principalmente nas localidades de elevada altitude, como a Serra da Mantiqueira, Serra Gaúcha e Catarinense, e em regiões de vales, onde ocorre estagnação do ar frio. Tubelis e Nascimento (1988) apresentaram uma frequência anual de ocorrência de geadas, considerando um mapa, de cerca de 1,5 a 5 dias por ano na região Sudeste e de cerca de 10 a 25 dias por ano na região Sul do Brasil. Nessas regiões, as geadas são registradas principalmente durante os meses do inverno, porém também podem ser registrados casos nos meses de maio (geadas precoces de outono) e setembro (geadas tardias de primavera) (SELUCHI, 2009).

Com relação às condições sinóticas que favorecem a formação de geadas no Brasil, Girardi (1983), através da análise de cartas sinóticas e imagens de satélite, descreveu a configuração denominada de Poço dos Andes (Figura 1), que auxilia no

prognóstico para a ocorrência de geadas no Sul e Sudeste do Brasil. Nesta configuração, a presença de uma frente fria sobre o oceano Pacífico e um ciclone no extremo sul da América do Sul promovem a incursão de ar polar sobre o continente (Figura 1a). A frente no Pacífico é inclinada em  $45^\circ$  na direção noroeste/sudeste indicando a presença de um cavado de grande amplitude. Um anticiclone se desenvolve próximo à costa do Chile, marcando o início do Poço dos Andes, e o ciclone do extremo sul do continente desloca-se na direção do Atlântico Sul (Figura 1b), intensificando ainda mais a incursão do ar frio (Figura 1c). A frente associada ao ciclone no Atlântico avança sobre o continente (Figura 1d, e), atingindo latitudes equatoriais, o que caracteriza o fenômeno de friagem (Figura 1f), enquanto que a frente no Pacífico pouco se altera. O nome Poço dos Andes foi dado uma vez que, durante a ocorrência desse padrão sinótico, um “buraco” aparece nas imagens de satélite na região dos Andes, que permanece sem nuvens devido a presença do anticiclone. Em geral, a medida que o ar frio avança sobre o continente, as temperaturas caem de maneira significativa, ocasionando geadas em grande parte da região Sul e também no Sudeste do Brasil (GIRARDI, 1983).

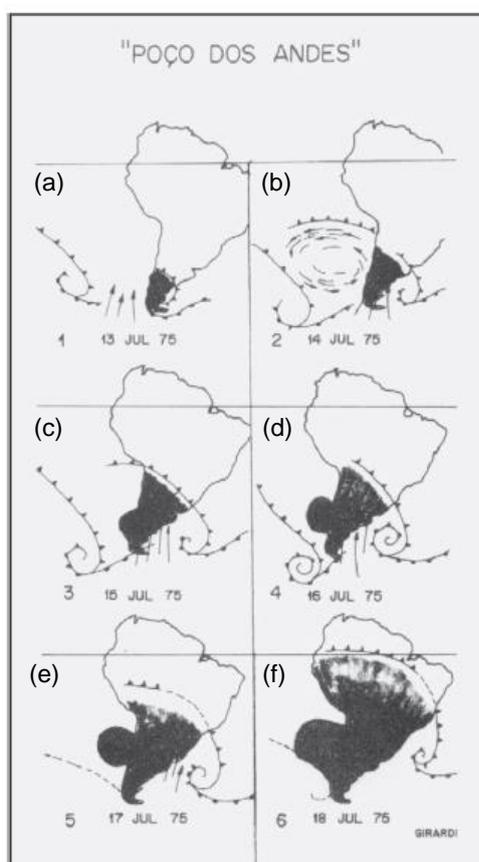


Figura 1 – Padrão sinótico de Poço dos Andes. Fonte: Girardi (1983).

Garreaud (2000) estudou a estrutura da incursão de ar frio associada a ondas de frio e encontrou um padrão similar ao de Girardi (1983), no qual a incursão de ar polar também é promovida pela presença de um anticiclone a oeste dos Andes e de uma frente fria sobre o Atlântico. A medida que o ar frio avança, a alta pressão domina sobre o continente, favorecendo ainda mais o resfriamento do ar noturno. Lupo et al. (2001) classifica a incursão de ar frio sobre a América do Sul em três tipos: as incursões do tipo 1, que são menos intensas e limitadas à área da Argentina, nas quais o anticiclone que se desenvolve à leste dos Andes sobre o continente é fraco e de curta duração; as do tipo 2, bastante intensas, que podem atingir latitudes da bacia amazônica e ocasionar o fenômeno de friagem; e as incursões do tipo 3, que são as mais frequentes e ocorrem sobre as regiões Sul e Sudeste do Brasil. Lanfredi e Camargo (2018), em um estudo mais recente, também classificam as incursões de ar frio sobre a América do Sul de acordo com a penetração do ar frio em penetração meridional (equivalente ao tipo 2), restrição meridional (equivalente ao tipo 1) e penetração leste (equivalente ao tipo 3).

Fortune e Kousky (1983) analisaram dois eventos severos de geada que causaram danos irreversíveis às plantações de café do estado do Paraná, um ocorrido em maio de 1979 e outro em julho de 1981. A incursão de ar frio descrita por Girardi (1983) e Garreaud (2000) foi observada no caso de 1979, no qual a presença de uma crista sobre o sul do Chile e um cavado sobre o Brasil, ambos no nível de 500 hPa e orientados no sentido noroeste/sudeste, favoreceram a canalização do ar frio sobre o continente e a ocorrência de geadas de advecção. No caso de 1981, a amplificação das cristas e cavados ocorreu mais para oeste quando comparada ao caso de 1979, de modo que a incursão do ar frio também ocorresse mais para oeste; nesse caso, o resfriamento da superfície deveu-se mais pela perda radiativa devido à atuação do anticiclone do que pela incursão do ar polar, o que ocasionou geadas de radiação. Um evento de geada ocorrido em abril de 1999 foi estudado por Satyamurty et al. (2002), sendo também caracterizado pela ocorrência de incursão de ar frio e as configurações atmosféricas predominantes foram bastante semelhantes ao caso de maio de 1979. No caso de abril de 1999, a temperatura diminuiu cerca de 15 °C no estado do Mato Grosso e foram registradas geadas no Sudeste e neve no Sul do Brasil.

Silva, Reboita e Rocha (2014) estudaram a relação entre a passagem de frentes frias e a ocorrência de geadas e precipitação sobre o sul de Minas Gerais.

Utilizando dados de reanálise e um método objetivo para identificação das frentes, os autores identificaram a passagem de uma média de 27 sistemas frontais por ano entre 2004 e 2010 sobre a região, sendo a maioria dos sistemas ocorridos no inverno e na primavera. Na maioria dos casos de geada registrados nesse período, havia atuação de um anticiclone conectado ao Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) sobre a região de estudo e foi encontrada pouca relação entre os eventos de geada e a passagem frontal.

Diante do impacto que as geadas acarretam na produção agrícola em geral, desenvolver técnicas e aprimorar modelos para sua previsão é de extrema importância, de modo que os produtores possam fazer a proteção adequada de suas culturas em dias com previsão do fenômeno (SNYDER; MELO-ABREU, 2005). Embora os métodos empíricos para previsão de geadas tenham sido frequentemente empregados nas lavouras, muitos deles, como o método do gráfico de Belfort de Matos (Figura 2) requerem a existência de instrumentos meteorológicos específicos nas plantações para que o monitoramento seja feito e são métodos válidos apenas numa pequena escala espacial (TUBELIS; NASCIMENTO, 1988). Nesse método, as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido devem ser monitoradas a partir do final do dia até a manhã seguinte para avaliar o risco de geada (BISCARO, 2007).

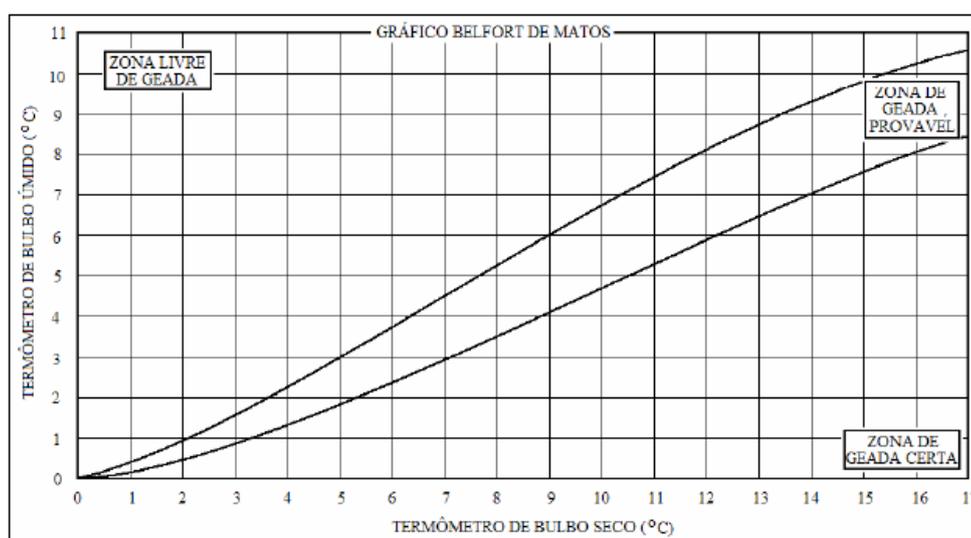


Figura 2 – Gráfico de Belfort de Matos. Fonte: Tubelis e Nascimento (1988).

Nesse contexto, métodos alternativos para identificação das condições favoráveis à formação de geadas e previsão do fenômeno incluem análises de

cartas sinóticas e imagens de satélite para identificação das condições favoráveis em escala sinótica (CARAMORI et al., 2007), bem como a utilização de métodos estatísticos (ARAUJO et al., 2009) e modelos de previsão numérica de tempo (PNT) (SANTOS et al., 2013). A previsão de geadas através de modelos regionais de PNT tem a vantagem de fornecer as condições que podem levar à formação de geadas para localidades que não contam com registro de variáveis meteorológicas.

O modelo de mesoescala *Weather Research and Forecast* (WRF) tem sido utilizado para simulação de eventos e fenômenos meteorológicos diversos, incluindo as geadas (PEREIRA et al., 2015; PRABHA; HOOGENBOOM, 2008). Uma descrição deste modelo é apresentada na seção 2.2.

A maioria dos estudos sobre a ocorrência de geadas na região Sudeste do Brasil se dá de forma indireta, principalmente, através de trabalhos sobre ondas de frio, sendo que há poucos estudos que trazem simulações numéricas de geadas, o que torna necessário a atualização da literatura nesse tema. O presente estudo justifica-se pelo impacto que as geadas acarretam na agricultura, um dos principais setores econômicos da região Sudeste. Nos últimos anos, tais como 2011 e 2013, o Sudeste, assim como a região Sul, tem experimentado eventos de queda significativa da temperatura e ocorrência de geadas, que ocasionaram danos para cultivos como o café, milho, trigo, batata, entre outras culturas, nos estados de São Paulo, Minas Gerais e nos estados da região Sul; esses danos representaram perdas econômicas de cerca de 2 bilhões de dólares para essas regiões (ALVARES; SENTELHAS; STAPE, 2017). Dessa forma, torna-se necessário conhecer os padrões sinóticos e as condições locais que levam à formação de geadas no Sudeste, de modo a auxiliar o prognóstico de ocorrência de geadas na região.

### **1.1 Objetivos Geral e Específicos**

O objetivo geral do presente estudo é avaliar as condições sinóticas predominantes durante a ocorrência de eventos de geada na região Sudeste.

São objetivos específicos:

- Determinar as frequências anuais e mensais dos eventos de geada.
- Avaliar as condições meteorológicas associadas com as geadas através de dados de reanálise e simulações numéricas.

- Analisar os resultados das simulações numéricas para os períodos de geada.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Descrição da área de estudo

A região Sudeste do Brasil (Figura 3) possui clima tipicamente monçônico, caracterizado por verões chuvosos e invernos secos (NUNES; VICENTE; CANDIDO, 2009; REBOITA et al., 2012). Durante o verão, a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é responsável por grande parte da precipitação sobre o Sudeste (QUADRO; PEZZI; ROSA, 2016) e, durante o inverno, a baixa quantidade de chuvas está ligada à atuação do ASAS, que, de acordo com Reboita et al. (2010), possui sua posição mais oeste durante o inverno, quando adentra o continente e abrange a região Sudeste do Brasil.

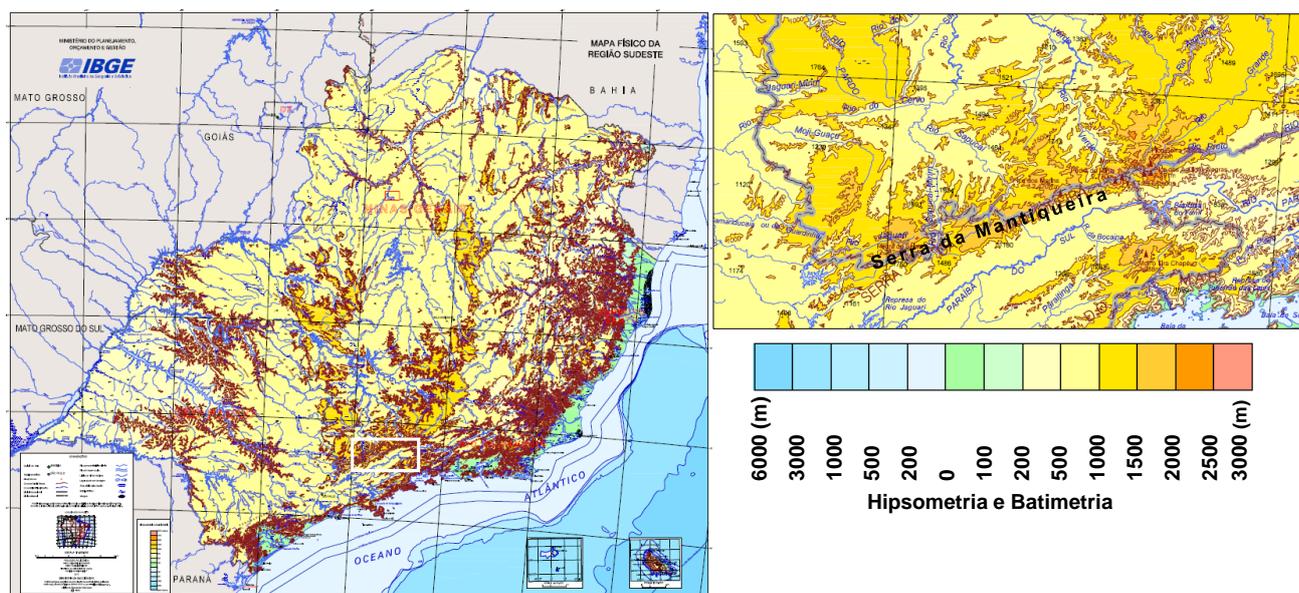


Figura 3 – Topografia da Região Sudeste com destaque para a região da Serra da Mantiqueira. Adaptado de IBGE (2013).

Composta pelos estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo, o Sudeste é uma das regiões brasileiras que mais contribui para a produção agropecuária do país, com destaques para a produção de leite, cana-de-açúcar, café e laranja (CASTRO, 2014).

A presença de regiões de elevada altitude no Sudeste, como a Serra da Mantiqueira (Figura 3), propicia a ocorrência de baixas temperaturas durante o

inverno e, conseqüentemente, o registro de geadas, que representam danos para a produção agrícola na região.

## **2.2 O modelo de mesoescala WRF**

O WRF é um modelo regional de PNT e simulação de sistemas atmosféricos desenvolvido para aplicações operacionais e de pesquisa (SKAMAROCK et al., 2008). Os modelos regionais, ao contrário dos modelos globais, representam com maior resolução espacial processos tais como as circulações de mesoescala, os gradientes de temperatura devido à topografia, entre outros (AMBRIZZI et al., 2018; WANG et al., 2004). Muito se evoluiu na representação de fenômenos atmosféricos através de equações matemáticas desde a primeira PNT realizada por Charney em 1950 (KALNAY, 2003) e, atualmente, modelos como o WRF são considerados como o estado da arte da PNT (PRABHA; HOOGENBOOM, 2008).

Para cada ponto de grade, ou seja, cada ponto no espaço, os modelos de PNT resolvem as equações primitivas em um determinado passo de tempo, que são leis de conservação de momento (provenientes das Leis de Newton), energia (provenientes das leis da termodinâmica), massa (provenientes da equação da continuidade) e teoria cinética dos gases. O intervalo espacial entre cada ponto de grade determina a resolução espacial do modelo e o intervalo de tempo no qual as equações são resolvidas para cada ponto no espaço depende dessa resolução espacial e da velocidade da onda mais rápida que “viaja” dentro do modelo, a onda sonora (com velocidade de 340 m/s) (KALNAY, 2003). Dessa forma, quanto mais refinada a resolução espacial adotada em uma simulação numérica, menor é o intervalo de tempo que o modelo deve empregar na resolução das equações governantes para cada ponto.

No entanto, alguns processos e variáveis meteorológicas, como a precipitação ou os processos subgrade, não são descritos explicitamente pelas equações governantes e precisam ser considerados no modelo através de parametrizações (AMBRIZZI et al., 2018).

Para execução de uma PNT devem ser fornecidas condições iniciais que descrevem o atual estado da atmosfera, tais como dados de estações meteorológicas, radares, satélites, etc. Como os modelos regionais, como o WRF,

são modelos de área limitada, além das condições iniciais, devem ser fornecidas condições de fronteira para sua execução. Essas condições de fronteira descrevem os padrões meteorológicos de grande escala que afetam a escala regional e são fornecidas pelos modelos globais (AMBRIZZI et al., 2018; WANG et al., 2004).

Em qualquer simulação numérica, as condições iniciais fornecidas devem ser ajustadas ao modelo para que ele possa ser inicializado. Dessa forma, a data inicial de uma simulação não deve ser a data de início do período estudado, ou seja, deve-se inicializar o modelo em um período que anteceda a data inicial do fenômeno que se deseja estudar para que o ajuste das condições iniciais seja atingido e isso não interfira no resultado das simulações. Esse período de ajuste é conhecido como período de *spin-up* e pode ser de algumas horas para um modelo regional e de até meses para um modelo global (AMBRIZZI et al., 2018)

O WRF possui dois núcleos dinâmicos para resolução das equações primitivas: o *Advanced Research WRF* (ARW), desenvolvido pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), e o *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM), desenvolvido pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP).

A Figura 4 exemplifica as componentes do ARW. De modo simplificado, o WPS representa o pré-processamento do modelo e inclui o GEOGRID, que define os domínios do modelo, ou seja, as grades, e os dados terrestres (dados de terreno, uso do solo e tipos de solo); o UNGRIB, que decodifica os arquivos de entrada no formato GriB; e o METGRID, que interpola as condições iniciais para a resolução adotada no modelo. Após o pré-processamento, os arquivos de entrada do modelo e condições de contorno são gerados pelo REAL e a execução do modelo é realizada pela componente WRF. Após a execução, o pós-processamento (POST) e visualização dos resultados das simulações pode ser realizado através de diferentes programas, tais como o NCL, RIP4, ARWpost, UPP e VAPOR (SKAMAROCK et al., 2008).

Mais detalhes acerca da formulação dinâmica do WRF, parametrizações, equações primitivas dos modelos de PNT e seus métodos de integração podem ser encontrados em Skamarock et al. (2008), Kalnay (2003), Pielke (2002) e Mesinger e Arakawa (1976).

