



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Validação das previsões de três ondas de frio pelo modelo GFS no Centro-Norte do Estado de São Paulo e Triângulo Mineiro

Vinícius Lucyrio¹, Mateus Dias Nunes², Michelle Simões Reboita³, Murilo da Costa Ruv Lemes⁴

¹Graduando do Instituto de Recursos Naturais - Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), e-mail: vinicius.lucyrio@gmail.com; (autor correspondente); ²Professor do Instituto de Recursos Naturais - Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) - Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e-mail: nunes.mateusdias@gmail.com; ³ Professor do Instituto de Recursos Naturais - Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), e-mail: reboita@unifei.edu.br; ⁴Doutorando no Centro de Ciências do Sistema Terrestre / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e-mail: murilo.ruv@gmail.com.

Artigo submetido em 01/05/2020 e aceite em 09/07/2020

RESUMO

As ondas de frio são períodos de declínio acentuado da temperatura do ar que podem causar prejuízos econômicos e problemas de saúde pública. Por isso, a previsão desses sistemas atmosféricos se faz importante. Nesse sentido, o objetivo do presente estudo é validar a previsão do modelo *Global Forecast System* (GFS) em três casos de ondas de frio (OF) sobre Estado de São Paulo e Triângulo Mineiro. Para isso, foi feita a análise sinótica de três OF a partir das condições iniciais do GFS, e de parâmetros observados em 22 estações meteorológicas automáticas (EMA) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que foram agrupadas em três categorias dependendo do tipo de relevo (topo, encosta e baixada). Foram validadas as previsões de 72, 48 e 24 horas dos campos sinóticos em relação às análises do modelo e aos dados medidos em EMA. As análises estatísticas indicaram que nos três casos houve um viés predominantemente negativo na previsão de temperatura a 2 metros (T2M), sendo mais acentuado no horário das 0900 UTC, próximo do horário da temperatura mínima; as EMA de baixada apresentaram um erro médio maior. Nos campos sinóticos, foi constatado nos três casos que o viés das variáveis atmosféricas tende a diminuir com a aproximação do dia pico da OF, com maiores erros na previsão de 72 horas.

Palavras-chave: ondas de frio, sudeste do Brasil, previsão de tempo, modelo GFS

Validation of the forecasting of three cold waves by GFS model over Center-North of São Paulo State and Triângulo Mineiro

ABSTRACT

Cold waves are periods of sharp decline in air temperature that can cause economic damage and public health problems. Therefore, the forecast of these atmospheric systems is important. Then, the objective of the present study is to validate the prediction of the *Global Forecast System* (GFS) model in three cases of cold waves (OF) over São Paulo State and Triângulo Mineiro. For this purpose, synoptic analysis of the three OF was made through the initial conditions of the GFS and parameters observed in 22 automatic meteorological stations (EMA) from INMET, which were grouped into three categories depending on the type of topography (top, slope and valley). The 72, 48 and 24-hour predictions of the synoptic fields were validated in relation to the analysis of the model and the data measured at EMA. Statistical analysis showed a negative bias in the T2M forecast in the three cases of OF bias, being more pronounced at 0900 UTC, close to the minimum temperature time; EMA located in valley had a higher average error. In the synoptic fields, the bias of atmospheric variables tends to decrease with the approach of the peak day of OF, with greater errors in the 72-hour forecast.

Keywords: cold waves, southeastern Brazil, weather forecast, GFS model

Introdução

Ondas de frio são fenômenos atmosféricos extremos caracterizados por forte queda na temperatura do ar próxima à superfície numa

extensa área e que persiste por vários dias, podendo trazer implicações sociais e econômicas (Glickman, 2000; IPCC, 2013; WMO, 2016; Ding *et al.*, 2020). As ondas de frio (OF) podem

provocar geadas, que são altamente prejudiciais às produções agrícolas principalmente em regiões tropicais, e sob essa motivação diversos autores estudaram OF que provocaram geadas com consequentes perdas econômicas.

Desde 1961, destacam-se os eventos ocorridos em julho de 1975 (Parmenter, 1976; Girardi, 1983; Marengo *et al.*, 1997; Pezza, 2003), julho de 1981 (Fortune e Kousky, 1983; Camargo, 1997; Pezza, 2003) e junho de 1994 (Marengo *et al.*, 1997; Krishnamurti *et al.*, 1999; Pezza, 2003). Lucyrio *et al.* (2019) fizeram uma análise estatística de 12 casos de OF intensas ocorridas no nordeste do Estado de São Paulo e verificaram que todos os casos propiciaram geadas. Os autores também mostraram que o padrão sinótico das OF se caracteriza pela atividade intensa do Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) que em sua migração para leste encontra a Cordilheira dos Andes; assim, parte do anticiclone a transpõe adquirindo trajetória para norte-nordeste. A associação dessa alta transiente com um cavado em médios e altos níveis associado ao ramo norte do jato polar provoca a invasão de ar muito frio em latitudes mais baixas, chegando ao Estado de São Paulo, ao Centro-Oeste do Brasil e, muitas vezes, sul da Amazônia, e, por fim, a estabilidade atmosférica propiciada pela alta transiente, após o ingresso de ar frio, torna o ambiente propício à formação de geadas (Sapucci *et al.*, 2018).

Em raros casos, o ar frio avança com tanta intensidade sobre a região Sudeste que pode causar geada negra, que ocorre quando a temperatura do ponto de orvalho é mais baixa do que a temperatura negativa atingida pelos óleos vegetais, e baixa umidade relativa do ar, além de intenso vento frio, o que causa o colapso de plantações (Pereira *et al.*, 2015) sem mesmo ocorrer a formação de cristais de gelo sobre as superfícies. Esse tipo de geada foi registrado, por exemplo, nos Estados do Paraná e São Paulo em julho de 1975 (Parmenter, 1976; Girardi, 1983; Marengo *et al.*, 1997; e Pezza, 2003), com grandes prejuízos na cafeicultura. Em julho de 1981 também foi registrada ocorrência de geada negra na região de Campinas e a mesma onda de frio danificou muitas plantações no Paraná, Mato Grosso do Sul, São Paulo, sul e Triângulo Mineiro (Fortune e Kousky, 1983; Pezza, 2003). Em julho de 2013, uma forte onda de frio causou geada negra em pontos das regiões de Londrina e Maringá, no norte do Paraná (Costa *et al.*, 2015).