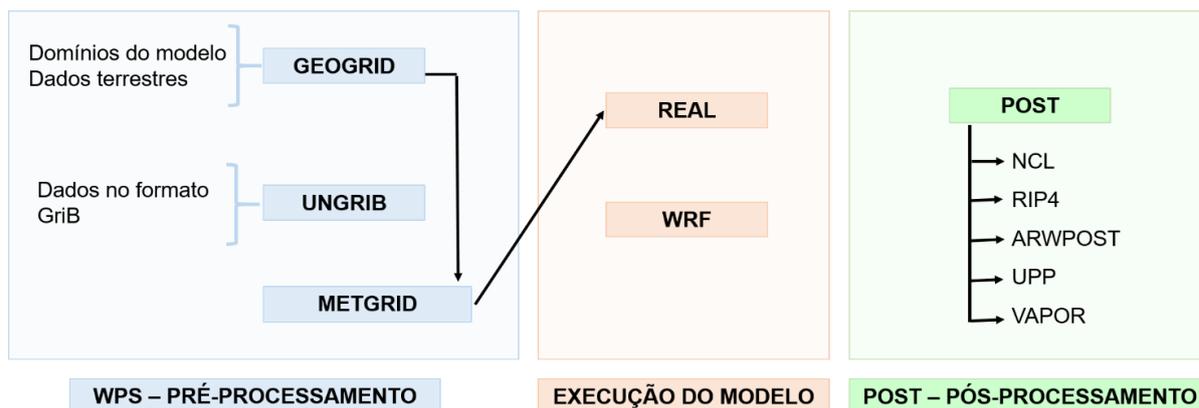


Figura 4 – Componentes do ARW. Adaptado de Skamarock et al. (2008).

### 2.3 Levantamento da ocorrência de geadas e seleção dos períodos de estudo

Para realização do estudo, foram levantados dados dos casos de geada ocorridos no Sudeste do Brasil no período de 2009 a 2017. O levantamento foi feito com base no Mapa de Geadas disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/geada>), que informa, a partir da data selecionada, todas as localidades no Brasil com registro de geada em estações meteorológicas convencionais, além da intensidade da geada (fraca, moderada ou forte) e a temperatura mínima registrada no abrigo meteorológico no horário das 12:00 Z. Vale destacar que a classificação da intensidade da geada é visual, ou seja, é determinada pelo observador meteorológico quando este realiza a leitura dos instrumentos meteorológicos nos horários sinóticos (00:00 Z, 12:00 Z, 18:00 Z). Dessa forma, não há um padrão adotado para classificação da intensidade das geadas registradas no Mapa de Geadas do INMET.

A partir deste levantamento, foram determinadas as frequências anuais e mensais dos casos de geada registrados no período de 2009 a 2017. Dentro desse período, foram selecionados três eventos de geada ocorridos no Sudeste do Brasil (Tabela 1) para realização de análise sinótica e numérica. O critério de seleção dos eventos da Tabela 1 foi baseado na quantidade de casos de geada registrados pelo Mapa de Geadas no Sudeste em cada um dos três períodos selecionados, sendo todos superiores a dez registros.

Tabela 1 – Períodos selecionados para análise sinótica e numérica da ocorrência de geadas no Sudeste do Brasil.

<b>Evento</b>	<b>Data</b>	<b>Localidades com registro de geada</b>
<b>1</b>	17/06/2009 – 24/06/2009	Caldas/MG, Campos do Jordão/SP, Maria da Fé/MG, Passa Quatro/MG, São Lourenço/MG e Taubaté/SP
<b>2</b>	01/07/2010 – 09/07/2010	Campos do Jordão/SP, Lambari/MG, Maria da Fé/MG e São Lourenço/MG
<b>3</b>	09/06/2011 – 19/06/2011	Caldas/MG, Campos do Jordão/SP e Maria da Fé/MG

#### **2.4 Análise sinótica da ocorrência de geadas no Sudeste do Brasil**

A partir do levantamento dos dias com ocorrência de geadas no Sudeste entre 2009 e 2017, foram analisados os boletins técnicos do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) para avaliação prévia das condições sinóticas que influenciam na ocorrência do fenômeno. Para todos os dias com registro de geadas na região de estudo, foram geradas composições sinóticas, isto é, campos médios, de modo a melhor caracterizar os padrões predominantes nos dias com ocorrência de geadas. Para tanto, foram utilizados dados diários do horário das 12:00 Z da reanálise ERA-Interim do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), com resolução de  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$  (DEE et al., 2011), das variáveis: pressão ao nível médio do mar (PNMM), altura geopotencial no nível de 500 hPa, temperatura do ar em 925 hPa e componentes zonal e meridional do vento em 925 hPa. A média dessas variáveis foi computada considerando-se todos os dias com ocorrência de geadas entre 2009 e 2017 no Sudeste e então comparada à climatologia das variáveis citadas para o período de maio a setembro de 1980 a 2016. A climatologia foi calculada apenas para o período de maio a setembro já que, em geral, não são registradas geadas na região Sudeste fora deste período.

Campos sinóticos foram gerados para os três períodos listados na Tabela 1, também utilizando dados diários da reanálise ERA-Interim com  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$  de resolução (DEE et al., 2011) para os horários das 00:00 Z, 06:00 Z, 12:00 Z e 18:00 Z. Os campos foram gerados para as variáveis PNMM e espessura da camada de 1000-500 hPa, altura geopotencial em 500 hPa, e temperatura e componentes zonal e meridional do vento em 925 hPa. Estes campos foram construídos para a área compreendida entre as latitudes de  $10^\circ\text{N}$  a  $55^\circ\text{S}$  e longitudes de  $130^\circ\text{O}$  a  $15^\circ\text{O}$ , de modo que toda a área abrangida pela América do Sul e parte dos oceanos Pacífico e

Atlântico fosse representada para melhor caracterização dos sistemas meteorológicos que influenciam na ocorrência de geadas no Sudeste do Brasil. Foram identificados os principais sistemas atmosféricos atuantes nos campos (como sistemas de alta e baixa pressão, frentes frias, cristas e cavados), e estes foram então comparados às cartas de superfície do CPTEC e aos campos gerados a partir de simulações numéricas realizadas pelo modelo de mesoescala WRF, a fim de avaliar a destreza do modelo em simular as condições atmosféricas predominantes durante a ocorrência de eventos de geada.

## 2.5 Análise numérica da ocorrência de geadas no Sudeste do Brasil: simulação com o WRF e validação dos resultados

As simulações numéricas para os períodos listados na Tabela 1 foram realizadas através do modelo de mesoescala WRF, sendo utilizada a versão 3.8 do ARW. As simulações foram realizadas através de três grades aninhadas, com resoluções de 27 km, 9 km e 3 km, respectivamente, representadas na Figura 5.

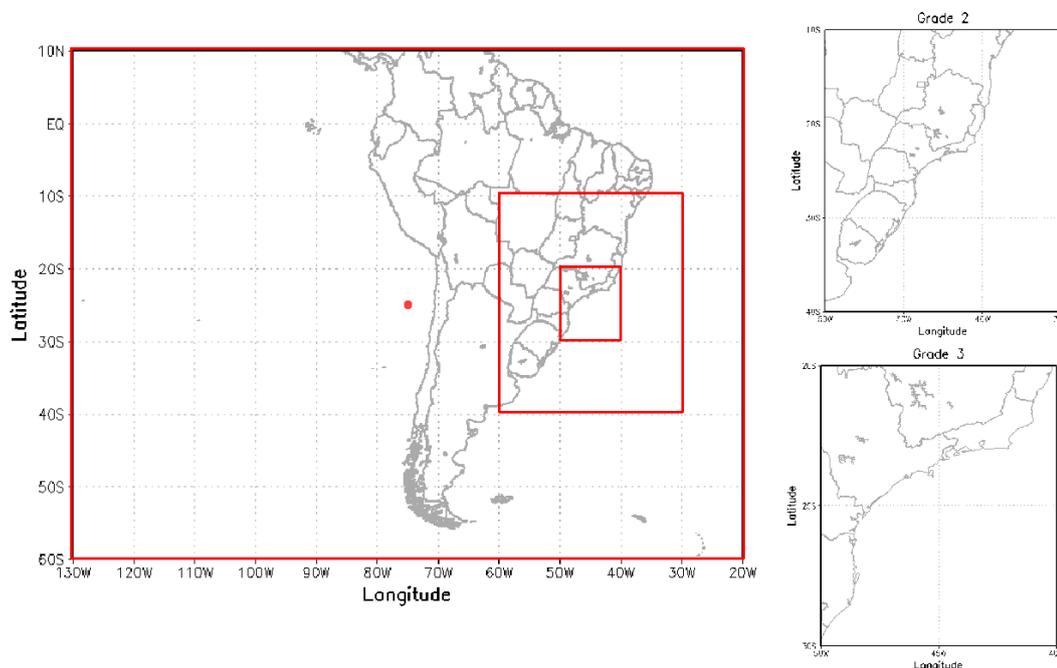


Figura 5 – Representação das grades simuladas pelo WRF.

A grade 1 (grade-mãe) abrange o continente sul americano e parte dos oceanos Pacífico Leste e Atlântico Sul, com ponto central em 25°S de latitude e 75°O de longitude. Para comparação, as dimensões da grade-mãe são as mesmas

da área adotada para a geração dos campos sinóticos utilizando os dados da reanálise ERA-Interim. A grade 2 abrange as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil e a grade 3 compreende uma porção da região Sudeste, na qual está inserida a Serra da Mantiqueira, onde maior parte dos casos de geada no Sudeste são registrados.

As condições iniciais e de fronteira foram geradas pelas análises do modelo de escala global *Global Forecast System (GFS)*, do NCEP, com 0,5° de resolução espacial e 6 h de resolução temporal.

Para cada período selecionado (Tabela 1) foi realizada uma simulação com o WRF, totalizando três simulações diferentes, sendo que as parametrizações e configurações adotadas para cada uma das simulações foram as mesmas. As parametrizações utilizadas para as simulações foram: *WRF Single moment 3-class* (HONG; DUDHIA; CHEN, 2004) para microfísica, *Dudhia Shortwave Scheme* (DUDHIA, 1989) para radiação de onda curta, *RRTM Longwave Scheme* (MLAWER et al., 1997) para radiação de onda longa, *Unified Noah Land Surface Model* (TEWARI et al., 2004) para solo-superfície e *Yonsei University Scheme* (YSU) (HONG; NOH; DUDHIA, 2006) para camada limite planetária. As simulações foram iniciadas 24 h antes ao período de interesse para eliminação do efeito de *spin-up*. Uma exceção, no entanto, ocorreu para o evento 3, que foi inicializado no dia 13/06/2011 e não no dia 08/06/2011 (24 h antes ao início do período de interesse) devido à indisponibilidade de dados do GFS para o período de 08/06/2011 a 12/06/2011.

Após a realização das simulações, campos sinóticos utilizando os resultados obtidos com o WRF para a grade 1 foram elaborados. Para estes foram considerados as mesmas variáveis dos campos gerados com os dados da ERA-Interim, também para os horários das 00:00 Z, 06:00 Z, 12:00 Z e 18:00 Z.

De modo a avaliar a habilidade do WRF em simular as variáveis associadas à ocorrência de geadas no Sudeste, para cada evento analisado, foram extraídos dados horários das simulações para a grade 3 dos pontos referentes às cidades que apresentaram registros de geada em cada evento considerado. Dessa forma, a comparação entre as variáveis simuladas pelo WRF e as observadas pelas estações meteorológicas dessas cidades foi realizada através da aplicação das estatísticas de média ( $\bar{x}$ ), desvio-padrão ( $\sigma$ ), coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), bias, raiz do erro médio quadrático (RMSE e RMSE<sub>UB</sub>) e índice de concordância ( $d$ ), seguindo

metodologia utilizada por Mazzoli et al. (2008). Essas estatísticas foram calculadas para as variáveis temperatura do ar (T), temperatura do ponto de orvalho (Td) e umidade relativa (UR) e a direção e velocidade do vento foi comparada através da construção da rosa dos ventos. As variáveis T, Td e UR foram extraídas no nível de 2 m e a direção e velocidade do vento no nível de 10 m para os dados do WRF. Os dados observados foram provenientes de estações meteorológicas automáticas do INMET.

Das estatísticas calculadas, a média aritmética (Equação 1) representa uma das medidas de tendência central mais utilizadas, na qual uma série temporal é representada por um único valor, altamente influenciável por valores extremos. O desvio-padrão (Equação 2) complementa a média e mostra quão dispersos estão cada componente de uma série temporal em torno do valor central; se o desvio é pequeno, isso significa que a média é um valor relativamente representativo de toda a série temporal. A vantagem de se utilizar o desvio-padrão é que ele possui a mesma unidade da média, o que facilita as comparações (DEAKIN; KILDEA, 1999; WALTHER; MOORE, 2005; WILKS, 2006).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

onde  $x_i$  é o  $i$ -ésimo valor da série temporal e  $n$  o número de valores da série.

O coeficiente de correlação de Pearson (Equação 3) é utilizado para comparação de duas séries temporais diferentes e é descrito pela razão entre a covariância das duas variáveis pelo produto do desvio-padrão de cada uma delas. A correlação possui valores entre -1 e 1;  $r \approx 1$ , em módulo, indica forte associação entre as variáveis correlacionadas e  $r \approx 0$  indica fraca relação. Vale ressaltar que o coeficiente de correlação de Pearson reconhece apenas relações lineares entre as variáveis, de modo que fortes relações não-lineares podem não ser bem representadas pelo coeficiente (WILKS, 2006).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2][\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}} \quad (3)$$

onde  $x_i$  e  $y_i$  representam os  $i$ -ésimos valores das variáveis comparadas e  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  as médias dessas variáveis.

De acordo com Walther e Moore (2005), a performance de um estimador e/ou modelo é determinada através de alguns índices, como o bias ou viés, as medidas de precisão, tais como a variância e desvio-padrão, e as medidas de acurácia, como o erro médio quadrático. A acurácia representa o quão distante o valor estimado ou simulado está do valor de referência e a precisão relaciona-se à dispersão do valor estimado (MONICO et al., 2009). O bias denota a tendência de um estimador em superestimar ou subestimar os valores observados de uma dada variável, sendo o erro médio (ME, Equação 4) a medida mais utilizada. O ME é a média das diferenças entre os valores estimados e observados (WALTHER; MOORE, 2005).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) \quad (4)$$

onde  $y_i$  representa o  $i$ -ésimo valor da variável estimada e  $x_i$  o  $i$ -ésimo valor da variável observada.

Enquanto o ME atribui pesos iguais a todos os erros, a RMSE (Equação 5) atribui maiores pesos para erros com maiores valores absolutos. A RMSE é uma das medidas de acurácia mais utilizadas para avaliação de estimadores e, em geral, é sempre maior que o ME, além de expressar o erro nas mesmas unidades da variável comparada (CHAI; DRAXLER, 2014; WILLMOTT, 1985).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (5)$$

Além da RMSE, Pielke (2002) propôs o  $RMSE_{UB}$  (Equação 6), que representa o erro médio após a remoção de um desvio. Pielke (2002) define ainda, condições para determinação da habilidade ou *skill* de um de modelo:  $\sigma_{OBSERVADO} \approx \sigma_{SIMULADO}$  (condição 1),  $RMSE < \sigma_{OBSERVADO}$  (condição 2) e  $RMSE_{UB} < \sigma_{OBSERVADO}$  (condição 3). Se as três condições forem satisfeitas, o modelo produz simulações relativamente próximas aos valores observados.

$$RMSE_{UB} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y}) - (x_i - \bar{x})]^2} \quad (6)$$

A acurácia de um modelo pode ainda ser quantificada através de outra medida, o índice de concordância (Equação 7). O índice  $d$  reflete o grau com o qual a variabilidade observada é estimada pela variabilidade simulada, com valores entre 0 e 1, sendo que  $d \approx 1$  indica concordância perfeita entre os valores observados e simulados (WILLMOTT, 1981).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (7)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Levantamento da ocorrência de geadas no Sudeste e condições sinóticas associadas

No período de 2009 a 2017 foram registrados 349 casos de geada em 19 estações meteorológicas convencionais no Sudeste do Brasil entre os meses de maio a setembro (Tabela 2). A maioria dos casos registrados ocorreu em municípios localizados na Serra da Mantiqueira, como Campos do Jordão (22°45' S, 45°36' W, altitude de 1642 m, 160 casos registrados), Maria da Fé (22°18' S, 45°22' W, altitude de 1276 m, 58 casos registrados) e São Lourenço (22°10' S, 45°01' W, altitude de 953,2 m, 36 casos registrados), que juntos totalizaram cerca de 70% de todos os casos de geada registrados no Sudeste no período considerado. A estação meteorológica convencional de Maria da Fé foi substituída por uma automática no ano de 2014 e, portanto, a partir desse ano a cidade não conta com mais registros de geadas no Mapa de Geadas do INMET.

Os anos com o maior número de ocorrência de geadas foram 2010 (73 casos) e 2011 (76 casos) e os meses com o maior número de registros foram junho (120 casos) e julho (116 casos), de acordo com a Tabela 3. Vale ressaltar que entre 2009 e 2017 não foram encontrados registros de geada ocorridos fora do período de maio a setembro, justificando, portanto, o enfoque das análises apenas nesse período.

É importante salientar que dos 349 casos registrados, muitos ocorreram simultaneamente, ou seja, nos mesmos dias em diferentes localidades, de modo que, entre 2009 e 2017, houve registro de geadas em cerca de 190 dias considerando-se todo o período. Isso equivale a uma média de aproximadamente 21 dias com ocorrência de geadas por ano. Esse valor médio é fortemente influenciado pelos anos que apresentaram poucos registros de geada, como 2015 (apenas 6 dias com ocorrência de geada) e 2017 (13 dias com ocorrência de geada), e difere da frequência média de ocorrência de geadas no Sudeste fornecida por Tubelis e Nascimento (1988), que é de apenas 1,5 a 5 dias por ano. Essa diferença pode dever-se ao fato de que, para a contabilização dos casos ocorridos entre 2009 e 2017, foram consideradas todas as estações meteorológicas convencionais com

registro de geadas no Sudeste; o número de estações com esse registro na década de 80 era menor, o que justifica a diferença do valor encontrado por Tubelis e Nascimento (1988).

Tabela 2 – Ocorrência de geadas no Sudeste do Brasil, por cidade, no período de 2009 a 2017.

Cidade	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	TOTAL
Araxá/MG	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Avaré/SP	0	0	6	0	0	0	0	0	0	6
Barbacena/MG	0	1	1	0	0	0	1	0	0	3
Bom Despacho/MG	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2
Caldas/MG	5	8	5	2	4	0	0	0	0	24
Campos do Jordão/SP	23	28	33	12	20	15	5	12	12	160
Lambari/MG	4	5	2	0	0	0	0	0	0	11
Lavras/MG	0	0	1	0	1	0	0	0	0	2
Machado/MG	3	5	2	0	0	0	0	4	0	14
Maria da Fé/MG	10	13	12	15	8	–	–	–	–	58
Passa Quatro/MG	9	2	5	1	1	0	0	0	0	18
Presidente Prudente/SP	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
São Sebastião do Paraíso/MG	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
São Lourenço/MG	3	11	4	5	3	1	0	8	1	36
São Paulo/SP	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
São Simão/SP	1	0	2	0	0	0	0	1	0	4
Sorocaba/SP	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Taubaté/SP	4	0	1	0	0	0	0	0	0	5
Votuporanga/SP	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
<b>TOTAL</b>	<b>65</b>	<b>73</b>	<b>76</b>	<b>35</b>	<b>37</b>	<b>17</b>	<b>6</b>	<b>27</b>	<b>13</b>	<b>349</b>

Tabela 3 – Ocorrência mensal de geadas no Sudeste do Brasil, por cidade, no período de 2009 a 2017.

Ano	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	TOTAL
2009	2	36	15	12	0	65
2010	3	24	13	33	0	73
2011	5	33	16	15	7	76
2012	2	0	22	9	2	35
2013	2	2	19	13	1	37
2014	0	3	9	5	0	17
2015	0	3	2	1	0	6
2016	0	15	11	1	0	27
2017	0	4	9	0	0	13
<b>TOTAL</b>	<b>14</b>	<b>120</b>	<b>116</b>	<b>89</b>	<b>10</b>	<b>349</b>

De acordo com os boletins técnicos e análise das cartas de superfície do CPTEC, para a maioria dos dias com ocorrência de geadas havia atuação do ASAS sobre a região Sudeste do Brasil. De acordo com Reboita et al. (2010), o ASAS se expande para oeste durante o inverno, adentrando o continente. Esse sistema de alta pressão não favorece a formação de nuvens, o que aumenta a perda de radiação de onda longa da superfície para a atmosfera, resfriando a superfície terrestre e levando à ocorrência de menores temperaturas no início da manhã, quando as geadas são registradas (AHRENS, 2013; GALVANI; AZEVEDO, 2012; SILVA; REBOITA; ROCHA, 2014; REBOITA; ESCOBAR; LOPES, 2015).

As composições sinóticas de PNMM, temperatura e vento em 925 hPa para os dias com ocorrência de geadas também mostram a predominância do setor oeste do ASAS sobre a região Sudeste do Brasil (Figura 6a). Nos dias com ocorrência de geadas a direção média dos ventos é de quadrante norte, o que corrobora o fato de que é a atuação do ASAS que favorece a ocorrência de geadas no Sudeste; se a atuação de sistemas de alta pressão que acompanham as frentes frias fosse o principal influenciador na ocorrência de geadas, os ventos seriam predominantemente de quadrante sul.

Para os dias com ocorrência de geadas no Sudeste, a pressão atmosférica é cerca de 2 a 2,5 hPa (Figura 6c) acima da média climatológica para o período de maio a setembro de 1980 a 2016 (Figura 6b), o que mostra o predomínio da atuação do ASAS. Para esses dias, a temperatura do ar é cerca de 2 a 2,5 °C (Figura 6c) mais baixa do que a climatologia (Figura 6b) e os ventos bastante fracos, o que também favorece a ocorrência de geadas.

As composições de altura geopotencial em 500 hPa mostram a presença de uma crista sobre as regiões Sul e Sudeste do Brasil nos dias com ocorrência de geadas (Figura 6d). A presença dessa crista também está associada à atuação do ASAS em superfície, que ajuda a canalizar ar quente de baixas para elevadas latitudes; esse ar mais quente torna as superfícies de pressão constante mais afastadas, o que gera a crista em 500 hPa (WALLACE; HOBBS, 2006). A altura geopotencial é cerca de 15 a 20 m mais elevada (Figura 6f) do que a climatologia (Figura 6d) na região Sudeste em dias com ocorrência de geadas, o que mostra que a superfície de pressão de 500 hPa está mais afastada da superfície nessas regiões, caracterizando a presença da crista.

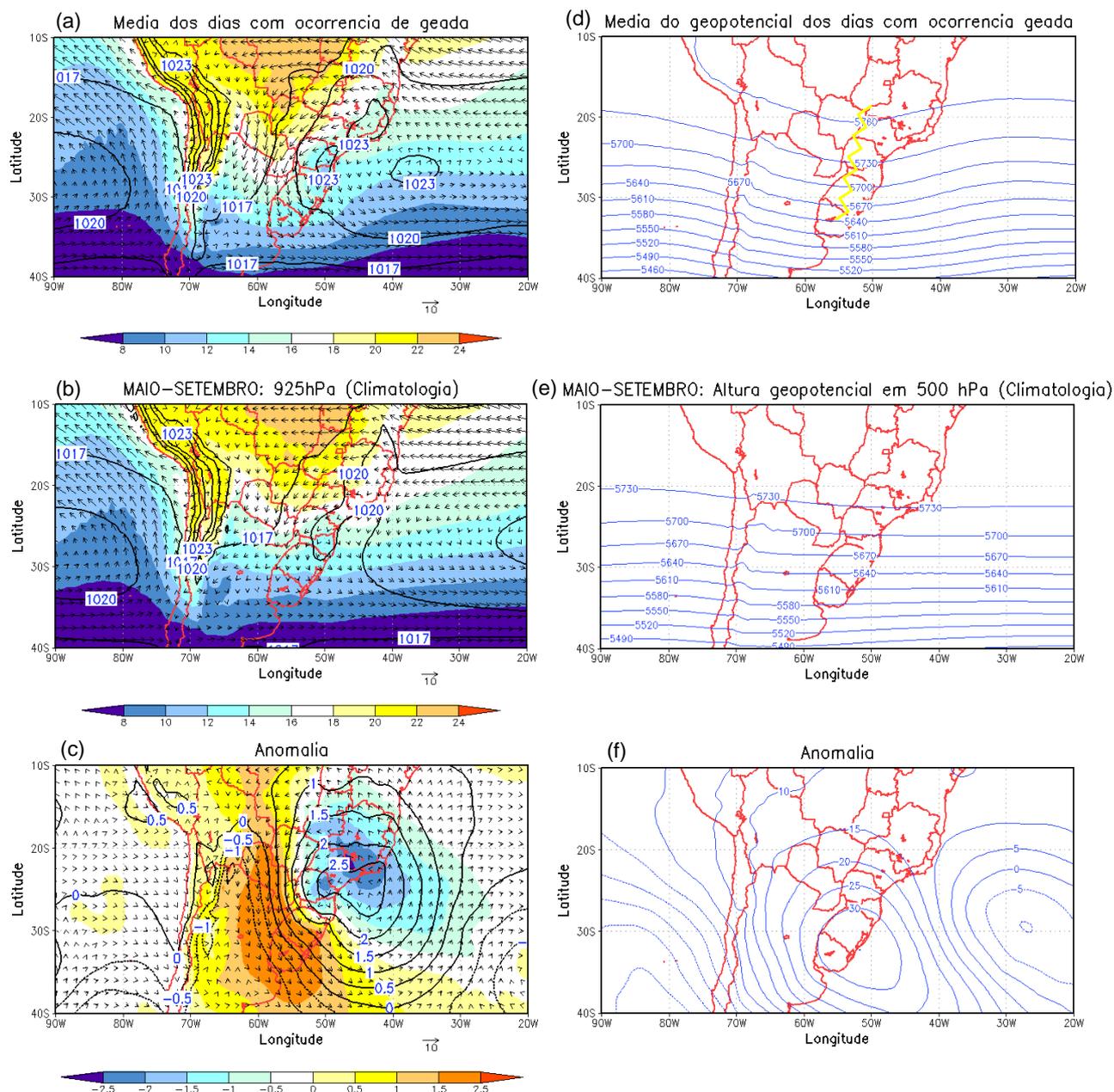


Figura 6 – Composições geradas para os casos de geada ocorridos na região Sudeste no período de 2009 a 2017: (a) média de PNMM, temperatura e vento em 925 hPa; (b) climatologia de PNMM, temperatura e vento em 925 hPa para o período de maio a setembro de 1980 a 2016; (c) anomalia de PNMM, temperatura e vento em 925 hPa; (d) média de altura geopotencial em 500 hPa; (e) climatologia de altura geopotencial em 500 hPa para o período de maio a setembro de 1980 a 2016; (f) anomalia de altura geopotencial em 500 hPa. Nas figuras (a), (b) e (c) a temperatura (em °C) é representada pelas cores, a PNMM (em hPa) pelas linhas contínuas na cor preta e a direção e intensidade do vento (em m/s) por vetores. Nas figuras (d), (e) e (f) a altura geopotencial (em m) é representada por linhas na cor azul.

### 3.2 Análise dos casos selecionados

### 3.2.1 Evento 1

No primeiro período de estudo considerado (17/06/2009 – 24/06/2009), foram registrados 14 casos de geada em 6 cidades na região Sudeste, sendo a maioria dos casos ocorridos em Campos do Jordão (5 casos), de acordo com a Tabela 4. Por brevidade, serão mostrados aqui apenas os campos meteorológicos, tanto os construídos com os dados da ERA-Interim quanto os do WRF, mais importantes para descrição do evento ocorrido (Figura 7). Serão apresentados os campos dos dias 20, 22 e 23, uma vez que nos outros dias de ocorrência do evento as condições meteorológicas permaneceram semelhantes aos dias supracitados.

Tabela 4 – Datas de ocorrência dos casos de geada do evento 1 por cidade.

<b>Cidade</b>	<b>Dias dos registros de geada</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Caldas/MG</b>	23	<b>1</b>
<b>Campos do Jordão/SP</b>	18, 19, 20, 22 e 23	<b>5</b>
<b>Maria da Fé/MG</b>	22 e 23	<b>2</b>
<b>Passa Quatro/MG</b>	20, 22 e 23	<b>3</b>
<b>São Lourenço/MG</b>	23 e 24	<b>2</b>
<b>Taubaté/SP</b>	23	<b>1</b>
<b>TOTAL</b>		<b>14</b>

Entre os dias 18 e 20 de junho, havia atuação de alta pressão sobre a região Sudeste associada ao ASAS, o que pode ter levado à ocorrência dos 4 casos de geada registrados na região nesses dias nas cidades de Campos do Jordão e Passa Quatro. No dia 20, há presença de um ciclone em superfície no sul do continente (Figura 7a, b); a presença desse sistema, juntamente com um anticiclone em superfície próximo à costa do Chile, marcaram o início de uma incursão de ar frio sobre o continente sul americano. Essa incursão deve-se à combinação dos movimentos horário do ciclone e anti-horário do anticiclone, o que canaliza o ar frio na direção do continente (GARREAUD, 2000); essa canalização do ar frio pode ser visualizada através da direção dos ventos, que são de quadrante sul no sul do continente no início da incursão (Figura 7e, f).

No dia 20 de junho, havia também a presença de uma crista em 500 hPa associada ao anticiclone próximo à costa do Chile e um cavado sobre o sul do continente, associado ao ciclone em superfície (Figura 7c, d). As posições da crista e do cavado fornecidas pelo WRF (Figura 7d) foram bastante semelhantes aos dados da ERA-Interim (Figura 7c). Porém, ao se comparar a posição do ciclone,

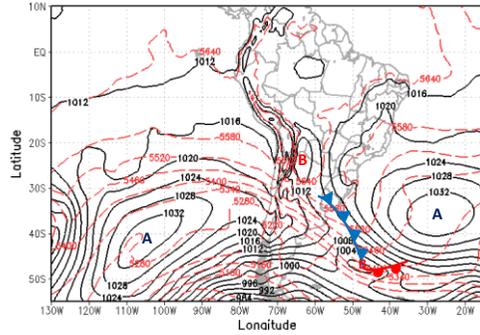
observa-se que este é mais deslocado para sudeste nos campos gerados com os dados da reanálise, sendo que essa posição só é atingida nos campos do WRF no dia seguinte (21 de junho), o que pode indicar diferenças na velocidade de deslocamento do sistema simulado pelo modelo. No início da incursão observa-se também a diminuição da temperatura do ar na Argentina e Uruguai (Figura 7k, l).

No dia 22, o ciclone que aparece nos campos da ERA-Interim (Figura 7g) não é o ciclone que deu início a incursão, porém esse sistema contribui para a manutenção da incursão de ar frio. No dia 23, o anticiclone próximo à costa do Chile começa a adentrar o continente (Figura 7m, n), o que favorece a perda radiativa da superfície na Argentina, onde as temperaturas diminuem consideravelmente (Figura 7q, r). A presença de alta pressão nessa região não promove a formação de nuvens, o que pode ser observado nas imagens de satélite, nas quais é possível identificar um “buraco” na região do anticiclone (Figura 7u), caracterizando a configuração de Poço dos Andes descrita por Girardi (1983). No dia 23, além da incursão de ar frio, havia atuação de alta pressão associada ao ASAS sobre o Sudeste (Figura 7m, n), sendo registrados 6 casos de geada no Sudeste nesse dia.

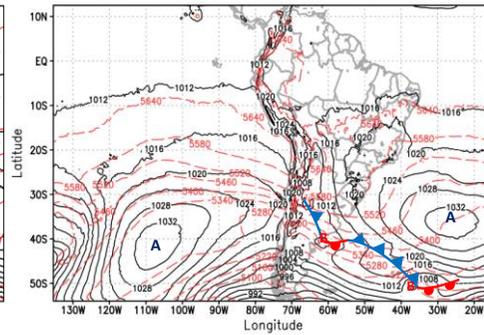
A partir do dia 23, a incursão de ar frio torna-se mais pronunciada na Argentina e nos estados da região Sul do Brasil, com predomínio de condições de ausência de nebulosidade em grande parte do setor sudoeste da América do Sul (Figura 7v, w, x), o que promoveu maior resfriamento radiativo.

A incursão de ar frio ocorrida em junho de 2009 contribuiu para a ocorrência de geadas no Sudeste do Brasil ao promover advecção de ar frio sobre essa região, porém, a ocorrência de geadas só foi possível devido a atuação do ASAS, que favoreceu um maior resfriamento radiativo na região. Apesar disso, a queda de temperatura no Sudeste não foi tão pronunciada, de acordo com os campos de temperatura em 925 hPa (Figura 7q, r). No entanto, a diminuição da temperatura entre os dias 22 e 24 pôde ser observada através dos dados observados nas estações de Caldas, Maria da Fé e Passa Quatro, que registraram geada nesse período (Figura 8a, d, g).

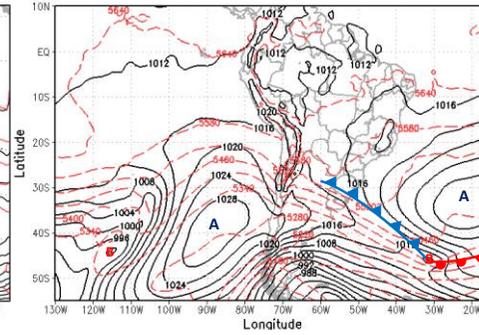
(a) ERA-INTERIM - PNMM E ESPESSURA 12Z20JUN2009



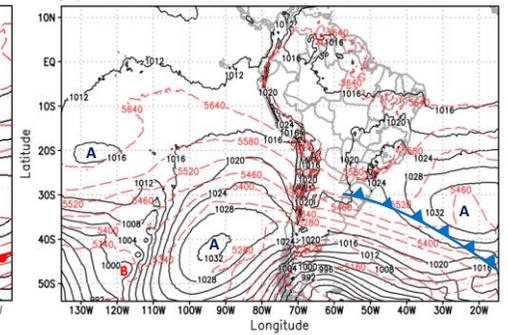
(b) WRF - PNMM E ESPESSURA 12Z20JUN2009



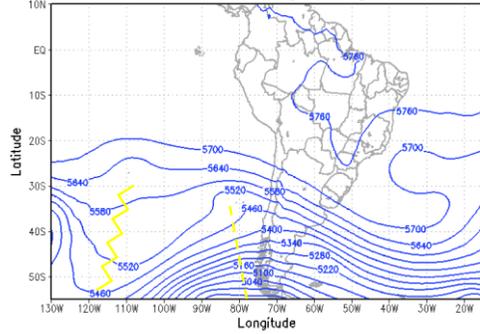
(g) ERA-INTERIM - PNMM E ESPESSURA 12Z22JUN2009



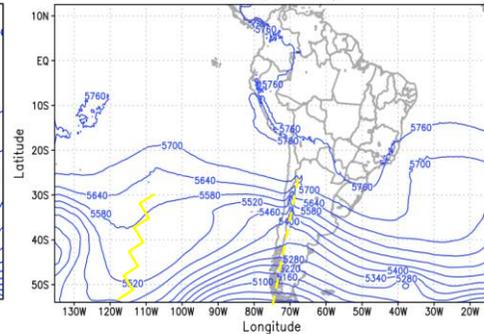
(h) WRF - PNMM E ESPESSURA 12Z22JUN2009



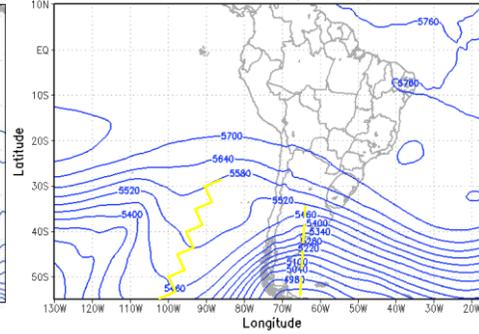
(c) ERA-INTERIM - GEOPOTENCIAL (500 hPa) 12Z20JUN2009



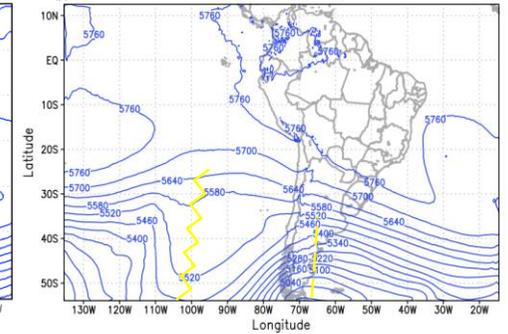
(d) WRF - GEOPOTENCIAL (500 hPa) 12Z20JUN2009



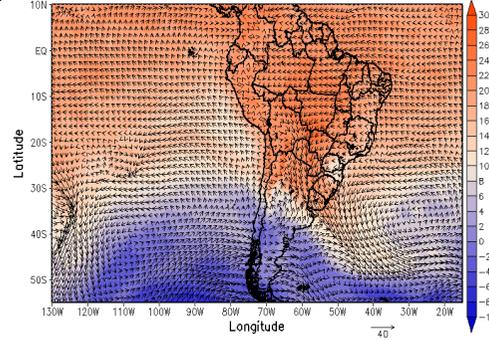
(i) ERA-INTERIM - GEOPOTENCIAL (500 hPa) 12Z22JUN2009



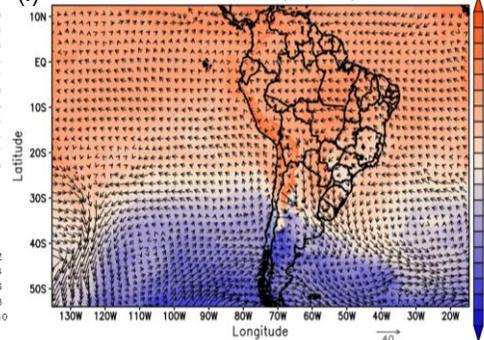
(j) WRF - GEOPOTENCIAL (500 hPa) 12Z22JUN2009



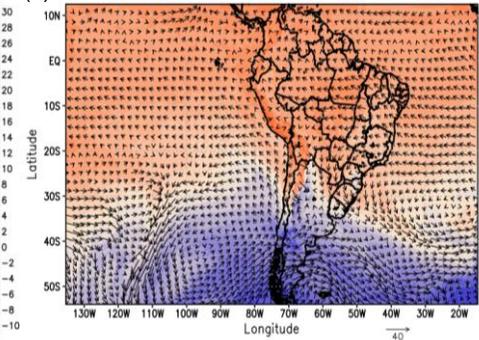
(e) ERA-INTERIM - TEMPERATURA E VENTO (925 hPa) 12Z20JUN2009



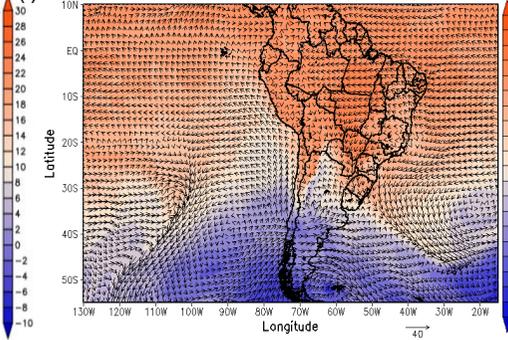
(f) WRF - TEMPERATURA E VENTO (925 hPa) 12Z20JUN2009