O tipo mais comum de geada é a branca, ou de radiação, que é um fenômeno caracterizado pela deposição de vapor d'água na forma de cristais de gelo sobre superfícies expostas. Sua formação depende da presença de céu claro, sem nuvens e com calma, isto é, ausência de ventos para que

ocorra acentuada perda de calor pela superfície (Caramori e Manetti, 1993). Embora ocorra na atuação de ondas de frio, esse fenômeno também pode ocorrer quando da atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), o que mantém o céu claro, facilitando o resfriamento noturno (Sapucci *et al.*, 2018) em regiões do Sul e Sudeste do Brasil. Wrege *et al.* (2018) calcularam o risco de ocorrência de geada nos Estados da região Sul e no Estado de São Paulo e mostraram que o risco na porção norte paulista é majoritariamente menor que 10% nos meses de junho e julho, mas com algumas regiões de maior altitude nas cidades de São Carlos, Ribeirão Preto e Franca com risco entre 20 e 30%; os autores concluíram uma forte relação entre o alto risco de geada (valores acima de 60%) e altitude no Estado de São Paulo.

As camadas de ar à noite se resfriam a partir da superfície e inicialmente por processo de condução. Assim, em noites típicas de geada é comum a observação de diferenças em torno de 5°C entre a temperatura observada em abrigo meteorológico (cerca de 1,5 m acima do solo) e a temperatura da relva (próxima à superfície) (Bootsma, 1976, 1980). Sentelhas *et al.* (1995) fizeram uma estimativa da temperatura da relva a partir da temperatura observada no abrigo meteorológico e concluíram que em noites de geada a diferença média é de 4,1°C, sendo possível a ocorrência de geadas mesmo com temperaturas superiores a 0°C no abrigo meteorológico.

A quantidade de vapor d'água numa coluna atmosférica pode ser determinante para se estimar a queda na temperatura provocada pela perda radiativa do solo, uma vez que o vapor tem alta capacidade de reter radiação na faixa do infravermelho (Cabral, 2018). O vapor d'água absorve e emite radiação em maior parte da banda do espectro eletromagnético correspondente à radiação terrestre (de ondas longas), o que gera um grande feedback positivo no aquecimento atmosférico e o torna o mais poderoso gás do efeito estufa (Manabe, 2019; Du *et al.*, 2015). Em noites sem nuvens (com pouca presença de H₂O na atmosfera), a radiação escapa para o espaço de forma que há um resfriamento intenso da superfície.

A previsão de geadas é feita a partir da análise de diversas variáveis atmosféricas de forma simultânea, por exemplo, temperatura do ar e do solo, umidade relativa em baixos e médios níveis, intensidade do vento e nebulosidade. O Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) desenvolveu o Índice de Ocorrência de Geadas (IOG), que combina estas

variáveis previstas pelo modelo regional ETA com resolução espacial de 15 km (Santos *et al.*, 2013). De acordo com esse índice, geadas ocorrem quando há presença de alta pós-frontal, que propicia queda na temperatura e diminuição na nebulosidade. Santos *et al.* (2013) avaliaram o modelo ETA durante o outono de 2012 utilizando o IOG e verificaram que ele apresentou bom desempenho nas previsões de 24 e 48 horas. Silva e Minuzzi (2016) aplicaram métodos estatísticos para a previsão de geadas no Estado de Santa Catarina utilizando dados de temperatura do ar nos horários das 1800 e 0000 UTC anteriores à ocorrência do fenômeno. De acordo com os autores, o método apresentou um bom desempenho, uma vez que teve acertos em até 88,9% das ocorrências. Rozante *et al.* (2019) também desenvolveram um índice de geada através de técnica de estatística multivariada aplicada a dados de temperatura, umidade relativa do ar, pressão ao nível médio do mar, ventos em baixos níveis e nebulosidade fornecidos por um modelo numérico regional, com um bom desempenho especialmente na região Sul do Brasil, onde o viés observado foi menor do que 1.

Os padrões sinóticos e modelos conceituais são importantes ferramentas na previsão de eventos meteorológicos de maior escala. Uma vez conhecidas as características sinóticas médias de determinado tipo de sistema, a previsão se torna mais precisa. No caso das OF, vários autores descreveram a evolução sinótica dos sistemas que as causam. Lucyrio *et al.* (2019) descreveram as características sinóticas de OF que causam geadas no nordeste do Estado de São Paulo, identificando 12 eventos mais fortes entre 1961 e 2017. Escobar *et al.* (2019) descreveram a circulação característica nos casos de friagens no Centro-Oeste brasileiro, enquanto Ricarte *et al.* (2015) descreveram a circulação atmosférica característica em friagens no sul da Amazônia. Lanfredi e Camargo (2018) classificaram regionalmente ondas de frio intensas sobre a América do Sul. Reboita *et al.* (2015) estudou as OF no sul do Estado de Minas Gerais e sua climatologia sinótica.

Para a previsão de OF e geadas é necessária a previsão das variáveis atmosféricas por modelos numéricos de previsão de tempo. O *Global Forecast System* (GFS; NCEP, 2015) é um dos modelos atmosféricos mais utilizados para essa finalidade. Esse modelo é operado e pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e usado em diferentes centros operacionais no globo como no CPTEC no Brasil. Charles e Colle (2009) verificaram os erros a curto prazo dos modelos GFS e o regional *North American Mesoscale* (NAM) na previsão de ciclones extratropicais, concluindo que o GFS obteve maior habilidade em

prever a intensidade e a posição desses sistemas sobre a porção continental dos Estados Unidos e oceanos adjacentes. Bender (2012) avaliou a previsão do tempo para a cidade de São Paulo utilizando o modelo regional *Weather Research and Forecasting* (WRF), onde fez comparações com o GFS, e concluiu que na previsão de precipitação houve uma tendência a superestimativa nos dois modelos, e na previsão de temperaturas verificou-se subestimativa nas temperaturas máximas e superestimativa nas temperaturas mínimas; nos dois casos, o melhor desempenho ocorreu durante os meses de verão. Rasera (2017), em seu estudo sobre o potencial de ocorrência de sistemas convectivos de mesoescala (SCM) na América do Sul, utilizou o modelo GFS para verificar a viabilidade do uso de índices para a previsão de ocorrência desses sistemas de 3 a 24 horas, observando boa acurácia do modelo. Kendzierski *et al.* (2018) verificaram a acurácia de modelos de curto e longo prazo na previsão da temperatura do ar sobre a Polônia, observando que o GFS apresenta um progressivo aumento no erro na previsão, com maiores erros constatados após o 4º dia da previsão. Sridevi *et al.* (2018) estudaram a habilidade do GFS durante as monções de verão na Índia em 2015, demonstrando um desempenho do modelo em prever as fortes chuvas, mas sua acurácia varia consideravelmente de acordo com a região e a intensidade das chuvas. Borges (2019) estudou sistemas de previsão de ondas oceânicas no litoral sul do Brasil e verificou o erro do modelo GFS na previsão de ventos em comparação com dados de duas boias oceânicas, mostrando que os dados simulados ficaram muito próximos das intensidades observadas.

Conhecendo os efeitos diversos que as OF e geadas podem causar, o presente estudo tem como objetivo validar três casos de OF previstos pelo modelo GFS que atingiram os Estados de São Paulo e Triângulo Mineiro concomitantemente. Além disso, é objetivo descrever o ambiente sinótico dessas OF quanto de seus efeitos através de dados observados.

Material e Métodos

Dados meteorológicos

Foram utilizados dados de 22 estações meteorológicas automáticas (EMA) mantidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) nas regiões centro-norte do Estado de São Paulo, Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, em Minas Gerais. Foram selecionadas as variáveis atmosféricas temperatura instantânea (T2M), vento médio e umidade relativa do ar (UR) nos períodos de ocorrência das três OF: 15 a 20 de julho de

2016, 18 a 23 de maio de 2018, e 4 a 9 de julho de 2019, nos horários das 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 e 21 UTC. A relação das estações meteorológicas utilizadas está na Tabela 1.

A região de estudo (Figura 1) localiza-se na unidade morfoestrutural dominada pelos planaltos e chapadas da Bacia do Paraná (Ross, 2016). Na área predomina relevo pouco acidentado, predominando vales e topos pouco pronunciados; há maiores elevações nas regiões de São Carlos, Franca-SP e Araxá-MG, onde a altitude passa de 850 metros acima do nível do mar. Mesmo sendo uma região com pouca variação espacial da altitude, áreas de várzea e baixadas têm maior capacidade em reter o ar frio durante o início das manhãs que provém ao longo da noite das

regiões adjacentes mais elevadas (Camargo, 1972; Yoshino, 1975). Neste contexto, as EMA foram categorizadas de acordo com perfil topográfico (topo, encosta ou baixada) onde estão localizadas. Utilizou-se o modelo de vertente proposto por Dylík (1968), definido como uma ligação dinâmica entre áreas de topo e fundo de vale. A parte intermediária entre topo e fundo de vale, ou baixada, é a encosta, que pode ser dividida em terço superior (ou ombro, próximo ao topo), terço médio e terço inferior (próximo à baixada). Para facilitar as análises, as EMA situadas no terço inferior de encostas foram categorizadas como de baixada. A Figura 2 mostra exemplos de cortes do terreno de localidades de topo, encosta e baixada feitos no *software* Google Earth.

Tabela 1. Estações meteorológicas automáticas do INMET utilizadas no estudo.

Estação	Alt. (m)	Lat.	Lon.	Estação	Alt. (m)	Lat.	Lon.
Araxá (MG)	1.018	-19,61	-46,94	Ituverava (SP)	611	-20,36	-47,78
Ariranha (SP)	525	-21,13	-48,84	Jales (SP)	460	-20,17	-50,60
Barra Bonita (SP)	534	-22,47	-48,56	José Bonifácio (SP)	408	-21,09	-49,92
Barretos (SP)	534	-20,56	-48,54	Lins (SP)	461	-21,67	-49,73
Bauru (SP)	636	-22,36	-49,03	Passos (MG)	782	-20,75	-46,63
Campina Verde (MG)	559	-19,54	-49,52	Patrocínio (MG)	978	-19,00	-46,99
Casa Branca (SP)	734	-21,78	-47,08	Pradópolis (SP)	540	-21,34	-48,11
Conc. das Alagoas (MG)	573	-19,99	-48,15	Sacramento (MG)	913	-19,88	-47,43
Franca (SP)	1.003	-20,58	-47,38	São Carlos (SP)	859	-21,98	-47,88
Ibitinga (SP)	497	-21,86	-48,80	Uberlândia (MG)	875	-18,92	-48,26
Ituiutaba (MG)	540	-18,95	-49,53	Votuporanga (SP)	460	-20,40	-49,97

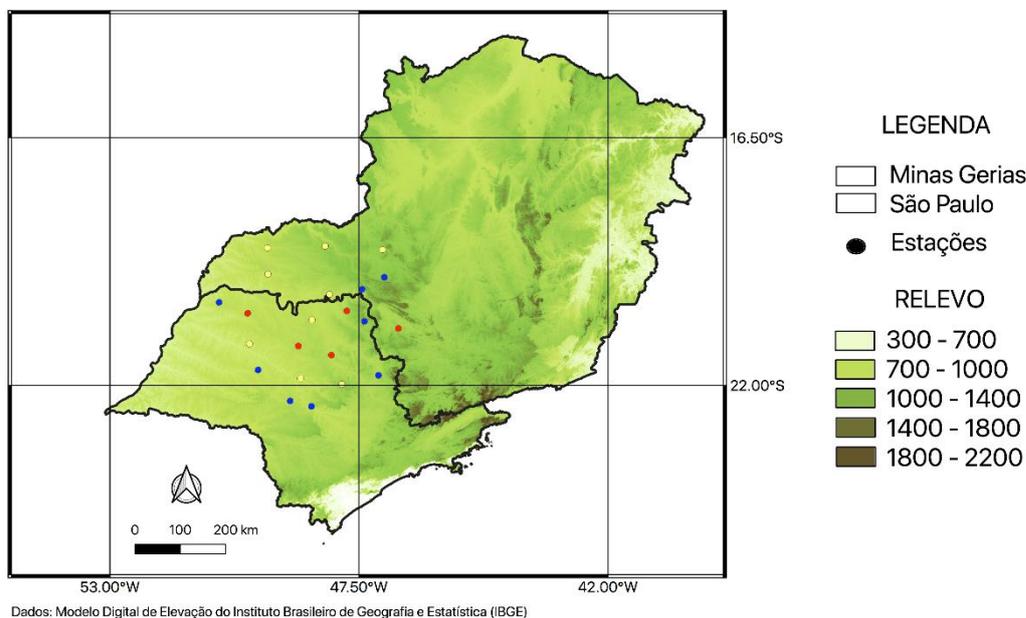


Figura 1. Mapa topográfico de São Paulo e Minas Gerais. Os pontos indicam a localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo, conforme descrição na Tabela 1. Os pontos azuis indicam as EMA situadas em topo, pontos amarelos são as EMA em encosta e pontos vermelhos são as EMA em baixada.