(k) WRF - TEMPERATURA E VENTO (925 hPa) 12Z22JUN2009



(l) ERA-INTERIM - TEMPERATURA E VENTO (925 hPa) 12Z22JUN2009



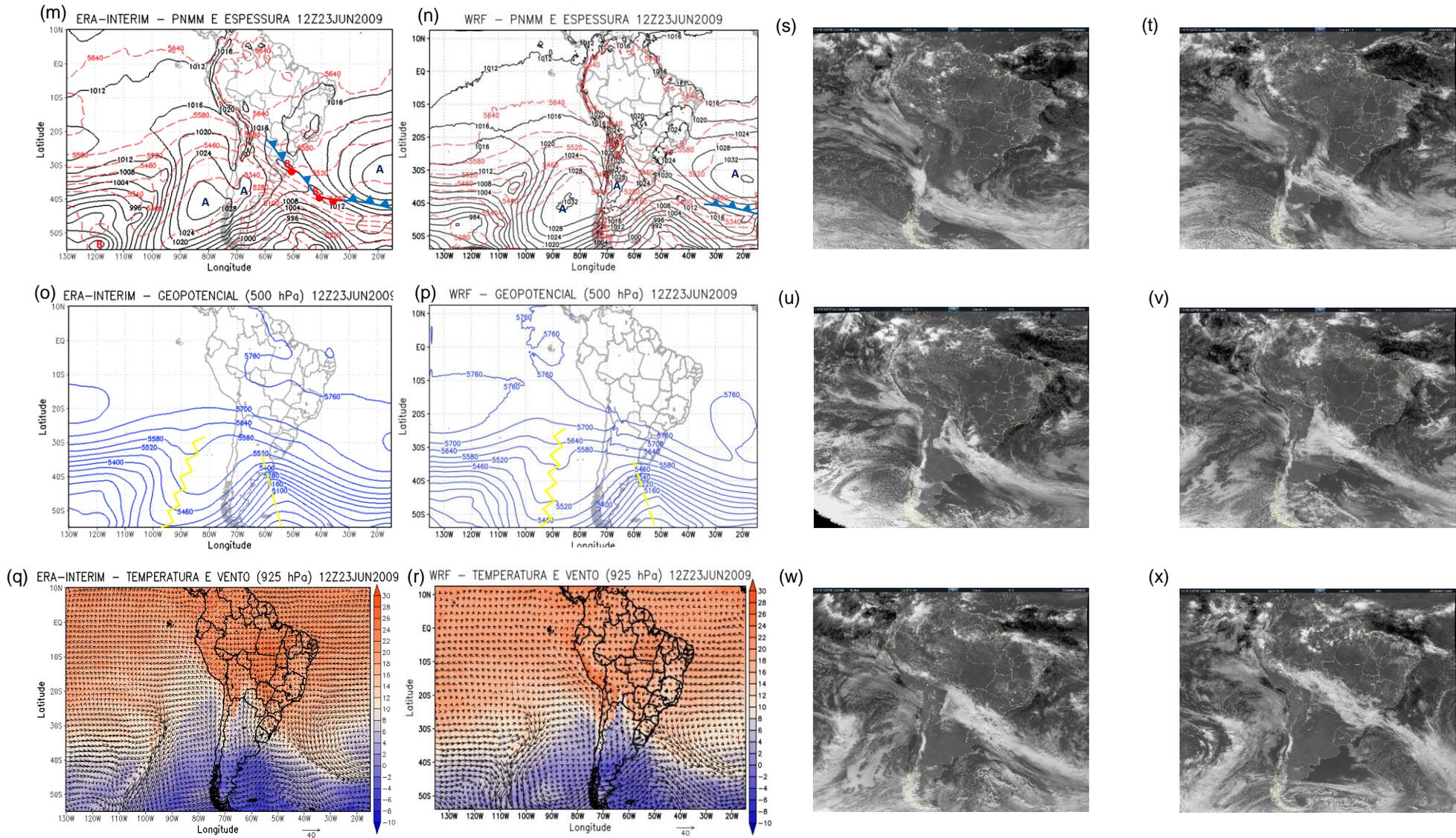


Figura 7 – Campos sinóticos do evento 1 do horário das 12:00 Z para os dados da ERA-Interim e dados do WRF de PNMM (em hPa, representada por linhas contínuas na cor preta) e espessura da camada de 1000-500 hPa (em m, representada por linhas tracejadas em vermelho), altura geopotencial (em m, representada por linhas contínuas na cor azul) em 500 hPa e temperatura (em °C, representada pelas cores) e vento em 925 hPa (em m/s, representado por vetores), respectivamente, para os dias: (a), (b), (c), (d), (e) e (f) 20/jun; (g), (h), (i), (j), (k) e (l) 22/jun; (m), (n), (o), (p), (q) e (r) 23/jun. As figuras (s), (t), (u), (v), (w) e (x) são imagens do satélite GOES-10 no canal do visível para os dias 19/jun, 20/jun, 21/jun, 22/jun, 23/jun e 24/jun, respectivamente, para o horário das 16:00 Z. Fonte: DSA-CPTEC.

A incursão de 2009 foi bastante semelhante ao evento de geada ocorrido em julho de 1981 e estudado por Fortune e Kousky (1983). No evento de 2009, a amplificação das cristas e cavados não foi tão pronunciada (Figura 7o, p), o que caracterizou uma incursão mais fraca. Para que essa incursão ocasionasse uma maior quantidade de casos de geada no Sudeste (que foi de apenas 14 casos), a posição do cavado deveria ser mais para leste, sobre o Brasil, como no caso de maio de 1979 e também no caso de abril de 1999 estudado por Satyamurty et al. (2002), os quais foram caracterizados pela ocorrência de geadas de advecção devido à intensa incursão de ar frio.

### **3.2.2 Comparação com os dados observados para o evento 1**

Das seis localidades que registraram a ocorrência de geadas entre os dias 18 e 24 de junho, apenas três contam com registro automático completo das variáveis meteorológicas, sendo elas as cidades de Caldas (21°55'S, 46°22'W, altitude de 1150 m), Maria da Fé (22°18' S, 45°22' W, altitude de 1276 m) e Passa Quatro (22°23' S, 44°57' W, altitude de 1040 m). Portanto, a comparação das simulações do WRF com as variáveis observadas será apresentada apenas para essas estações meteorológicas. As estações automáticas das cidades de Campos do Jordão e Taubaté apresentaram grande quantidade de dados faltantes no período analisado, sendo desconsideradas das análises, assim como a cidade de São Lourenço, que não possui estação meteorológica automática.

A Tabela 5 sumariza as estatísticas calculadas para as estações consideradas. Em geral, o WRF apresentou melhor habilidade em simular a temperatura do ar para as três cidades, com tendência de superestimar as temperaturas mínimas e subestimar as temperaturas máximas (Figura 8a, d, g). As simulações de temperatura foram mais acuradas para a cidade de Passa Quatro (Figura 8g), que apresentou médias de temperatura observada e simulada próximas ( $\bar{x} \approx 13,61$ ,  $\bar{y} \approx 13,82$ ), elevada correlação entre os valores simulados e observados ( $r \approx 0,94$ ), baixo bias ( $ME \approx 0,2$ ) e elevado índice de concordância ( $d \approx 0,93$ ).

No geral, a tendência do WRF é de superestimar a temperatura do ar a 2 m, com bias positivo para todas as estações comparadas. Essa tendência do modelo é observada em outros estudos que comparam as simulações do WRF com dados

observados de temperatura, tais como o de Mölders (2008), Politi et al. (2017) e Zhang, Pu e Zhang (2013).

Tabela 5 – Estatísticas calculadas para as estações meteorológicas de Caldas, Maria da Fé e Passa quatro e para os resultados do WRF extraídos para essas localidades para o evento 1.

<b>Cidade: Caldas</b>			
<b>Variável</b>	<b>T</b>	<b>Td</b>	<b>UR</b>
$\bar{x}$	11,4750	7,2893	80,1488
$\bar{y}$	15,1177	8,5242	84,3858
$\sigma_x$	6,6699	2,9169	22,7650
$\sigma_y$	3,2405	1,9754	12,3069
$r$	0,8970	0,3627	0,7891
<b>ME</b>	3,6427	1,2349	4,2370
<b>RMSE</b>	5,4209	3,1155	15,6255
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	4,0146	2,8603	15,0401
<b>d</b>	0,7577	0,5938	0,7921
<b>Cidade: Maria da Fé</b>			
<b>Variável</b>	<b>T</b>	<b>Td</b>	<b>UR</b>
$\bar{x}$	10,611	7,1464	82,8631
$\bar{y}$	11,646	7,4857	76,5894
$\sigma_x$	5,8075	2,2945	21,0189
$\sigma_y$	3,2043	2,3858	10,7196
$r$	0,8899	0,4677	0,6172
<b>ME</b>	1,0342	0,3393	-6,2737
<b>RMSE</b>	3,4467	2,4323	17,7839
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	3,2879	2,4086	16,6405
<b>d</b>	0,8515	0,6799	0,6949
<b>Cidade: Passa Quatro</b>			
<b>Variável</b>	<b>T</b>	<b>Td</b>	<b>UR</b>
$\bar{x}$	13,6054	7,9060	72,0000
$\bar{y}$	13,8069	8,5741	71,8197
$\sigma_x$	5,0112	1,9671	19,6316
$\sigma_y$	3,3467	2,1798	11,4635
$r$	0,9360	0,3138	0,6520
<b>ME</b>	0,2015	0,6681	-0,1803
<b>RMSE</b>	2,2202	2,5182	14,9020
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	2,2110	2,4279	14,9009
<b>d</b>	0,9272	0,6140	0,7457

Onde  $\bar{x}$  representa a média da variável observada,  $\bar{y}$  a média da variável simulada pelo WRF,  $\sigma_x$  o desvio-padrão observado e  $\sigma_y$  o simulado

Para ambas as cidades as simulações de temperatura do ponto de orvalho apresentaram grandes discrepâncias quando comparadas às observações. A variação de Td ao longo do dia foi melhor representada pelo WRF para a cidade de

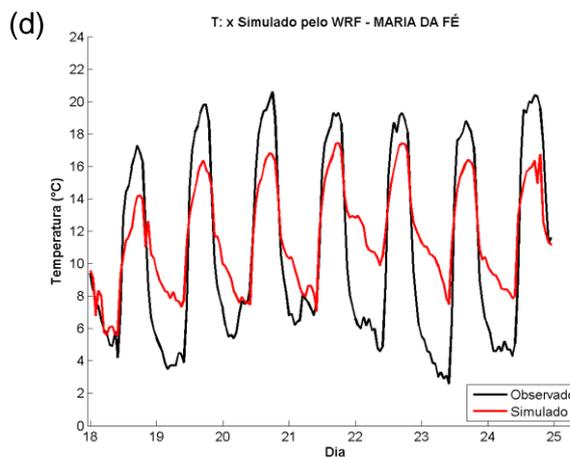
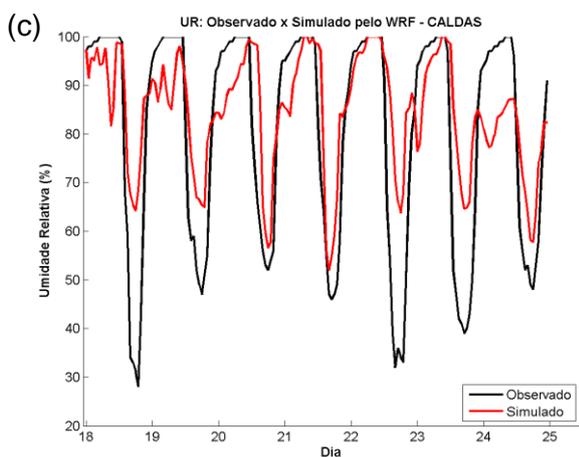
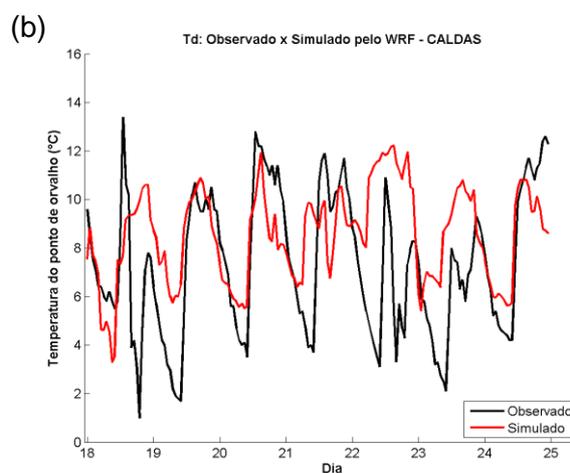
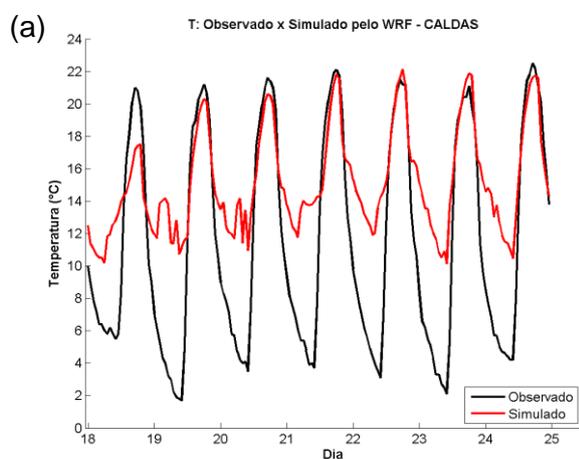
Maria da Fé (Figura 8e), que apresentou maior índice de concordância entre os dados de Td observados e simulados ( $d \approx 0,68$ ) e menor bias ( $ME \approx 0,34$ ). Geralmente, as geadas ocorrem sob condições de  $T \approx Td$  (SNYDER; MELO-ABREU, 2005) e a dificuldade do WRF em simular esta variável pode representar um obstáculo na previsão de geadas para as localidades comparadas. Erros nas simulações de Td podem decorrer de incoerências do modelo ao representar a vegetação e as condições de umidade específica próximo a superfície.

O WRF tendeu a superestimar os menores valores de umidade relativa para todas as cidades e subestimar os maiores valores de umidade (Figura c, f, i) assim como foi igualmente encontrado por Mölders (2008). Esse comportamento, no entanto, não foi observado para a cidade de Caldas (Figura 8c), cujas simulações acompanharam bem os máximos e mínimos de umidade relativa ao longo dos dias, com índice de concordância próximo a 0,8. Mölders (2008) sugere que inconsistências nas simulações de insolação podem afetar a simulação de umidade relativa e também de temperatura do ar pelo particionamento da radiação líquida em fluxos de calor sensível, latente e fluxos de calor no solo.

Com relação à velocidade e direção do vento, observa-se que o modelo superestimou a velocidade do vento para todas as localidades, além de ter apresentado grandes diferenças na direção do vento simulada (Figura 9), como foi o caso de Maria da Fé, cuja direção observada predominante é de noroeste (Figura 9c) e a simulada de nordeste (Figura 9d); além disso, a velocidade máxima do vento observada para Maria da Fé foi de aproximadamente 3,5 m/s, enquanto que o WRF indicou velocidades de até 11 m/s. A representação da topografia complexa do local no qual se encontram as estações comparadas no WRF pode justificar essas diferenças observadas, uma vez que a resolução dos dados de terreno não consegue reproduzir com detalhes as condições reais. Deficiências na representação da topografia também são apontadas por Roux et al. (2009), Zhang, Pu e Zhang (2013) e Liu et al. (2008) como um dos principais fatores a afetar a simulação de vento pelo WRF, que utiliza uma topografia mais suavizada, o que afeta o fluxo de momento (JIMENÉZ; DUDHIA, 2012). Além disso, a presença de obstáculos próximos às estações meteorológicas também pode influenciar nas comparações. Hanna e Yang (2001) sugerem ainda que, em geral, modelos de mesoescala apresentam inconsistências na simulação da direção e intensidade do

vento na baixa atmosfera devido à má representação dos processos turbulentos que nela ocorrem.

Com relação aos critérios estabelecidos por Pielke (2002) para determinação do *skill* do modelo, observa-se que os critérios 2 e 3 ( $RSME < \sigma_x$  e  $RSME_{UB} < \sigma_x$ , respectivamente) foram obedecidos para as três variáveis comparadas para as três cidades. O critério 1 ( $\sigma_x \approx \sigma_y$ ) não foi observado para nenhuma das estações, apesar das diferenças entre os desvios observados e simulados de T e Td terem sido pequenas, entre 2 e 3 °C de diferença, aproximadamente.



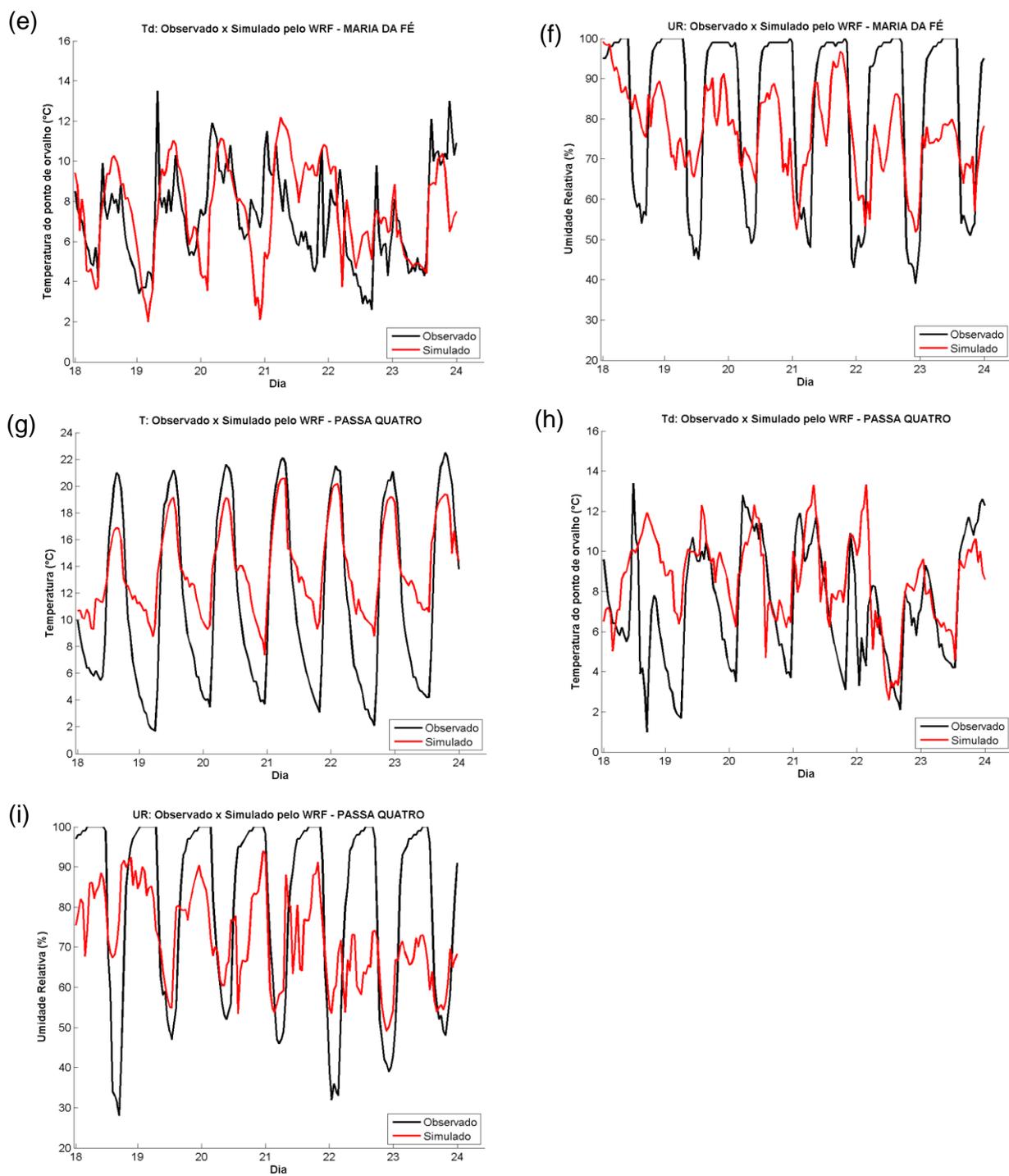


Figura 8 – Comparação entre os resultados obtidos com o WRF e os dados observados de T, Td e UR, respectivamente, para as cidades de: (a), (b) e (c) Caldas; (d), (e) e (f) Maria da Fé; (g), (h) e (i) Passa Quatro.