Análise Sinótica das OF

Antes de avaliar a previsão do GFS, é

apresentada a análise sinótica dos 3 casos de ondas de frio (OF), que ocorreram entre 15 e 20 de julho de 2016, 18 e 23 de maio de 2018 e 4 a 9 de julho

de 2019, com picos (d0) ocorrendo em 18 de julho de 2016, 21 de maio de 2018 e 7 de julho de 2019, utilizando-se dados observados. Aqui, as observações correspondem aos dados que são fornecidos ao modelo GFS (NCEP, 2015) para suas previsões. Assim, é importante destacar que modelos de previsão do tempo possuem as análises, que correspondem aos dados observados no globo e que são assimilados e ajustados nos modelos

sendo, portanto, considerados o estado real da atmosfera e utilizados como condições iniciais para previsões. Dessa forma, as previsões são o resultado da evolução temporal das condições iniciais através de integração numérica de equações.

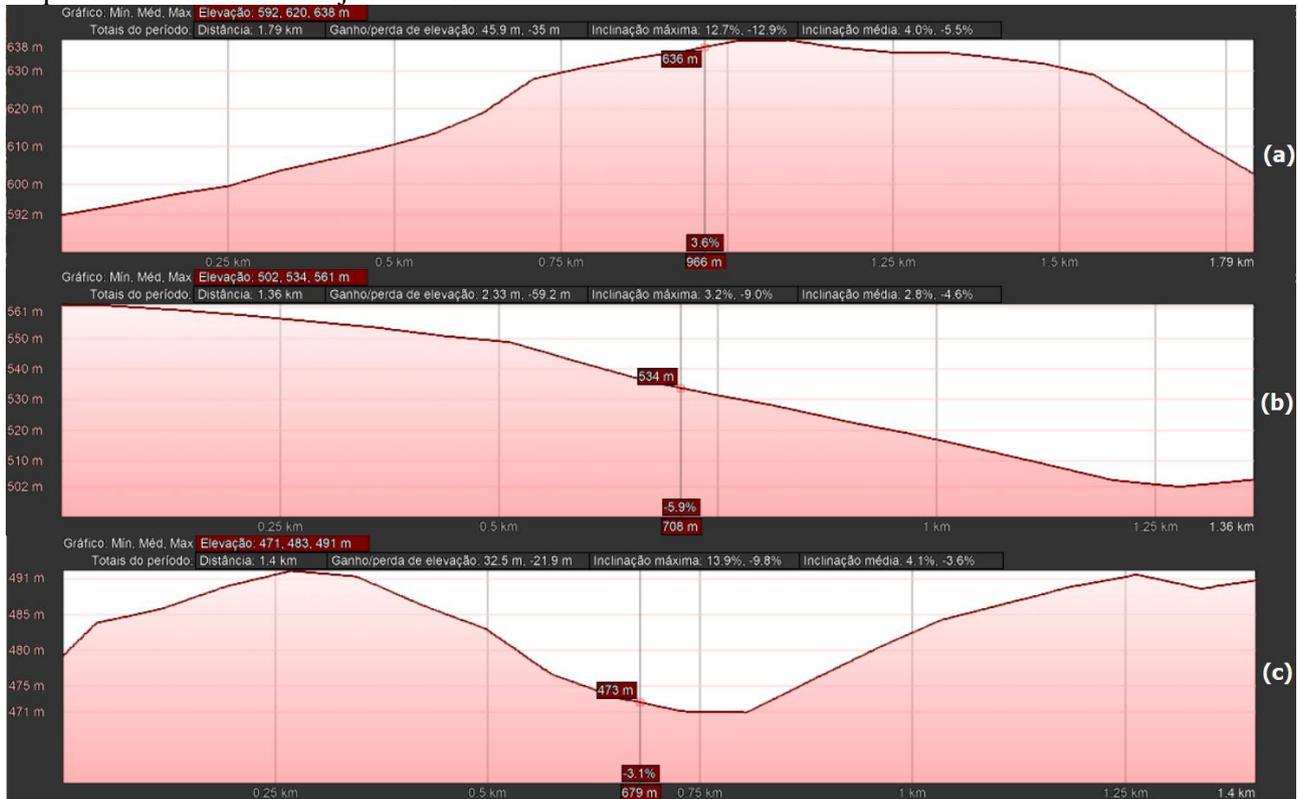


Figura 2. Perfis topográficos exemplificando região de (a) topo, (b) encosta e (c) baixada.

O modelo GFS possui resolução horizontal de 27 km para 384 horas de previsão, 64 níveis verticais e é inicializado 4 vezes ao dia, nos horários sinóticos das 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC. As variáveis utilizadas na análise sinótica são pressão ao nível médio do mar (PNMM), espessura da camada 500-1000 hPa (EC) e intensidade do vento em 250 hPa (V250) no horário das 1200 UTC. Também são empregadas no estudo, no horário das 0900 UTC, a temperatura em 850 hPa (T850), a temperatura em 2 m (T2M) e o total de vapor d'água integrado em toda a camada atmosférica, que corresponde à variável água precipitável (PWAT). Essa variável foi obtida através da Equação 1:

$$PWAT = \frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_f} q(p) dp$$

(1)

em que g é a aceleração da gravidade, p_0 a pressão na superfície, p_f o nível de pressão mais alto e q a umidade específica. Portanto, essa última variável

também foi obtida do GFS.

O horário das 0900 UTC foi escolhido para a análise das temperaturas por ser o mais próximo do horário em que habitualmente ocorre a temperatura mínima, que é entre 5 e 7 horas da manhã no horário local (Ynoue *et al.*, 2017). Como o modelo não é inicializado às 0900 UTC, não há análise para ser considerada como estado real da atmosfera, então para o estudo das temperaturas utilizaram-se a análise dos 4 horários sinóticos e a previsão para 3 horas após cada inicialização do modelo. Com isso, se obtém oito informações diárias da temperatura, consideradas como observações, para os horários das 0000, 0300, 0600, 0900, 1200, 1500, 1800 e 2100 UTC. A intensidade e a direção do vento em 10 metros também são correspondentes ao horário das 0900 UTC dos dias $d-1$, $d0$ e $d+1$ dos três casos, bem como o o gradiente vertical da temperatura entre a superfície (T2M) e 850 hPa, onde valores negativos indicam que a temperatura em 850 hPa é maior do que a temperatura próxima da superfície, o que

caracteriza um fenômeno de inversão térmica nesta camada.

A análise sinótica consiste em descrever detalhadamente os sistemas em escala continental atuantes sobre uma determinada região, desde a superfície até os altos níveis (Reboita e Escobar, 2015).

Validação do modelo GFS

Após a contextualização das três ondas de frio, é analisada a performance do modelo GFS em prever esses casos com antecedência de até 72 horas. Para isso, são elaborados mapas das previsões inicializadas com antecedência de 24, 48 e 72 horas das variáveis PNMM, EC, T850 e V250 e comparados com as análises do horário das 1200 UTC de d0 dos casos de OF.

Também é feita a validação da previsão de 24 horas da T2M de acordo com o perfil de terreno em que se encontram as EMA. Para isso, é o calculado o *BIAS* (Eq. 2):

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_p - T_o$$

(2)

entre as T2M prevista (T_p) nos pontos de grade mais próximo das EMA e os valores observados (T_o) nessas estações. O passo seguinte é obter a média do *BIAS* entre as EMA de topo, encosta e baixada. (Figura 1).

Resultados e Discussão

Análise Sinótica: Dados Observados

Caso: 15 a 20 de julho de 2016

Entre os dias 16 e 20 de julho de 2016 (Figura 3) uma incursão de ar frio atingiu o centro-sul do Brasil causando geadas em grande parte da região Sul, além dos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás. No dia 15, foram observados dois centros de alta pressão no sul da América do Sul, sendo um no oceano Pacífico e litoral do Chile e outro no sul da Argentina com pressão central de 1029 hPa. Em médios níveis sobre a mesma região observava-se a amplificação de um cavado chegando ao centro-norte argentino. Esta amplificação também era observada em altos níveis, com forte atuação dos jatos subtropical e polar norte entre o norte da Argentina e extremo sul do Brasil (Figura 3a). Sistemas de baixa pressão em superfície atuavam entre a região do Chaco, no Paraguai, e litoral sul do Rio Grande do Sul.

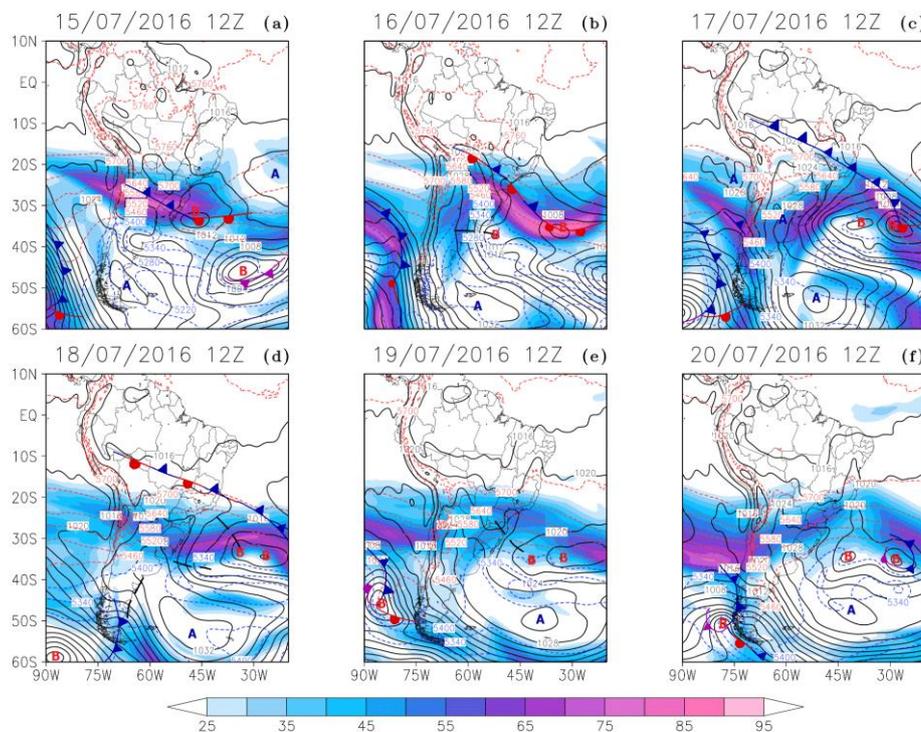


Figura 3. Análise sinótica da OF entre 15 a 20 de julho de 2016 às 1200 UTC. As isóbaras (hPa) são representadas por linhas sólidas pretas, a espessura da camada 500-1000hPa (mgp) são apresentadas em linhas tracejadas azuis para os valores menores do que 5460 mgp e vermelhas para os valores acima de 5460 mgp. A intensidade do vento em 250 hPa superior a 25 m/s é indicada em cores.

No dia 16, o centro de alta pressão que anteriormente estava sobre o sul da Argentina, se deslocou para leste, localizando-se entre 60-65°O e 55-60°S com um núcleo de 1034 hPa, ao mesmo tempo em que uma crista em superfície se estendia do sul da Argentina até o sul da Bolívia, evidenciando avanço do ar frio para o norte (Figura 3b). Um sistema de baixa pressão com núcleo de 1008 hPa era observado em 55°O e 37°S, próximo ao Rio da Prata. Em médios e altos níveis, um cavado se amplificava até o oeste do Paraná, com forte atuação dos jatos subtropical e polar norte acoplados entre o sul do Mato Grosso do Sul e nordeste do Rio Grande do Sul devido ao intenso gradiente térmico horizontal.