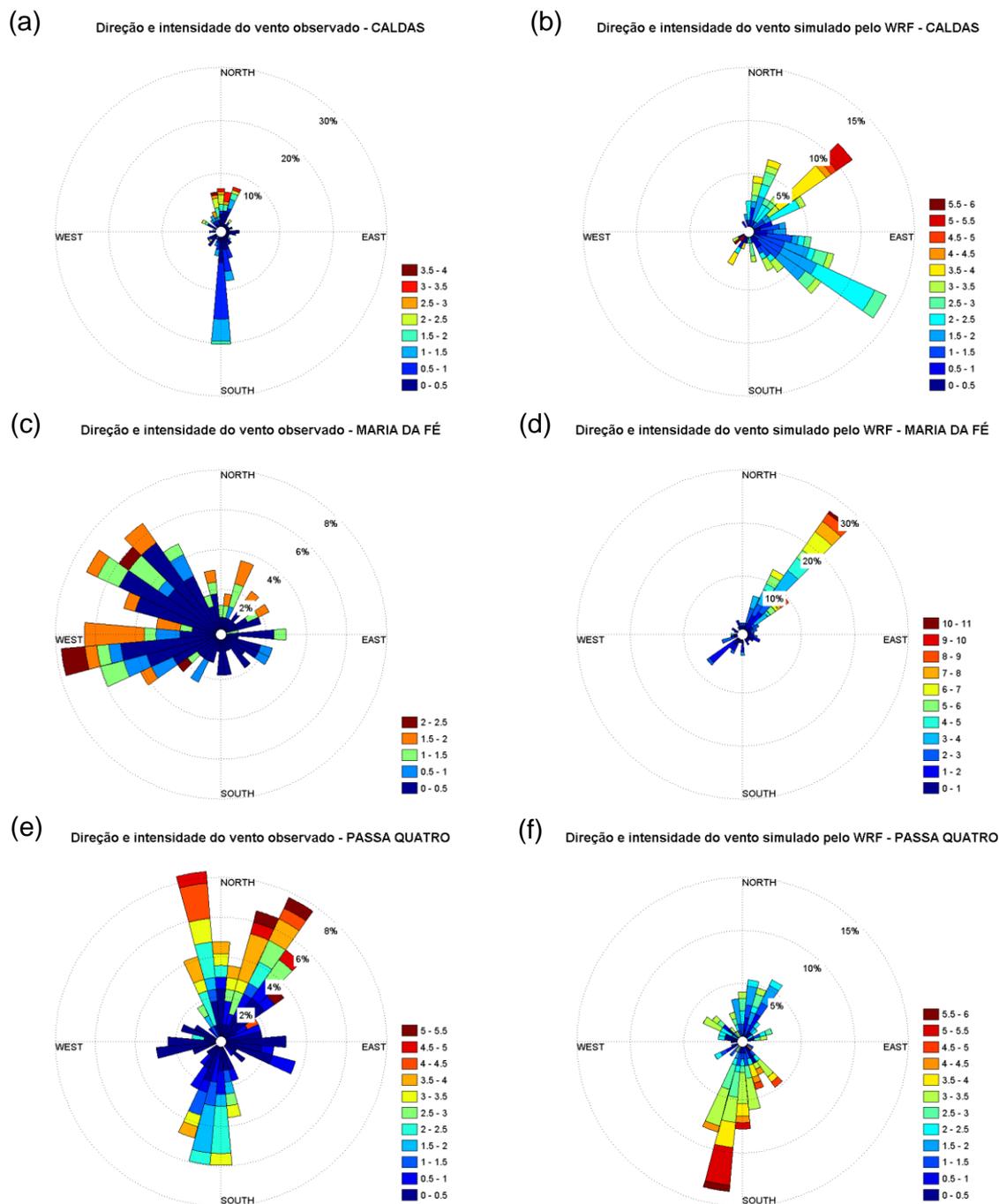


Figura 9 – Comparação entre a direção e velocidade do vento observada e simulada pelo WRF, respectivamente, para as cidades de: (a) e (b) Caldas; (c) e (d) Maria da Fé; (e) e (f) Passa Quatro.

### 3.2.3 Evento 2

No segundo evento de geada considerado para estudo, foi registrada ocorrência de 13 casos de geada nas cidades de Campos do Jordão (9 casos),

Lambari (1 caso), Maria da Fé (2 casos) e São Lourenço (1 caso), de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 – Datas de ocorrência dos casos de geada do evento 2 por cidade.

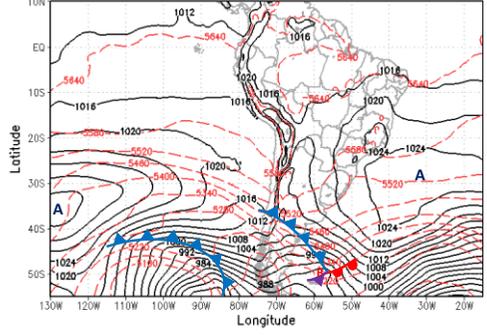
<b>Cidade</b>	<b>Dias com registro de geada</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Campos do Jordão/SP</b>	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9	<b>9</b>
<b>Maria da Fé/MG</b>	2, e 8	<b>2</b>
<b>Lambari/MG</b>	8	<b>1</b>
<b>São Lourenço/MG</b>	7	<b>1</b>
<b>TOTAL</b>		<b>13</b>

Durante todos os casos ocorridos entre os dias 1 a 9 de julho, o Sudeste do Brasil estava sob a influência do ASAS (Figura 10a, b, g, h, m, n). Entre os dias 1 a 8 observa-se uma crista em 500 hPa sobre o Atlântico Sul associada a esse sistema tanto nos campos do WRF quanto nos da ERA-Interim (Figura 10c, d, i, j). Durante esse período as condições de temperatura e vento permaneceram sem grandes alterações na região (Figura 10e, f, k, l).

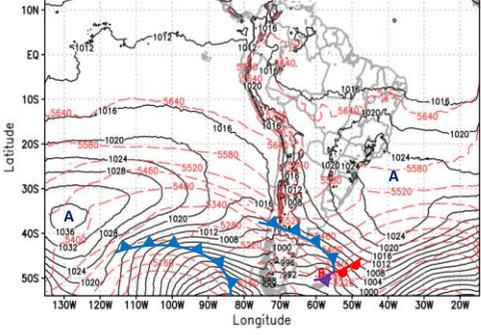
A partir do dia 9, mesmo com atuação do ASAS em superfície (Figura 10m, n), a crista em 500 hPa sobre Atlântico deixa de ser observada (Figura 10o, p); nesse dia há presença de um ciclone no sul do Atlântico e de um anticiclone em superfície na costa do Chile (Figura 10m, n); esses padrões são bastante semelhantes aos observados na incursão de ar frio do evento 1. Nos campos de altura geopotencial em 500 hPa, observa-se um cavado sobre o sul do Brasil e uma crista à oeste do Chile (Figura 10o, p), associados, respectivamente, ao ciclone e anticiclone em superfície.

As condições de alta pressão em superfície e presença de uma crista em 500 hPa, predominantes durante a ocorrência do segundo evento, representam bem as condições médias observadas durante a ocorrência de geadas no Sudeste do Brasil, conforme também mostram as composições da Figura 6. Apesar dos campos de temperatura não terem indicado um resfriamento mais expressivo na região, a atuação do ASAS e a ausência de nebulosidade observada no evento 2 (Figura 10s, t, u, v, w, x) promovem uma intensa perda radiativa da superfície no período noturno, o que leva à formação de geadas pela manhã, principalmente as geadas de radiação. Essa condição de predominância de alta pressão em dias com ocorrência de geadas também foi encontrada por Silva, Reboita e Rocha (2014) para a região do Sul de Minas Gerais.

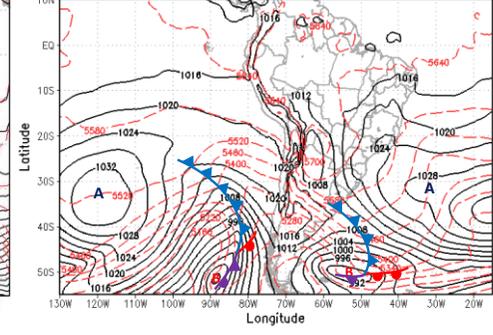
(a) ERA-INTERIM - PNMM E ESPESSURA 12Z01JUL2010



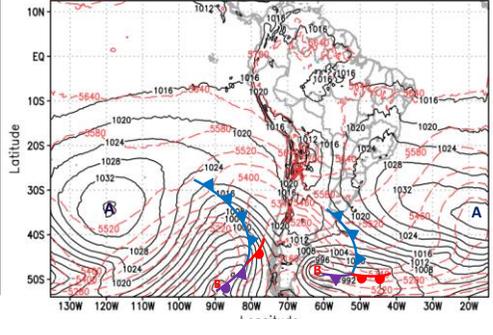
(b) WRF - PNMM E ESPESSURA 12Z01JUL2010



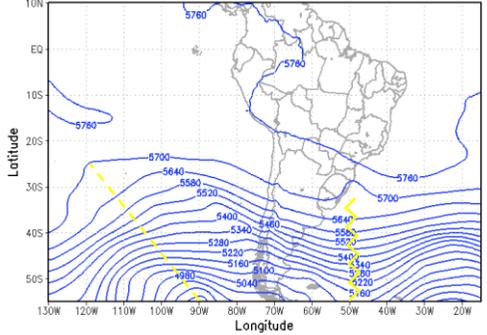
(g) ERA-INTERIM - PNMM E ESPESSURA 12Z05JUL2010



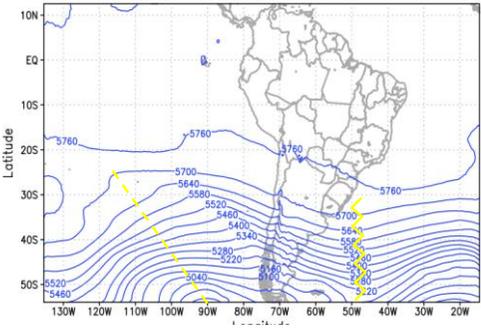
(h) WRF - PNMM E ESPESSURA 12Z05JUL2010



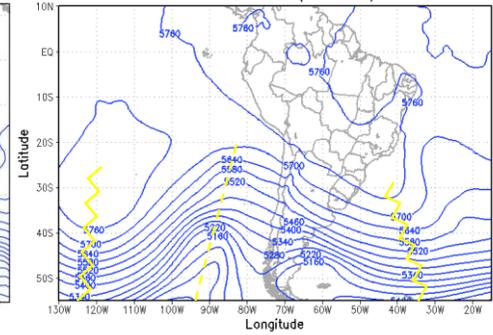
(c) ERA-INTERIM - GEOPOTENCIAL (500 hPa) 12Z01JUL2010



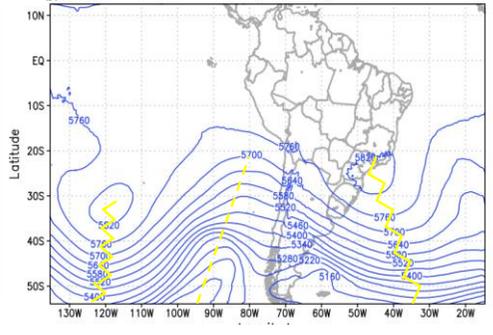
(d) WRF - GEOPOTENCIAL (500 hPa) 12Z01JUL2010



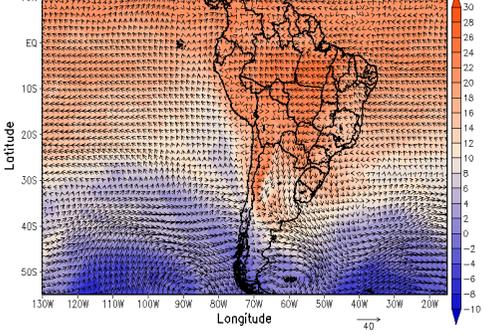
(i) ERA-INTERIM - GEOPOTENCIAL (500 hPa) 12Z05JUL2010



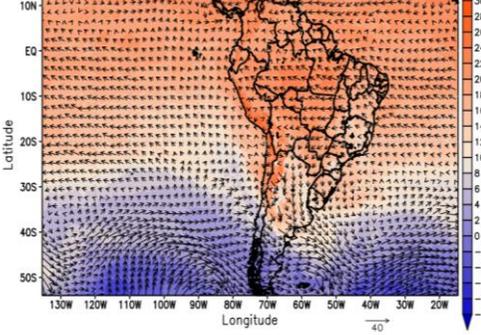
(j) WRF - GEOPOTENCIAL (500 hPa) 12Z05JUL2010



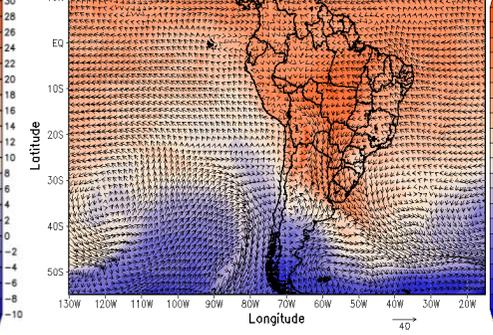
(e) ERA-INTERIM - TEMPERATURA E VENTO (925 hPa) 12Z01JUL2010



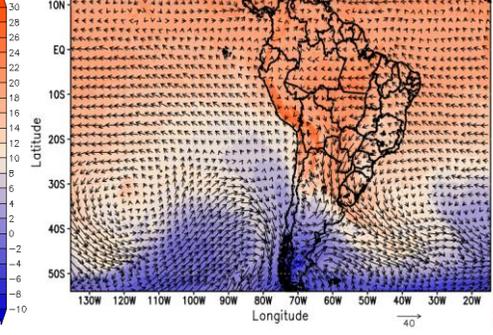
(f) WRF - TEMPERATURA E VENTO (925 hPa) 12Z01JUL2010



(k) ERA-INTERIM - TEMPERATURA E VENTO (925 hPa) 12Z05JUL2010



(l) WRF - TEMPERATURA E VENTO (925 hPa) 12Z05JUL2010



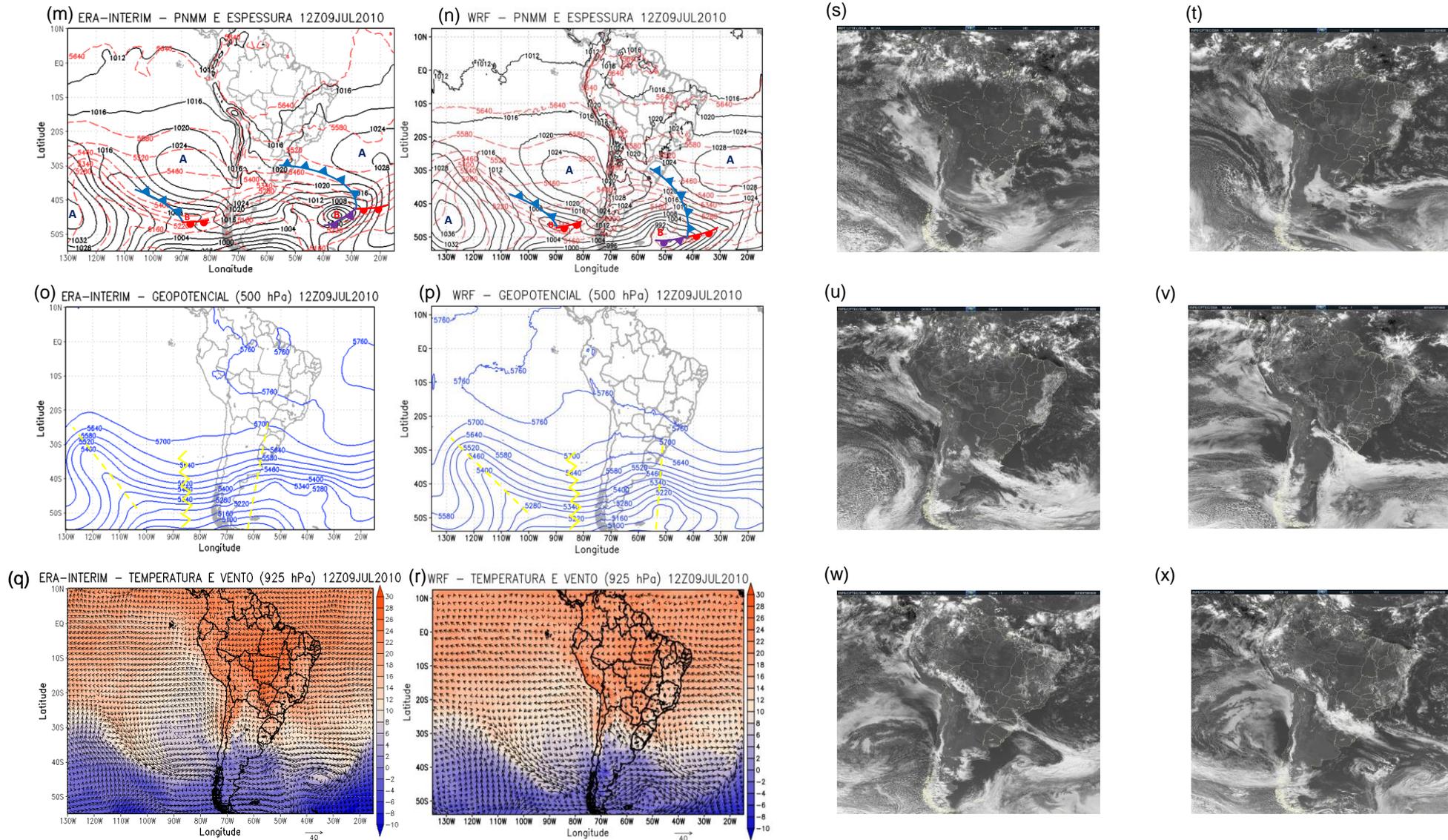


Figura 10 – Campos sinóticos do evento 2 do horário das 12:00 Z para os dados da ERA-Interim e dados do WRF de PNMM (em hPa, representada por linhas contínuas na cor preta) e espessura da camada de 1000-500 hPa (em m, representada por linhas tracejadas em vermelho), altura geopotencial (em m, representada por linhas contínuas na cor azul) em 500 hPa e temperatura (em °C, representada pelas cores) e vento em 925 hPa (em m/s, representado por vetores), respectivamente, para os dias: (a), (b), (c), (d), (e) e (f) 01/jul; (g), (h), (i), (j), (k) e (l) 05/jul; (m), (n), (o), (p), (q) e (r) 09/jul. As figuras (s), (t), (u), (v), (w) e (x) são imagens do satélite GOES-12 no canal do visível para os dias 01/jul, 03/jul, 05/jul, 07/jul, 08/jul e 09/jul, respectivamente, para o horário das 16:00 Z. Fonte: DSA-CPTEC.

Em geral, os campos gerados a partir da simulação com o WRF foram bastante semelhantes aos campos dos dados da ERA-Interim para o evento 2, tanto na posição quanto na intensidade dos sistemas atmosféricos. Apesar disso, o modelo apresentou uma leve tendência de superestimar a pressão na região Sudeste, como no dia 9, no qual a pressão indicada pelo WRF (Figura 10n) foi cerca de 4 hPa acima da indicada pelos dados de reanálise (Figura 10m). No entanto, apesar das pequenas diferenças encontradas, o modelo revela-se uma ferramenta que pode ser utilizada para a previsão das condições atmosféricas de grande escala preponderantes para a formação de geadas na região de estudo.

### ***3.2.4 Comparação com dados observados para o evento 2***

As comparações entre os dados observados e os simulados pelo WRF para o evento 2 serão apresentadas considerando-se as estações meteorológicas de Campos do Jordão (22°45' S, 45°36' W, altitude de 1642 m) e Maria da Fé (22°18' S, 45°22' W, altitude de 1276 m). A cidade de Lambari, assim como São Lourenço, não possui estação automática, o que impossibilita a comparação com os dados simulados, que são horários. A estação de Campos do Jordão não registra a direção e intensidade do vento e, portanto, as comparações de vento para essa estação não foram realizadas. A Tabela 7 mostra os resultados das estatísticas encontrados para as duas cidades.

Em geral, para o evento 2, a variável simulada com maior acurácia pelo WRF para as duas cidades foi a temperatura do ar ( $r \approx 0,9$ , baixo ME, e  $d > 0,8$ ), assim, como também foi encontrado para o evento 1. Tanto para Campos do Jordão quanto para Maria da Fé o modelo superestimou as temperaturas mínimas e subestimou as temperaturas máximas, embora as mínimas tenham sido melhor simuladas para Campos do Jordão, conforme mostra a Figura 11a. Em comparação com o evento 1, no evento 2 o WRF simulou melhor as temperaturas mínimas e subestimou mais as máximas. Em geral, o WRF apresenta uma tendência de diminuir a amplitude do ciclo diurno de temperatura.

Assim como para o evento 1, as simulações de temperatura do ponto de orvalho não foram satisfatórias. O WRF não desempenhou grande habilidade em acompanhar as variações de Td ao longo dos dias. Por exemplo, no dia 7, as menores temperaturas do ponto de orvalho observadas para Maria da Fé (Figura

11e) e Campos do Jordão (Figura 11b) foram de aproximadamente  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente; as temperaturas indicadas pelo modelo foram cerca de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  mais elevada do que a observada em Maria da Fé ( $T_{d\text{WRF}} \approx 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  acima da observada pela estação de Campos do Jordão ( $T_{d\text{WRF}} \approx 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Novamente, vale ressaltar que a má representação de Td pelo WRF pode decorrer de incoerências na representação da vegetação e umidade em baixos níveis pelo modelo. Essas discrepâncias refletem nas estatísticas encontradas para essa variável, tais como a baixa correlação entre os valores observados e simulados ( $r \approx 0,07$  para Campos do Jordão e  $r \approx -0,19$  para Maria da Fé) e baixo índice de concordância ( $d \approx 0,37$  para Campos do Jordão e  $d \approx 0,29$  para Maria da Fé). Se for considerado todo o período comparado, o modelo tendeu a subestimar os valores de Td para as duas cidades, com  $ME < 0$  para ambas.

Tabela 7 – Estatísticas calculadas para as estações meteorológicas de Campos do Jordão e Maria da Fé e para os resultados do WRF extraídos para essas localidades para o evento 2.

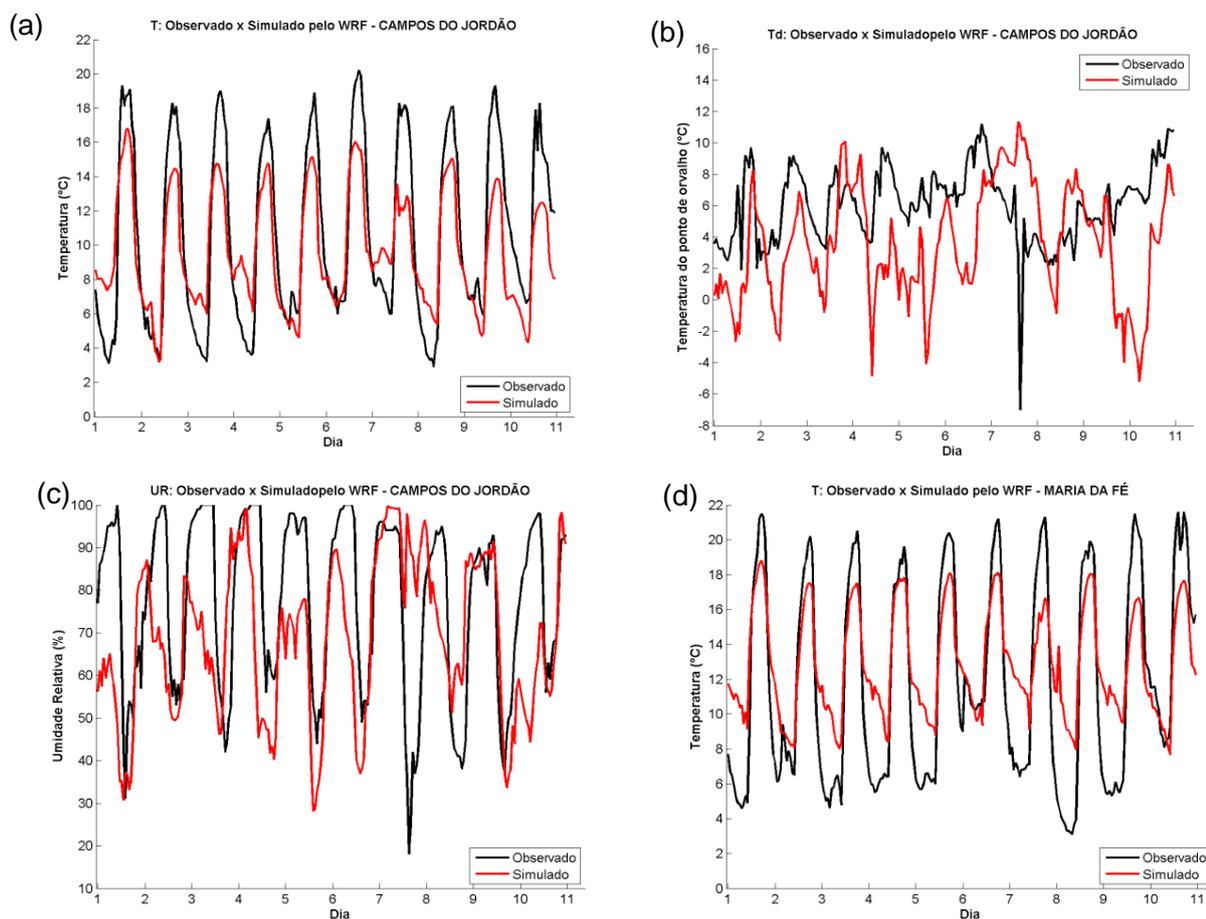
<b>Cidade: Campos do Jordão</b>			
<b>Variável</b>	<b>T</b>	<b>Td</b>	<b>UR</b>
$\bar{x}$	10,5958	6,0079	76,9542
$\bar{y}$	9,6283	3,5060	68,3644
$\sigma_x$	5,2166	2,4089	20,4375
$\sigma_y$	3,3353	3,6333	18,4592
<b>R</b>	0,8774	0,0677	0,3870
<b>ME</b>	-0,9675	-2,5019	-8,5898
<b>RMSE</b>	2,9512	4,8993	23,2006
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	2,7881	4,2123	21,5519
<b>D</b>	0,8771	0,3681	0,6356
<b>Cidade: Maria da Fé</b>			
<b>Variável</b>	<b>T</b>	<b>Td</b>	<b>UR</b>
$\bar{x}$	11,7587	7,6692	80,4500
$\bar{y}$	12,8533	6,4606	67,3223
$\sigma_x$	5,7923	2,7442	22,1729
$\sigma_y$	3,0585	2,9918	16,2550
<b>R</b>	0,8971	-0,1888	0,5613
<b>ME</b>	1,0946	-1,2085	-13,1277
<b>RMSE</b>	3,5029	4,5783	22,8502
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	3,3275	4,4159	18,7028
<b>D</b>	0,8403	0,2885	0,6864

Onde  $\bar{x}$  representa a média da variável observada,  $\bar{y}$  a média da variável simulada pelo WRF,  $\sigma_x$  o desvio-padrão observado e  $\sigma_y$  o simulado

Com relação à umidade relativa, para ambas as cidades, o modelo subestimou os valores elevados de umidade e apresentou resultados mais próximos aos observados para os menores valores de umidade (Figura 11c, f), exceto também para o dia 7, no qual o modelo superestimou em cerca de 50% a umidade relativa para Maria da Fé e em 70% para Campos do Jordão.

Assim como para o evento 1, o WRF superestimou a velocidade do vento. Para Maria da Fé, os ventos observados são predominantemente de noroeste (Figura 12a) e bastante fracos, entre 0 e 0,5 m/s, o que é uma condição bastante favorável à ocorrência de geadas. No entanto, os ventos simulados pelo WRF foram de quadrante nordeste (Figura 12b), em sua maioria, com velocidades de até 6 m/s. De acordo com Roux et al. (2009), o WRF tende a superestimar mais a velocidade do vento para regiões montanhosas do que para regiões planas, dessa forma, a má representação da Serra da Mantiqueira, onde está localizada Maria da Fé, pelo modelo pode impactar nas simulações de vento.

Diferentemente do que foi encontrado para o evento 1, apenas a variável temperatura do ar atingiu os critérios 2 e 3 de Pielke (2002) para determinação do *skill* do modelo; as diferenças entre o desvio padrão observado e simulado também foram baixas, próximas a 2 °C para as duas cidades.



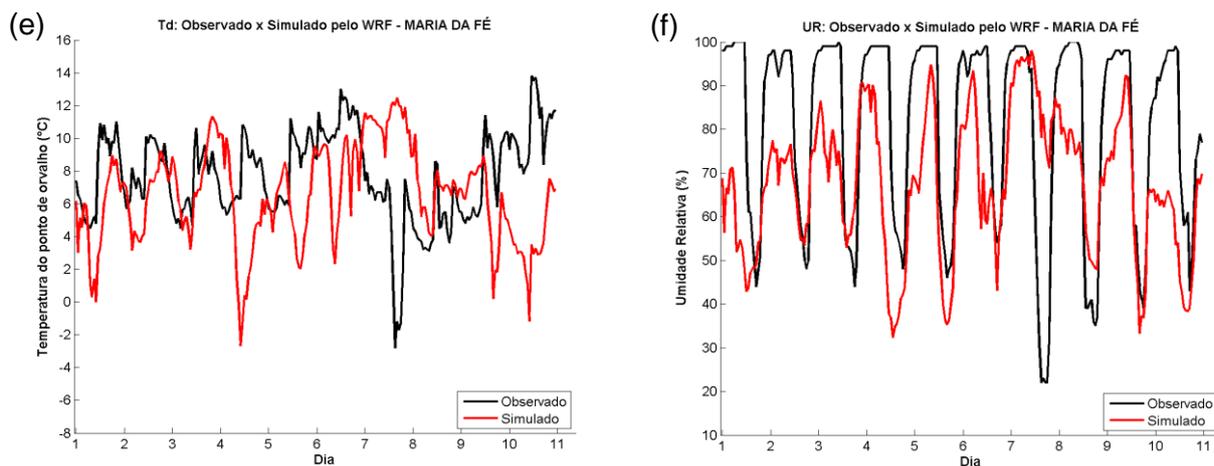


Figura 11 – Comparação entre os resultados obtidos com o WRF e os dados observados de T, Td e UR, respectivamente, para as cidades de: (a), (b) e (c) Campos do Jordão (d), (e) e (f) Maria da Fé.

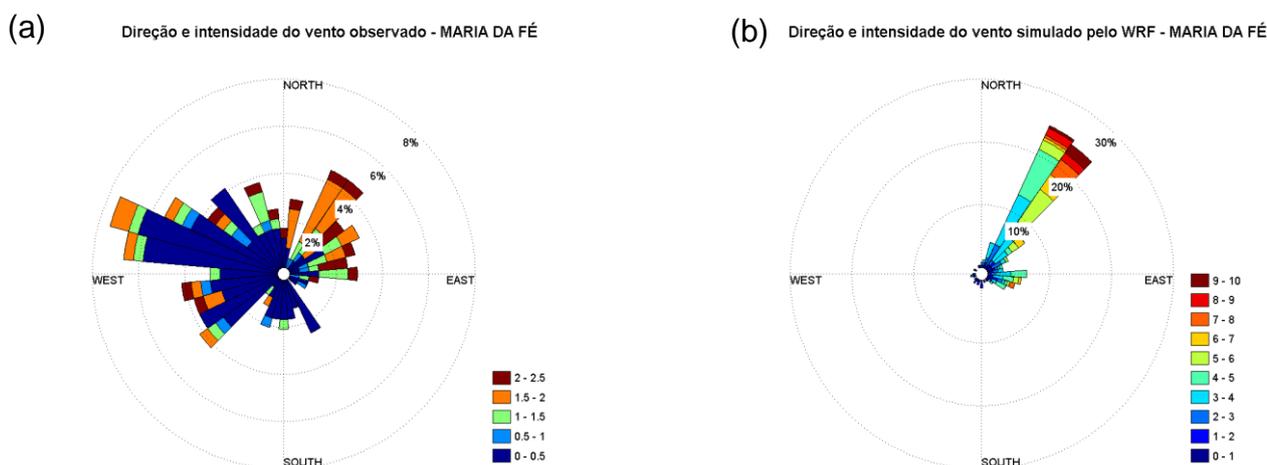


Figura 12 – Comparação entre a direção e velocidade do vento observada e simulada pelo WRF, respectivamente, para a cidade de Maria da Fé.

### 3.2.5 Evento 3

O terceiro evento de geada analisado (09/06/2011 – 19/06/2011) caracterizou-se pela ocorrência de 15 casos, sendo 10 deles ocorridos em Campos do Jordão, de acordo com a Tabela 8. Conforme previamente mencionado, dos 11 dias de duração do evento 3, apenas 6 dias (13/06/2011 – 18/06/2011) foram simulados pelo WRF devido à falta das condições de fronteira fornecidas pelo GFS para os dias 08/06/2011 – 12/06/2011, o que impossibilitou a simulação desses dias pelo modelo.

Tabela 8 – Datas de ocorrência dos casos de geada do evento 3 por cidade.

<b>Cidade</b>	<b>Dias com registro de geada</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Caldas/MG</b>	18	<b>1</b>
<b>Campos do Jordão/SP</b>	9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19	<b>10</b>
<b>Maria da Fé/MG</b>	9, 16, 18 e 19	<b>4</b>
<b>TOTAL</b>		<b>15</b>

As condições sinóticas predominantes sobre o Sudeste durante o evento 3 foram de atuação de alta pressão associada ao ASAS, assim como foi igualmente observado para o evento 2 e para alguns dias do evento 1. Como essa condição já foi amplamente abordada nos casos anteriores e nas composições da Figura 6, por brevidade, os campos meteorológicos do WRF e dos dados de reanálise para o evento 3 não serão discutidos, sendo apresentados no apêndice. Porém, vale ressaltar que o WRF apresentou grande habilidade em simular a posição e intensidade do ASAS sobre o continente para esse evento.

### **3.2.6 Comparação com dados observados para o evento 3**

Assim como para as demais simulações, para o evento 3, o WRF também apresentou tendência de subestimar as temperaturas máximas e superestimar as temperaturas mínimas, embora as simulações de temperatura mínima tenham sido bastante próximas aos valores observados para as estações de Caldas (Figura 13a) e Campos do Jordão (Figura 13d). As correlações entre a temperatura observada e simulada, de acordo com a Tabela 9, foram superiores a 0,9 para Caldas e Maria da Fé e próxima a 0,8 para Campos do Jordão, o que indica também elevada concordância entre os valores observados e simulados ( $d > 0,8$ ). Em geral, o erro do WRF ao simular a temperatura do ar foi em torno de 2 a 3 °C para esse evento.

Ao contrário do que foi observado para os demais eventos analisados, para o evento 3, o WRF apresentou melhor desempenho em acompanhar o ciclo diurno da temperatura do ponto de orvalho (Figura 13b, e, h), principalmente para a cidade de Caldas, que apresentou  $d > 0,7$  para a Td (Figura 13b). Apesar disso, de modo geral, as estatísticas (Tabela 9) não apontam grande acurácia do modelo em simular a Td; para alguns períodos, o WRF tendeu a superestimar a curva observada de Td, para outros a tendência foi de subestimativa, o que reflete nos valores baixos de

correlação para essa variável ( $r \approx 0,53$  para Caldas,  $r \approx 0,11$  para Campos e Jordão e  $r \approx 0,21$  para Maria da Fé).

Tabela 9 – Estatísticas calculadas para as estações meteorológicas de Caldas, Campos do Jordão e Maria da Fé e para os resultados do WRF extraídos para essas localidades para o evento 3.

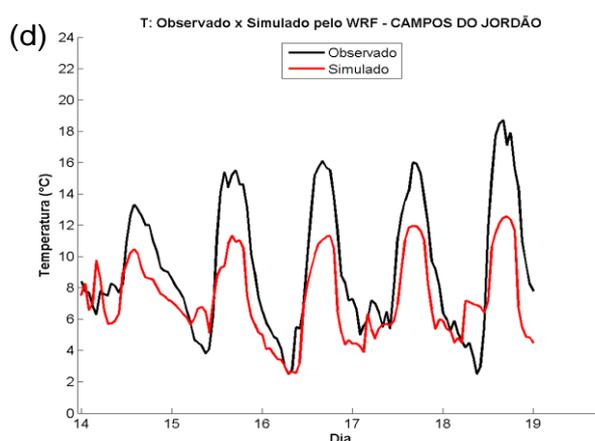
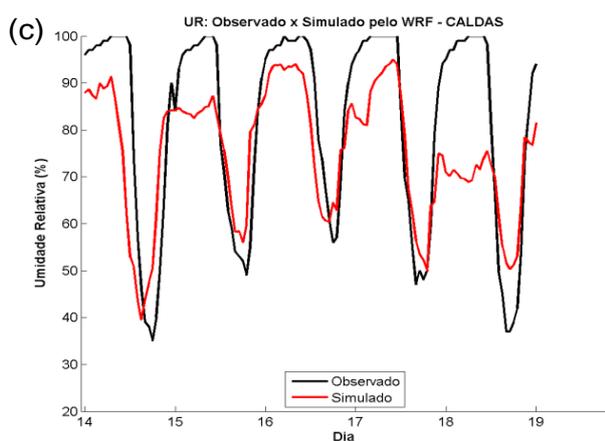
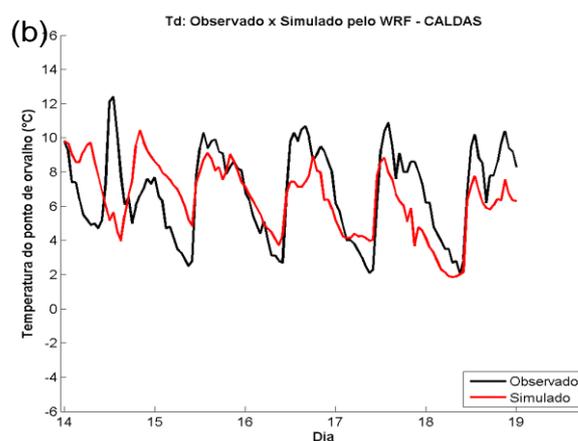
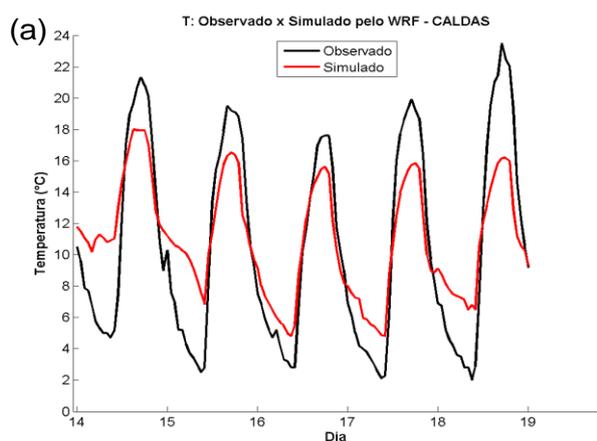
<b>Cidade: Caldas</b>			
<b>Variável</b>	<b>T</b>	<b>Td</b>	<b>UR</b>
$\bar{x}$	10,5496	6,8198	81,7603
$\bar{y}$	10,9881	6,4301	75,1846
$\sigma_x$	6,3434	2,5845	21,1357
$\sigma_y$	3,6218	2,0590	14,0640
$r$	0,9183	0,5343	0,7920
<b>ME</b>	0,4385	-0,3898	-6,5758
<b>RMSE</b>	3,3555	2,3112	14,6790
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	3,3267	2,2781	13,1237
<b>d</b>	0,8826	0,7234	0,8294
<b>Cidade: Campos do Jordão</b>			
<b>Variável</b>	<b>T</b>	<b>Td</b>	<b>UR</b>
$\bar{x}$	9,3388	6,0182	82,4793
$\bar{y}$	7,3226	4,5997	84,4924
$\sigma_x$	4,1867	2,0726	18,2707
$\sigma_y$	2,6166	2,3605	15,1887
$r$	0,8577	0,1077	0,6810
<b>ME</b>	-2,0163	-1,4185	2,0130
<b>RMSE</b>	3,0986	3,2792	13,7497
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	2,3529	2,9565	13,6015
<b>d</b>	0,8037	0,3993	0,8154
<b>Cidade: Maria da Fé</b>			
<b>Variável</b>	<b>T</b>	<b>Td</b>	<b>UR</b>
$\bar{x}$	9,8835	6,5140	82,9917
$\bar{y}$	10,7024	6,4021	76,1910
$\sigma_x$	5,4888	2,2210	20,2066
$\sigma_y$	2,8942	1,4548	13,0395
$r$	0,9286	0,2087	0,7953
<b>ME</b>	0,8190	-0,1120	-6,8007
<b>RMSE</b>	3,0978	2,3803	14,2885
<b>RMSE<sub>UB</sub></b>	2,9876	2,3777	12,5663
<b>d</b>	0,8601	0,5066	0,8167

Onde  $\bar{x}$  representa a média da variável observada,  $\bar{y}$  a média da variável simulada pelo WRF,  $\sigma_x$  o desvio-padrão observado e  $\sigma_y$  o simulado

Além da temperatura do ar a 2 m, a umidade relativa foi simulada com acurácia pelo WRF, com índice de concordância superior a 0,8 para todas as cidades. O fato do WRF ter simulado melhor as condições de umidade a 2 m pode

ter resultado em melhores simulações da Td. Apenas T e UR cumpriram com os critérios 2 e 3 de Pielke (2002) para determinação do *skill*.