No dia 17 era bem evidente o avanço do ar frio sobre boa parte do Centro-Oeste e Sudeste, embora houvesse suporte de sistemas em médios e

altos níveis apenas na região Sul. Eram observados dois centros de alta pressão, um semi-estacionário centrado em 60-65°O e 55-60°S com pressão de 1037 hPa e outro com centro no extremo oeste do Rio Grande do Sul, mas com atuação ampla, chegando ao sudoeste do Mato Grosso, com 1029 hPa (Figura 3c). O centro de baixa pressão, que no dia 16 estava próximo do Rio da Prata, deslocou-se para leste e se aprofundou até 1002 hPa. Os cavados em médios e altos níveis atuavam principalmente no leste de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Apesar da advecção de ar frio ter sido mais intensa na região Sul, o avanço da alta transiente propiciou a advecção de ar muito seco para a região Sudeste do Brasil, principalmente no Triângulo Mineiro, norte de São Paulo, além do sul de Goiás e leste do Mato Grosso do Sul (Figura 4a).

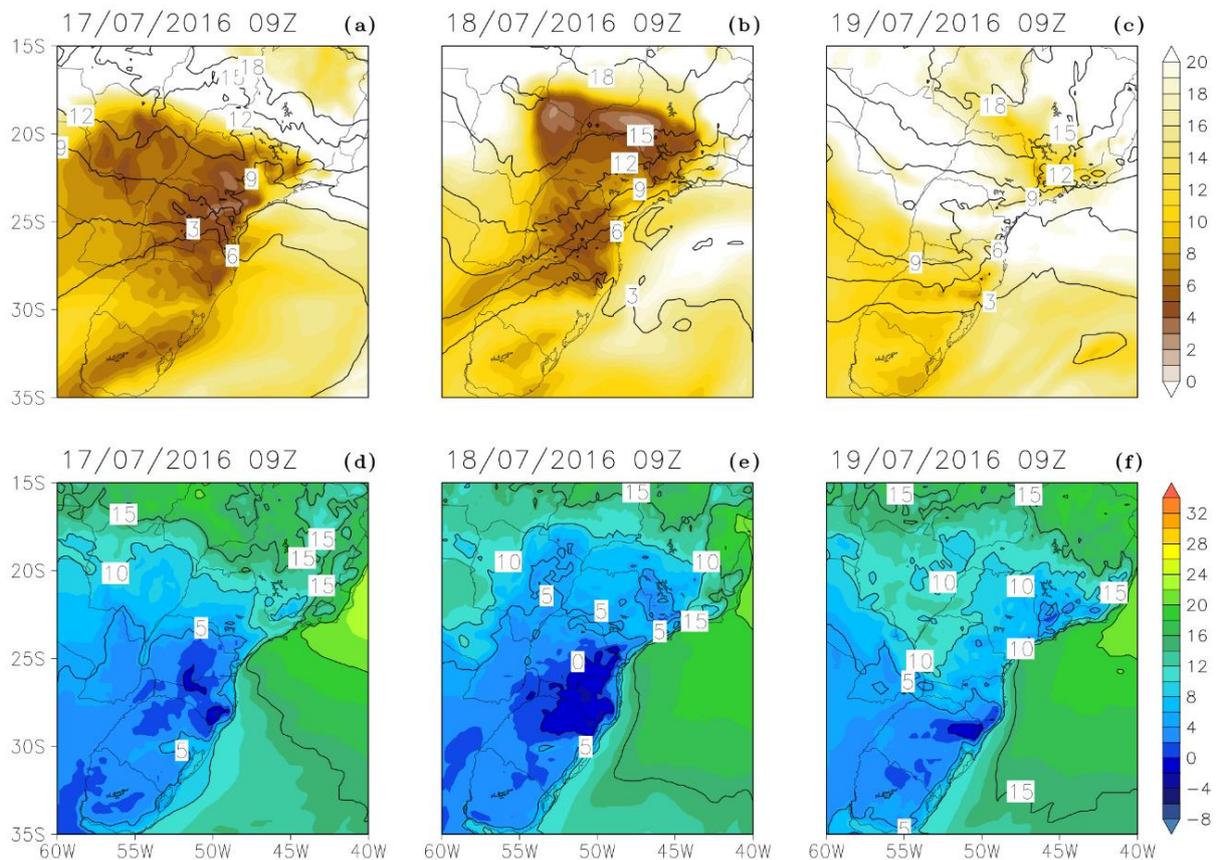


Figura 4. (a-c) PWAT (cores em kg m^{-2}) e T850 (linhas pretas sólidas $^{\circ}\text{C}$); (d-f) T2M ($^{\circ}\text{C}$) da análise do modelo para os dias 17, 18 e 19 de julho de 2016 às 0900 UTC (próximo ao horário local da temperatura mínima).

A presença de ar frio apenas nos baixos níveis da atmosfera, a baixa quantidade de vapor d'água em toda a coluna atmosférica (Figura 4b) e a estabilidade trazida pela alta transiente propiciaram forte queda nas temperaturas e um ambiente típico para a ocorrência de geadas, que foram bastante intensas na manhã do dia 18, o dia pico da OF na região Sudeste, no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, norte de São Paulo e sul

de Goiás. Havia ainda a presença de dois centros de alta pressão; o núcleo localizado no sul do oceano Atlântico se deslocou para leste, centrado em 45°W e 50-55°S, com 1035 hPa (Figura 3d). O segundo núcleo estava sobre a província de Buenos Aires, na Argentina. Notava-se a presença de um cavado em médios e altos níveis com orientação zonal atuando sobre o oceano ao longo da latitude 40°S; em superfície, também era observado um cavado

pouco ao norte, entre 30 e 35°S.

No dia 19, observou-se a propagação dos cavados para nordeste, com nova amplificação que atingiu o sul do Rio Grande do Sul, com um pequeno avanço da alta pressão que no dia 18 estava sobre o nordeste da Argentina (Figura 3e). Em altos níveis, o jato subtropical suavemente ondulado passava sobre o centro-sul de São Paulo. No dia 20 houve a propagação do cavado em médios e altos níveis pelo litoral da região Sudeste (Figura 3f). Esta nova configuração não afetou a região estudada.

Caso: 18 a 23 de maio de 2018

A OF ocorrida entre os dias 19 e 23 de maio de 2018 (Figura 5) apresentou características parecidas com as da incursão que aconteceu em julho de 2016, com algumas diferenças na

propagação de sistemas em níveis superiores. No dia 18 de maio, assim como no dia 15 de julho de 2016, atuavam dois núcleos de alta pressão no sul da América do Sul (Figura 5a), sendo um no oceano Pacífico associado ao Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) e outro próximo das Ilhas Malvinas, em 60°O e 55°S com 1024 hPa de pressão central. A norte deste sistema notava-se um cavado em superfície. Outro cavado era observado entre o Chaco paraguaio e o litoral norte do Rio Grande do Sul. Em médios níveis havia um cavado entre a região central da Argentina e as Ilhas Malvinas, orientado transversalmente, ao passo que nos altos níveis observava-se uma notável ondulação do jato polar norte quase em acoplamento com o jato subtropical, com cavado amplificando-se sobre a Argentina.

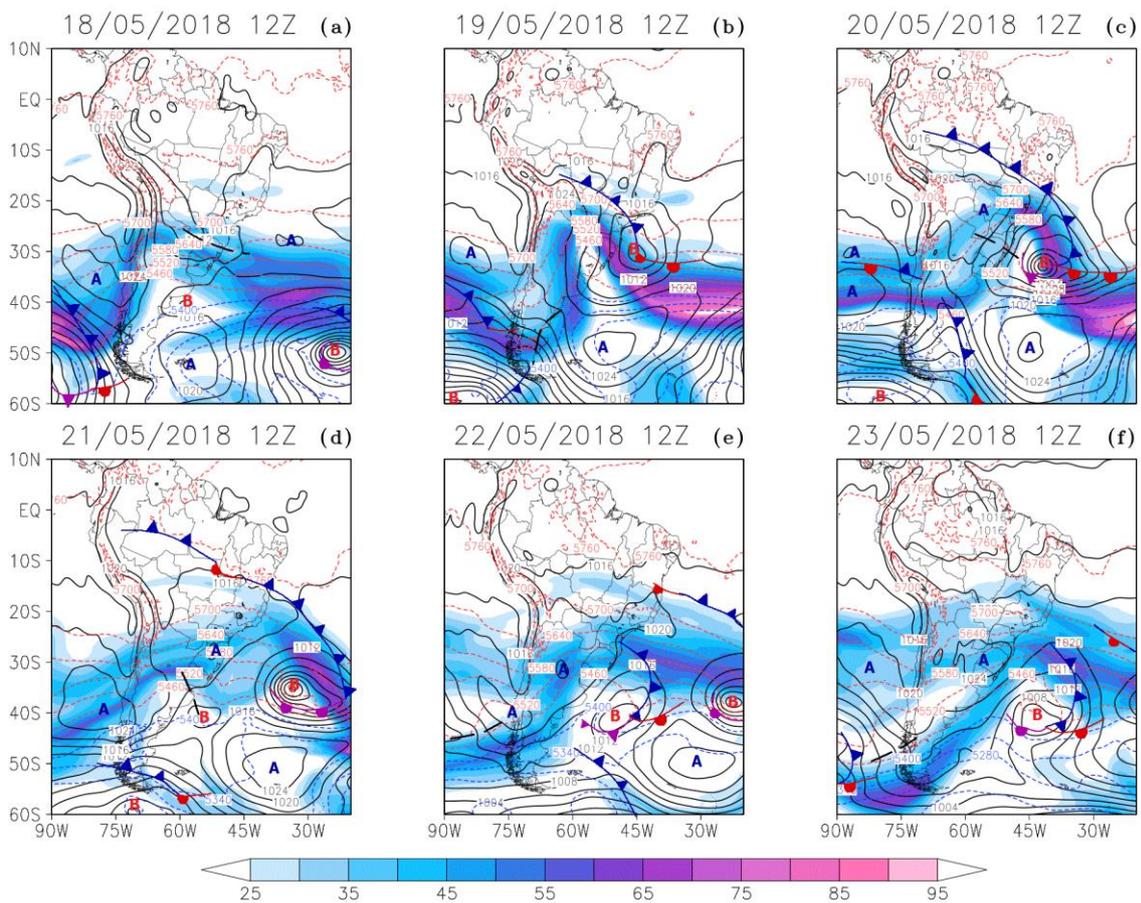


Figura 5. Análise sinótica da OF entre 18 a 23 de maio de 2018 às 1200 UTC. As isóbaras (hPa) são representadas por linhas sólidas pretas, a espessura da camada 500-1000 hPa (mgp) são apresentadas em linhas tracejadas azuis para os valores menores do que 5460 mgp e vermelhas para os valores acima de 5460 mgp. A intensidade do vento em 250 hPa superior a 25 m/s é indicada em cores.

Com rápido desenvolvimento, no dia 19 um sistema de alta pressão transiente avançou sobre a Argentina até chegar ao oeste do Paraguai e sul da Bolívia, com pressão de 1025 hPa no núcleo (Figura 5b). O ASPS encontrava-se semi-

estacionário no litoral do Chile, assim como a alta localizada na região das Ilhas Malvinas. Uma baixa fechada em superfície se desenvolveu entre o litoral de Santa Catarina e do Paraná, dando origem a um ciclone extratropical. A interação do ciclone

com a alta centrada na região do Chaco propiciou forte incursão de ar frio para o Centro-Sul do Brasil, com suporte de sistemas em níveis superiores; em médios níveis notava-se um cavado bastante amplificado entre o sul do Mato Grosso do Sul e o sul do Uruguai, enquanto em altos níveis era observada forte atuação dos jatos polar e subtropical acoplados.