De todas as comparações de velocidade do vento realizadas, a simulação do evento 3 para a cidade de Caldas é a que mais se aproxima do comportamento do vento observado. Para essa estação, o vento observado é entre 0,5 e 1 m/s e de quadrante sul (Figura 14a); o vento simulado apresenta direção cerca de 45° menor, sendo de sudeste, com predominância de velocidades entre 2 e 3 m/s (Figura 14b). Para Maria da Fé, as simulações de vento foram extremamente discrepantes; o vento observado (Figura 14c) apresentou direções variadas ao longo do período simulado, sendo a menor porcentagem observada correspondente à direção nordeste, que foi a indicada pelo WRF como a direção predominante do vento simulado para essa localidade (Figura 14d).



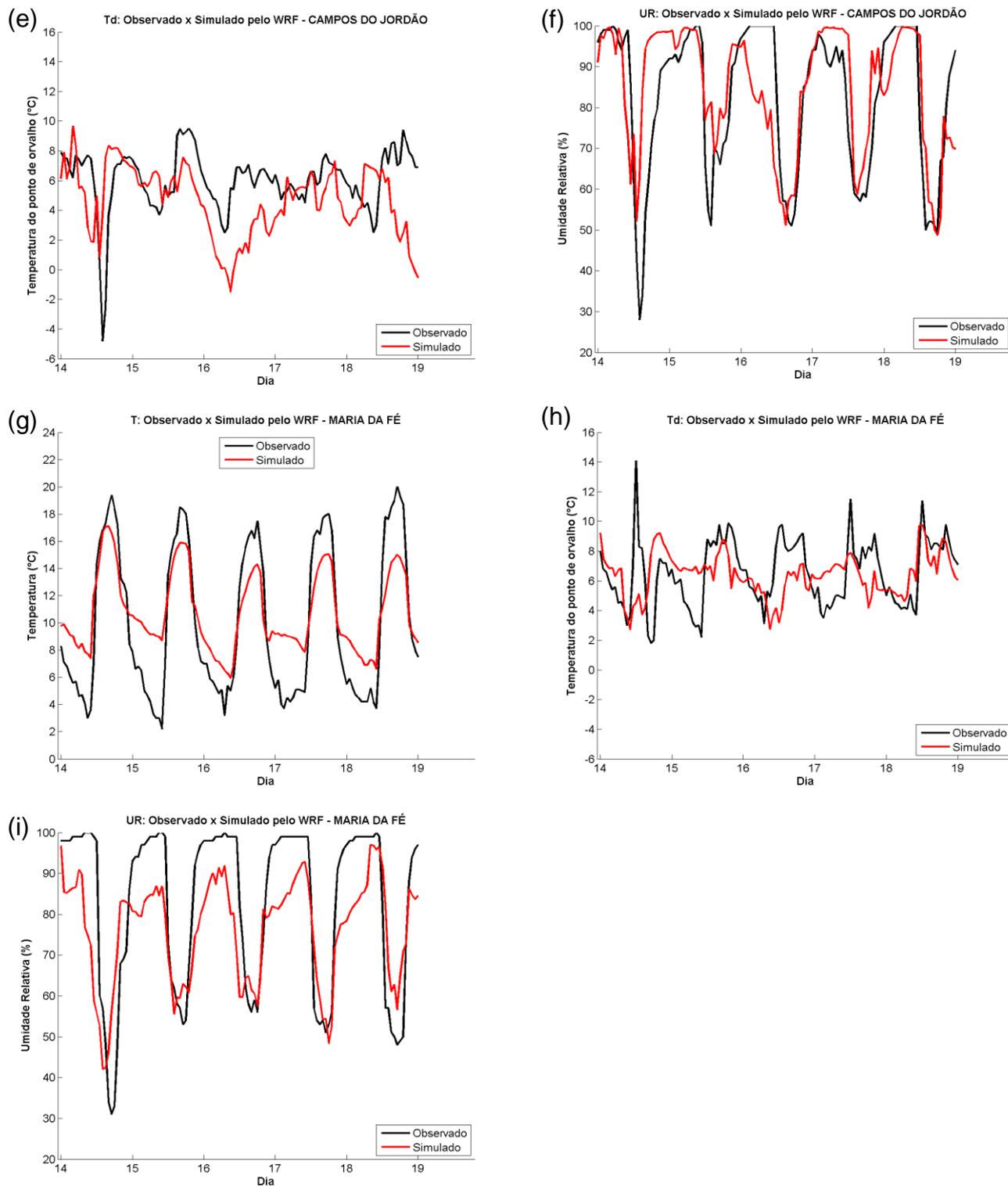
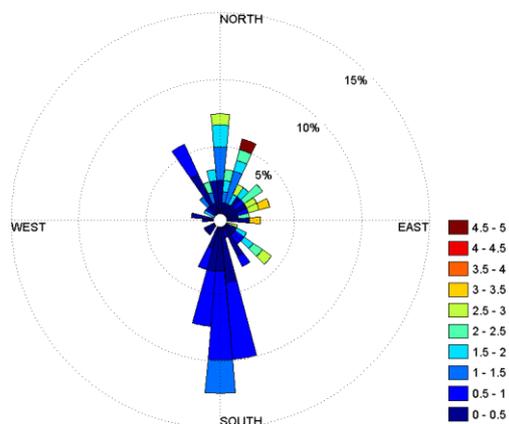
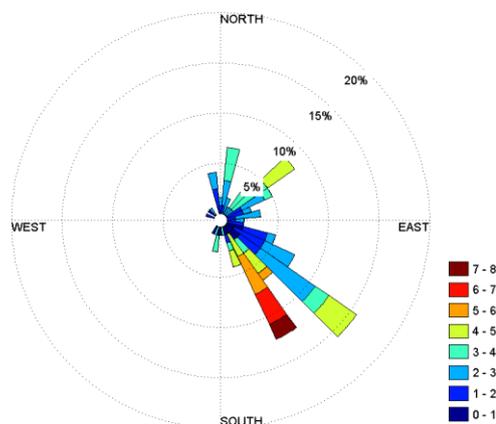


Figura 13 – Comparação entre os resultados obtidos com o WRF e os dados observados de T, Td e UR, respectivamente, para as cidades de: (a), (b) e (c) Caldas; (d), (e) e (f) Campos do Jordão; (g), (h) e (i) Maria da Fé.

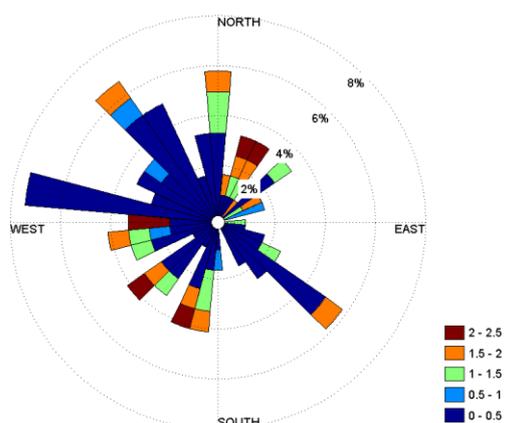
(a) Direção e intensidade do vento observado - CALDAS



(b) Direção e intensidade do vento simulado pelo WRF - CALDAS



(c) Direção e intensidade do vento observado - MARIA DA FÉ



(d) Direção e intensidade do vento simulado pelo WRF - MARIA DA FÉ

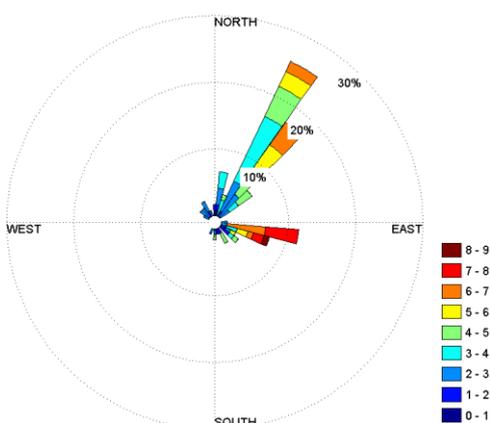


Figura 14 – Comparação entre a direção e velocidade do vento observada e simulada pelo WRF, respectivamente, para as cidades de: (a) e (b) Caldas; (c) e (d) Maria da Fé.

Considerando os três eventos de geada analisados, observa-se que o WRF apresentou melhores resultados para as cidades de menor altitude. Para o evento 1, os resultados de T foram melhores para a estação de Passa Quatro (altitude de 1040 m), no evento 2 as comparações como um todo foram melhores para Maria da Fé (altitude de 1276 m) do que para Campos do Jordão (altitude de 1642 m) e, para o evento 3, todas as variáveis consideradas foram melhor simuladas para Caldas (altitude de 1150 m) quando comparadas a Maria da Fé e Campos do Jordão. Essa habilidade do modelo em simular variáveis meteorológicas com maior acurácia para localidades de terreno menos complexo foi também observada por Prabha e Hoogenboom (2008), Roux et al. (2009), Dasari et al. (2014), Zhang, Pu e Zhang (2013), Jimenéz e Dudhia (2012) e Liu et al. (2008). De todas as estações

comparadas, a única que não se localiza na Serra da Mantiqueira é a estação de Caldas, que apresentou os resultados de vento menos discrepantes para o evento 3, o que ressalta o quão importante é o impacto da topografia na representação de vento pelo modelo, assim como para as demais variáveis.

## 4. CONCLUSÃO

A partir deste estudo foi possível confirmar que a região Sudeste do Brasil registra geadas, principalmente, durante os meses de maio a setembro, com uma frequência média de cerca de 20 dias de ocorrência por ano, diferente do que já foi encontrado pela literatura, que indicava valor médio de 5 dias ao ano. Vale destacar que as geadas podem impactar de forma significativa o setor agrícola, acarretando prejuízos econômicos. As estações localizadas na Serra da Mantiqueira foram as que apresentaram o maior registro de geadas no Sudeste entre os anos de 2009 e 2017, enfatizando o papel da altitude na ocorrência de menores temperaturas e, conseqüentemente, na formação de geadas.

A maioria dos casos de geada registrados no Sudeste entre 2009 e 2017 ocorreram sob atuação do setor oeste do ASAS sobre a região. Vários indícios apresentados nas composições sinóticas da Figura 6 mostram essa influência do ASAS para a ocorrência do fenômeno no Sudeste: nos dias com ocorrência de geadas os ventos são predominantemente de quadrante norte, se a ocorrência de geadas estivesse associada à atuação de sistemas de alta pressão pós-frontais, os ventos seriam de quadrante sul; a PNMM é cerca de 2,5 hPa mais elevada do que a climatologia, o que caracteriza a atuação de alta pressão; e há predominância de uma crista em 500 hPa sobre a região nos dias com registro do fenômeno. O ASAS adentra o continente sul americano durante o inverno e inibe a formação de nuvens; sem nuvens a superfície terrestre tem maior perda radiativa noturna, o que leva ao registro de baixas temperaturas no início da manhã. Para os casos analisados, a temperatura em 925 hPa foi cerca de 2 °C mais baixa, em média, do que o valor climatológico, o que foi suficiente para que houvesse registro de geadas.

Dos três eventos selecionados para análise sinótica e numérica, em apenas um (evento 1) a ocorrência de geadas no Sudeste pôde ser atrelada à ocorrência de incursão de ar frio. A incursão promoveu a entrada de ar polar no Sudeste, porém a diminuição de temperatura representada tanto pelo WRF quanto pelos dados da reanálise ERA-Interim não foi tão significativa na região. O que contribuiu de fato para um maior resfriamento local foi a atuação do ASAS, que foi a condição predominante durante a ocorrência dos eventos 2 e 3. Dessa forma, pode-se inferir

que a incursão de ar frio é uma condição que pode favorecer a ocorrência de geadas no Sudeste, principalmente se for uma incursão intensa, porém a condição determinante é a atuação do ASAS.

Em escala sinótica, o WRF simulou com grande acurácia a posição dos sistemas atmosféricos, como os ciclones e anticiclones, as cristas e cavados, e a direção e intensidade do vento em superfície, indicando que este é uma ferramenta eficaz na previsão das condições sinóticas preponderantes para a formação de geadas na região.

Com relação às comparações das simulações do WRF com dados observados, tem-se que o modelo apresenta elevada habilidade em simular a temperatura do ar a 2 m, sendo a variável que apresentou melhor concordância entre os valores observados e simulados e menor erro. Em geral, o modelo tende a superestimar as temperaturas mínimas e subestimar as temperaturas máximas em cerca de 2 a 3 °C. Essa mesma tendência foi observada para todas as cidades comparadas de todos os eventos estudados e também em outros trabalhos encontrados na literatura. Todas as cidades comparadas possuem elevadas altitudes (Caldas: 1150 m, Campos do Jordão: 1642 m, Maria da Fé: 1276 m, Passa Quatro: 1040 m) e os resultados para a temperatura podem indicar uma deficiência do WRF em simular as variações de temperatura em função da orografia local. Além disso, deficiências nas parametrizações de radiação podem afetar o balanço de energia na superfície e as representações dos fluxos de calor sensível e latente, o que afeta no valor simulado de temperatura e também de umidade.

O modelo não apresentou habilidade satisfatória em simular a temperatura do ponto de orvalho, sendo que as variações de Td ao longo do dia só foram bem caracterizadas no evento 3. Para a UR, assim como para a temperatura do ar, o WRF apresentou tendência de subestimar (superestimar) os máximos (mínimos) de umidade. Td e UR são variáveis importantes na previsão de geadas, uma vez que estas geralmente ocorrem sob condições de baixa Td e o conteúdo de umidade presente na atmosfera pode indicar até mesmo o tipo de geada: geadas brancas ocorrem sob condições de elevada UR e as geadas negras sob condições de menor umidade. Deficiências do WRF ao representar a vegetação local podem afetar as simulações de umidade na baixa atmosfera e conseqüentemente a obtenção da Td.

De modo geral, o vento a 10 m não foi bem representado pelo WRF para nenhuma das localidades comparadas, sendo a velocidade sempre superestimada.

Esses resultados podem decorrer da resolução dos dados de terreno utilizados pelo modelo, que tende a suavizar a topografia. Diversos estudos na literatura apontam a má representação de terrenos complexos pelo WRF como o principal fator a afetar as simulações de vento, assim como também das demais variáveis meteorológicas.

Portanto, as saídas do WRF podem ser utilizadas com eficácia na análise de padrões sinóticos que forneçam indicativos para a ocorrência de geadas na região Sudeste, porém, a previsão pontual do fenômeno utilizando o modelo não é indicada, já que a maioria dos casos de geada no Sudeste ocorrem na Serra da Mantiqueira e a topografia não é bem representada pelo WRF.

## 5. REFERÊNCIAS

AHRENS, C. D. **Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment**. 10 ed. Belmont, USA: Brooks/Cole, 2013.

AL-ISSAWI, M.; RIHAN, H. Z.; EL-SARKASSY, N.; FULLER, M. P. Frost Hardiness Expression and Characterisation in Wheat at Ear Emergence. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 199, n. 1, p. 66-74, 2013.

ALVARES, C. A.; SENTELHAS, P. C.; STAPE, J. L. Modeling monthly meteorological and agronomic frost days, based on minimum air temperature, in Center-Southern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 134, p. 177-191, 2017.

AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P.; LLOPART, M. The state-of-the-art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. **Annals of the New York Academy of Sciences**, p. 1-23, 2018.

ARAUJO, C. E. S.; MASSIGNAN, A. M.; BORGES, R. C.; MINUZZI, R. B. **Previsão de geadas em Santa Catarina**. Florianópolis: EPAGRI, 2009.

BARLOW, K. M.; CHRISTY, B. P.; O'LEARY, G. J.; RIFFKIN, P. A.; NUTTALL, J. G. Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production: A review. **Field Crops Research**, v. 171, n. 1, p. 109-119, 2015.

BISCARO, G. A. **Meteorologia Agrícola Básica**. 1 ed. Cassilândia: Ed. UNIGRAF, 2007.

BUCENE, L. C.; RODRIGUES, L. H. A.; MEIRA, C. A. A. **Mineração de Dados Climatológicos para Previsão de Geadas e Deficiência Hídrica para as Culturas do Café e da Cana-de-Açúcar para o Estado de São Paulo**. 1 ed. Campinas: EMBRAPA, 2002.

CAMARGO, M. B. P.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; ALFONSI, R. R.; ORTOLANI, A. A.; BRUNINI, O. Probabilidade de Ocorrência de Temperaturas Mínimas Absolutas Mensais e Anual no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 52, n. 2, p. 161-168, 1993.

CARAMORI, P. H.; ESQUERDO, J. C. D. M.; ZULLO JÚNIOR, J.; PINTO, H. S.; ASSAS, E. D. Análise da ocorrência de geadas no Estado do Paraná com base na

temperatura de superfície obtida dos dados AVHRR/NOAA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis. **Anais eletrônicos...** 2007, p. 5623-5629.

CARAMORI, P.H.; MANETTI FILHO, J. LEAL, A. C.; MORAIS, H. **Geada: técnicas para proteção dos cafezais**. Londrina: IAPAR, 2000.

CASTILLO, F. E.; SENTIS, F. C. **Agrometeorología**. 2 ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2001.

CASTRO, C. N. **A Agropecuária na Região Sudeste: Limitações e Desafios Futuros**. Rio de Janeiro: Texto para Discussão/IPEA, 2014.

CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC). **Boletim Técnico**. Disponível em: <<http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>>. Acesso em: 26 jul. 2018.

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? - Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Models Development**, n. 7, p. 1247-1250, 2014.

DEAKIN, R. E.; KILDEA, D. G. A note on Standard Deviation and RMS. **The Australian Surveyor**, v. 44, n. 1, p. 74-79, 1999.

DASARI, H. P.; SALGADO, R.; PERDIGAO, J.; CHALLA, V. S. A Regional Climate Simulation Study Using WRF-ARW Model over Europe and Evaluation for Extreme Temperature Weather Events. **International Journal of Atmospheric Sciences**, p. 1-22, 2014.

DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C. M. ; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M. ; GEER, A. J.; HAIMBERGER, L. ; HEALY, S. B.; HERSBACH, H. ; HÓLM, E. V.; ISAKSEN, L. ; KÅLLBERG, P.; KÖHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCRETTE, J.; PARK, B.; PEUBEY, C. ; DE ROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J.; VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, p. 555-597, 2011.

DUDHIA, J. Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 46, n. 20, p. 3077-3107, 1989.

ESCOBAR, G. C. J. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 241-254, 2007.

FARINELLI, R.; FORNASIERI FILHO, D.; BORDIN, L.; PENARIOL, F. G.; VOLPE, C. A. Efeitos de Geada no Desenvolvimento do Feijoeiro em Sucessão a Espécies Vegetais e Adubação Nitrogenada. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 249-252, 2010.

FATHALLI, B.; POHL, B.; CASTEL, T.; SAFI, M. J. Dynamical downscaling of temperature variability over Tunisia: evaluation a 21-year-long simulation performed with the WRF model. **Journal of Climatology & Weather Forecasting**, v. 4, n. 2, p. 1-8. 2016

FORTUNE, M. A.; KOUSKY, V. E. Two Severe Freezes in Brazil: Precursors and Synoptic Evolution. **Monthly Weather Review**, v. 111, p. 181-196, 1983.

GALVANI, E.; AZEVEDO, T. R. A frente polar atlântica e as características de tempo associadas: estudo de caso. In: GALVANI, E.; LIMA, N. G. B. (Org.). **Climatologia Aplicada: Resgate aos estudos de caso**. 1 ed. Curitiba: Editora CRV, 2012, p. 7-18.

GARREAUD, R. D. Cold Air Incursions over Subtropical South America: Mean Structure and Dynamics. **Monthly Weather Review**, v. 128, p. 2544-2559, 2000.

GIRARDI, C. **O Poço dos Andes**. Relatório Técnico ECA 01/83, Centro Técnico Aeroespacial, 1983.

HANNA, S. R.; YANG, R. Evaluations of Mesoscale Models' Simulations of Near-Surface Winds, Temperature Gradients, and Mixing Depths. **Journal of Applied Meteorology**, v. 40, n.6, p. 1095-1104, 2001.

HONG, S.; DUDHIA, J.; CHEN, S. A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. **Monthly Weather Review**, v. 132, p. 103-120, 2004.

HONG, S; NOH, Y.; DUDHIA, J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. **Monthly Weather Review**, v. 134, p. 2318–2341, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Portal de Mapas**. Disponível em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa397>>. Acesso em: 18 out. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Mapa de Geadas**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/geada>>. Acesso em: 14 jun. 2018.

JIMÉNEZ, P. A.; DUDHIA, J. Improving the Representation of Resolved and Unresolved Topographic Effects on Surface Wind in the WRF Model. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 51, n. 2, p. 300-316, 2012.

KALNAY, E. **Atmospheric modeling, data assimilation and predictability**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

KLECZEK, M. A.; STEENEVELD, G. J.; HOLTSLAG, A. A. M. Evaluation of the Weather Research and Forecasting Mesoscale Model for GABLS3: Impact of Boundary-Layer Schemes, Boundary Conditions and Spin-Up. **Boundary-Layer Meteorology**, v.152. n. 2, p. 213-243, 2014.

LANFREDI, I. S.; CAMARGO, R. Classification of Extreme Cold Incursions over South America. **Weather and Forecasting**, v. 33, n. 5, p. 1183-1203, 2018.

LIU, Y.; WARNER, T. T.; ASTLING, E. G.; BOWERS, J. F.; DAVIS, C. A.; HALVORSON, S. F.; RIFE, D.L.; SHEU, R.; SWERDLIN, S. P.; XU, M. The Operational Mesogamma-Scale Analysis and Forecast System of the U.S. Army Test and Evaluation Command. Part II: Interrange Comparison of the Accuracy of Model Analyses and Forecasts. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 47, n. 4, p. 1093-1104, 2008.

LUPO, A. R.; NOCERA, J. J.; BOSART, L. F.; HOFFMAN, E. G.; KNIGHT, D. J. South American Cold Surges: Types, Composites, and Case Studies. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 5, p. 1021-1041, 2001.

MAZZOLI, C. R. R., CARVALHO, V. S. B., FREITAS, E. D., ANDRADE, M. F., MARTINS, L. D., MARTINS, J. A. Utilização de Métodos Estatísticos para Avaliação da Acurácia dos Resultados de Simulações Numéricas da Concentração de Ozônio

Gerados pelos Modelos CIT, SPM-BRAMS e WRF/CHEM. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 15., 2008, São Paulo. **Anais eletrônicos...** 2008.

MELO-ABREU, J. P. M. As Geadas. Conceitos, Génese, Danos e Métodos de Protecção. In: FIGUEIREDO, T.; RIBEIRO, L. F.; RIBEIRO, A. C.; FERNANDES, L. F (Ed.). **Clima e Recursos Naturais: Conferências de Homenagem ao Prof. Doutor Dionísio Gonçalves**. Bragança, Portugal: Instituto Politécnico de Bragança, 2010, cap. 5, 141-165.

MESINGER, F.; ARAKAWA, A. **Numerical Methods in Atmospheric Models**. Genebra: World Meteorological Organization, 1976.

MLAWER, E. J.; TAUBMAN, S. J.; BROWN, P. D.; IACONO, M. J.; CLOUGH, S. A. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D14, p. 16663–16682, 1997.

MÖLDERS, N. Suitability of the Weather Research and Forecasting (WRF) Model to Predict the June 2005 Fire Weather for Interior Alaska. **Weather and Forecasting**, v. 23, n. 5, p. 953-973, 2008.

MONICO, J. F. G.; PÓZ, A. P. D.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e Precisão: Revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 15, n. 3, p. 469-483, 2009.

MONTEIRO, J. E. B. A. (Org). **Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. 1ed. Brasília: INMET, 2009.

MORAIS, H.; CARAMORI, P. H.; LEAL, A. C.; MOREIRA, I. A.; RIBEIRO, A. M. A.; CARNEIRO FILHO, F. Avaliação de métodos de protecção contra geadas em cafezais recém implantados. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 2, p. 259-264, 2002.

MORICOCCHI, L.; ALFONSI, R. R.; OLIVEIRA, E. G.; MONTEIRO, J. L. M. Geadas e Seca de 1994: Perspectivas do Mercado Cafeeiro. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 25, n. 6, p. 49-57, 1995.

MOTA, F. S. **Meteorologia Agrícola**. 5. ed. São Paulo: Ed. Nobel, 1981.

NUNES, L. H.; VICENTE, A. K.; CANDIDO, D. H. Clima da Região Sudeste do. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Org). **Tempo e Clima no Brasil**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 16, p. 243-258.

POLITI, N.; NASTOS, P. T.; SFETSOS, A.; VLACHOGIANNIS, D.; DALEZIOS, N. R. Evaluation of the AWR-WRF model configuration at high resolution over the domain of Greece. **Atmospheric Research**, v. 208, p. 229-245, 2017.

PRABHA, T.; HOONGENBOOM, G. Evaluation of the Weather Research and Forecasting model for two frost events. **Computer and Electronics in Agriculture**, v. 64, n. 2, p. 234-247, 2008.

PEREIRA, R. A. A.; FREITAS, C. H.; CAMPOS, B.; CARVALHO, V. S. B.; MARTINS, F. B. UTILIZAÇÃO DO MODELO WRF PARA SIMULAÇÃO DE EPISÓDIOS DE GEADA REGISTRADOS NA REGIÃO DE MARIA DA FÉ, MINAS GERAIS. In: Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 9., 2015, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2015.

QUADRO, M. F. L.; PEZZI, L. P.; ROSA, E. B. O Climanálise e o monitoramento da ZCAS nos últimos 30 anos. **Climanálise – Edição Especial de 30 anos**, p. 19-25, 2016.

PIELKE, R. A. SR. **Mesoscale meteorological modeling**. 2. ed. California, USA: Academic Press, 2002.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G.; LOPES, V. CLIMATOLOGIA SINÓTICA DE EVENTOS DE ONDAS DE FRIO SOBRE A REGIÃO SUL DE MINAS GERAIS. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, p. 72-92, 2015.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. **TERRAE DIDÁTICA**, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.

REVISTA CAFEICULTURA. **ESPECIAL – 35 ANOS DA GEADA DE 1975 – Entenda o que foi a Geada Negra que dizimou todas as plantações de café do Paraná**. Disponível em: <<http://revistacafeicultura.com.br/index.php?mat=34022>>. Acesso em: 20 out. 2018.

ROUX, G.; LIU, Y.; MONACHE, L. D.; SHEU, R.; WARNER, T. VERIFICATION OF HIGH RESOLUTION WRFRTFDDA SURFACE FORECASTS OVER MOUNTAINS AND PLAINS. **In...** 10th WRF Users Workshop, Boulder, 2009.

SANTOS, A. P.; GOLÇALVES, J. P.; FERREIRA, J. A. S.; DOS SANTOS, S. R. Q. Previsão de Geadas para a Região Sul do Brasil: Uma Avaliação do Modelo ETA 15 km Durante o Outono de 2012. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.6, n.1, p. 100-109, 2013.

SATYAMURTY, P.; FONSECA, J. F. B.; BOTTINO, M. J.; SELUCHI, M. E.; LOURENÇO, M. C. M.; GONÇALVES, L. G. G. An early freeze in southern Brazil in April 1999 and its NWP guidance. **Meteorological Applications**, v. 9, n. 1, p.113-128, 2002.

SELUCHI, M. E. Geadas e Friagens. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Org). **Tempo e Clima no Brasil**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 10, p. 149-168.

SILVA, L. J.; REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P. Relação da passagem de frentes frias na Região Sul de Minas Gerais (RSMG) com a precipitação e eventos de geada. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, p. 234-238, 2014.

SKAMAROCK, W.; KLEMP, J.; DUDHIA, J.; GILL, D.; BARKER, D.; DUDA, M.; HUANG, X.; WANG, W.; POWERS, J. **A Description of the Advanced Research WRF Version 3**. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 2008.

SNYDER, R.L.; MELO-ABREU, J.P de. **Frost protection: fundamentals, practice and economics**. Roma: FAO – Environment and Natural Resources Series, 2005.

TEWARI, M.; CHEN, F.; WANG, W.; DUDHIA, J.; LEMONE, M. A.; MITCHELL, K.; EK, M.; GAYNO, G.; WEGIEL, J.; CUENCA, R. H. 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, 2004.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia Descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel, 1988.

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

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science: an introduction survey**. 2. ed. New York: Academic Press, 2006.

WALTHER, B. A.; MOORE, J. L. The concepts of bias, precision and accuracy, and their use in testing the performance of species richness estimators, with a literature review of estimator performance. **Ecography**, v. 28, n. 6, 2005.

WANG, Y.; LEUNG, L. R.; MCGREGOR, J. L.; LEE, D. K.; WANG, W. C.; DING, Y.; KIMURA, F. Regional Climate Modeling: Progress, Challenges, and Prospects. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 82, n. 6, p. 1599-1628, 2004.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2 ed. New York: Academic Press, 2006.

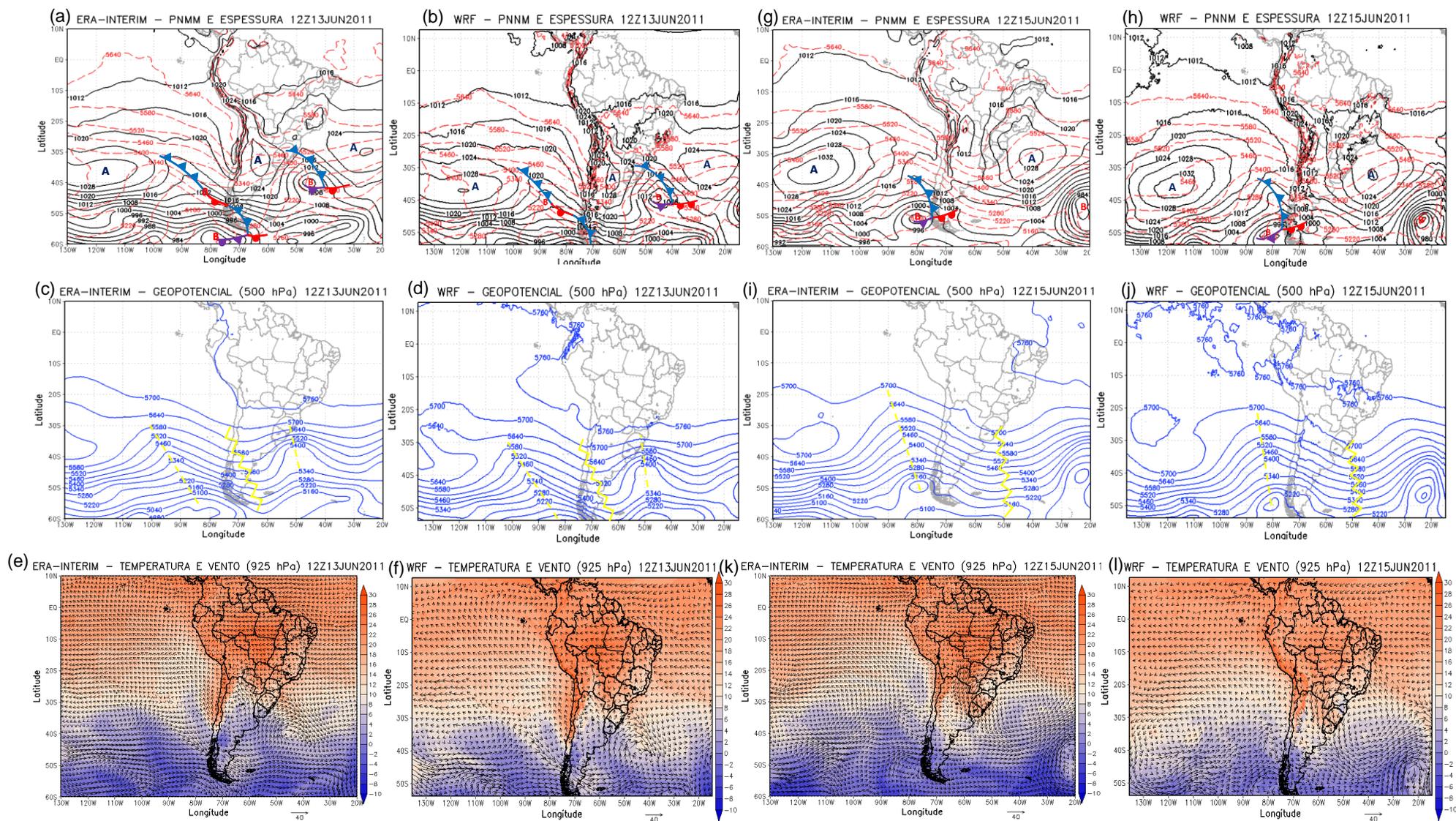
WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

XIMENES, A. C. A.; SOUZA, L. C. F.; ROBAINA, A. D.; GONÇALVES, M. C. Avaliação da Incidência de Geadas em Componentes de Produtividade do Milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 3, n.2, p. 214-227, 2004.

ZHANG, H.; PU, Z.; ZHANG, X. Examination of Errors in Near-Surface Temperature and Wind from WRF Numerical Simulations in Regions of Complex Terrain. **Weather and Forecasting**, v. 28, n. 3, p. 893-914, 2013.

## APÊNDICE



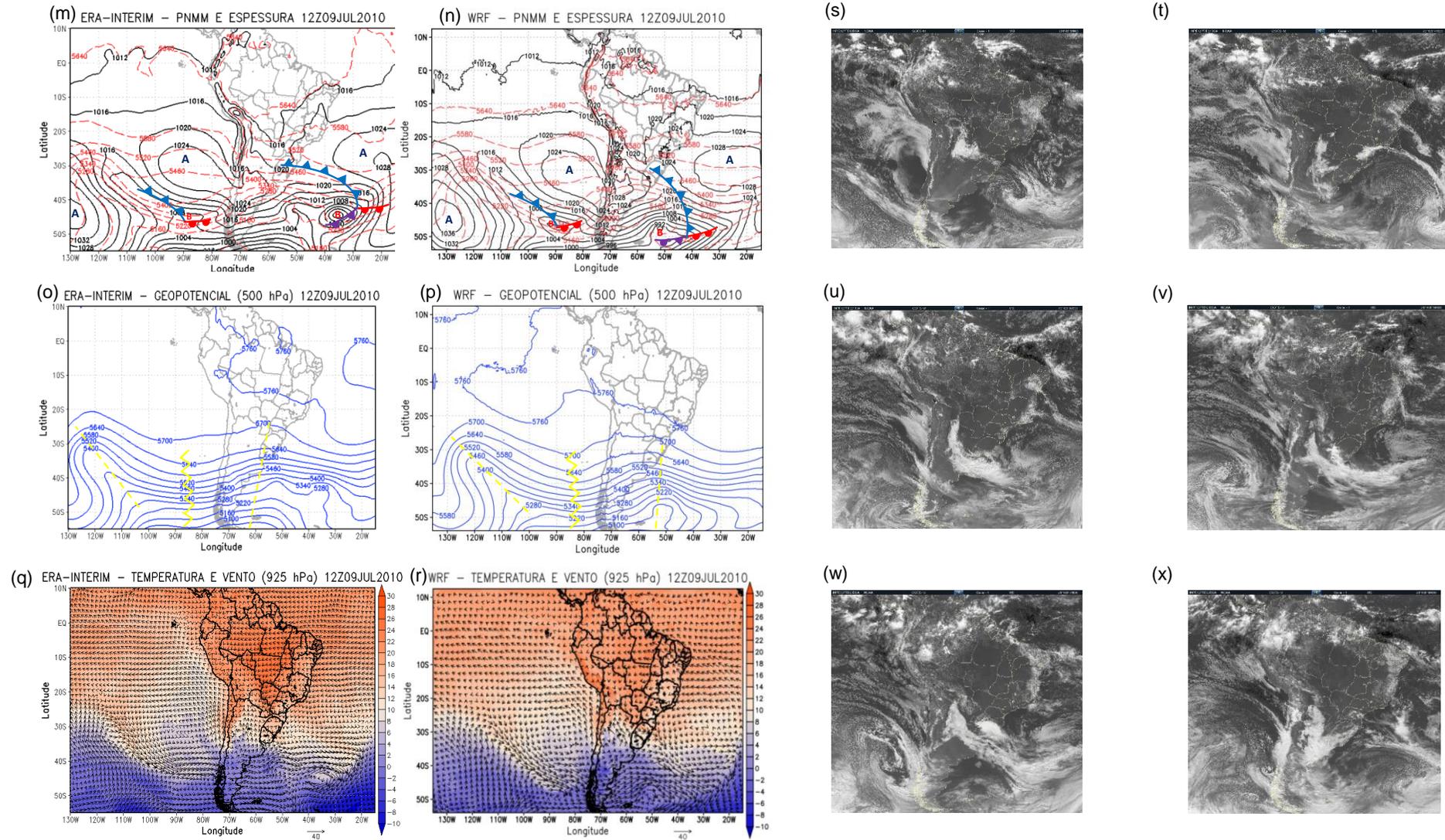


Figura – Campos sinóticos do evento 3 do horário das 12:00 Z para os dados da ERA-Interim e dados do WRF de PNMM (em hPa, representada por linhas contínuas na cor preta) e espessura da camada de 1000-500 hPa (em m, representada por linhas tracejadas em vermelho), altura geopotencial (em m, representada por linhas contínuas na cor azul) em 500 hPa e temperatura (em °C, representada pelas cores) e vento em 925 hPa (em m/s, representado por vetores), respectivamente, para os dias: (a), (b), (c), (d), (e) e (f) 13/jun; (g), (h), (i), (j), (k) e (l) 15/jun; (m), (n), (o), (p), (q) e (r) 18/jun. As figuras (s), (t), (u), (v), (w) e (x) são imagens do satélite GOES-12 no canal do visível para os dias 13/jun, 14/jun, 15/jun, 16/jun, 17/jun e 18/jun, respectivamente, para o horário das 16:00 Z. Fonte: DSA-CPTEC.