No dia 20 de maio, a alta transiente com centro de 1021 hPa e trajetória continental estava estabelecida entre o sul da Bolívia, Paraguai, sudoeste do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, sul de Goiás, oeste de São Paulo e oeste da região Sul

em forte interação com o ciclone extratropical localizado em 45°O e 30°S, próximo ao litoral do Rio Grande do Sul, e núcleo de 988 hPa (Figura 5c). Esta configuração promoveu intensa advecção de ar frio para latitudes mais baixas. Em médios níveis houve rápida propagação do cavado, que se amplificou até a região central do Estado de São Paulo e sul de Minas Gerais. O jato subtropical era observado atuando até o sul de Goiás. Mais ao sul, a alta próxima das Ilhas Malvinas se mantinha semi-estacionária; esta posição da alta propiciou lento deslocamento do ciclone extratropical, que se manteve próximo ao litoral do Sul e Sudeste.

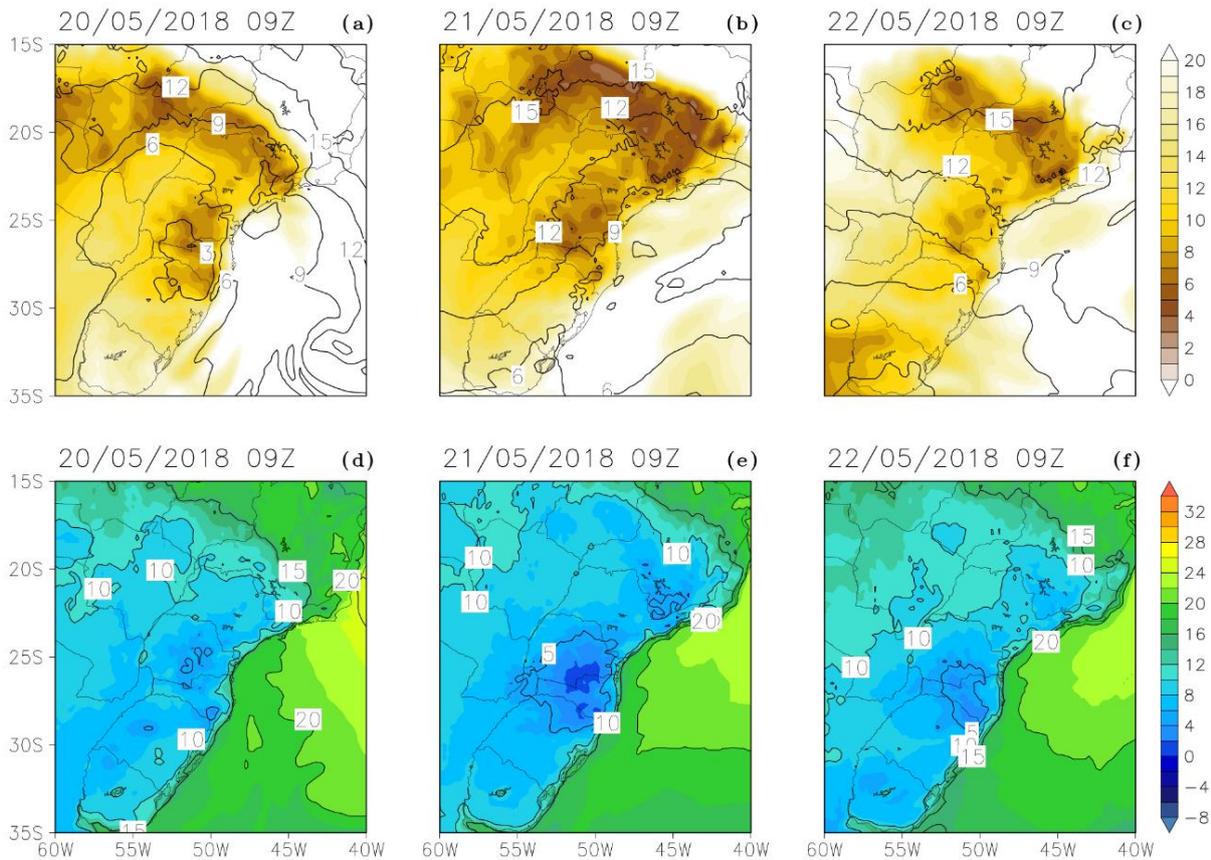


Figura 6. (a-c) PWAT (cores em kg m⁻²) e T850 (linhas pretas sólidas °C); (d-f) T2M (°C) da análise do modelo para os dias 20, 21 e 22 de maio de 2018 às 0900 UTC (próximo ao horário local da temperatura mínima).

No dia 21 ocorreu o pico da OF na maior parte do centro-sul do Brasil (Figura 5d), com a ocorrência de geadas no Triângulo Mineiro e sul de Minas Gerais. Neste dia, o ciclone extratropical se afastou gradualmente do litoral, assim como a alta transiente perdeu força. Em médios níveis, notava-se pouca amplificação do cavado, que também foi se desconfigurando. No oceano Pacífico, notava-se a transposição de parte do ASPS e um novo cavado em médios níveis na região central da Argentina, assim como uma nova ondulação do ramo norte do jato polar.

Uma nova incursão de ar frio, menos

intensa, ocorreu sobre o Sul do Brasil nos dias 22 e 23 (Figuras 5e e 5f), enquanto o ar frio sobre a região Sudeste perdia totalmente sua força. A segunda incursão de ar frio não afetou a região Sudeste.

Caso: 4 a 9 de julho de 2019

Apesar de seguir o mesmo *proxy*, a OF que ocorreu entre os dias 4 e 9 de julho de 2019 tem diferenças importantes em relação às outras duas detalhadas. No dia 3, o Rio Grande do Sul já se encontrava sob a atuação de uma massa de ar frio,

mas um novo pulso mais intenso estava se configurando no sul do continente. Um sistema de alta pressão transpôs a cordilheira dos Andes entre os dias 3 e 4, ao sul da fronteira do Chile com a Argentina, derivado do ASPS que tinha núcleo de 1030 hPa próximo de 90°O e 40°S (Figura 7a). A nova alta transiente se estendia sobre a Argentina de sul a norte em forte interação com uma ampla

área de baixa pressão com dois centros: um de 980 hPa, centrado em 40°O/45°S e outro de 972 hPa em 30°O/50°S. Em médios níveis, ocorria a amplificação de um grande cavado, e em altos níveis o jato polar norte era bastante intenso e se observava ondulado sobre a Argentina e sul do Brasil.

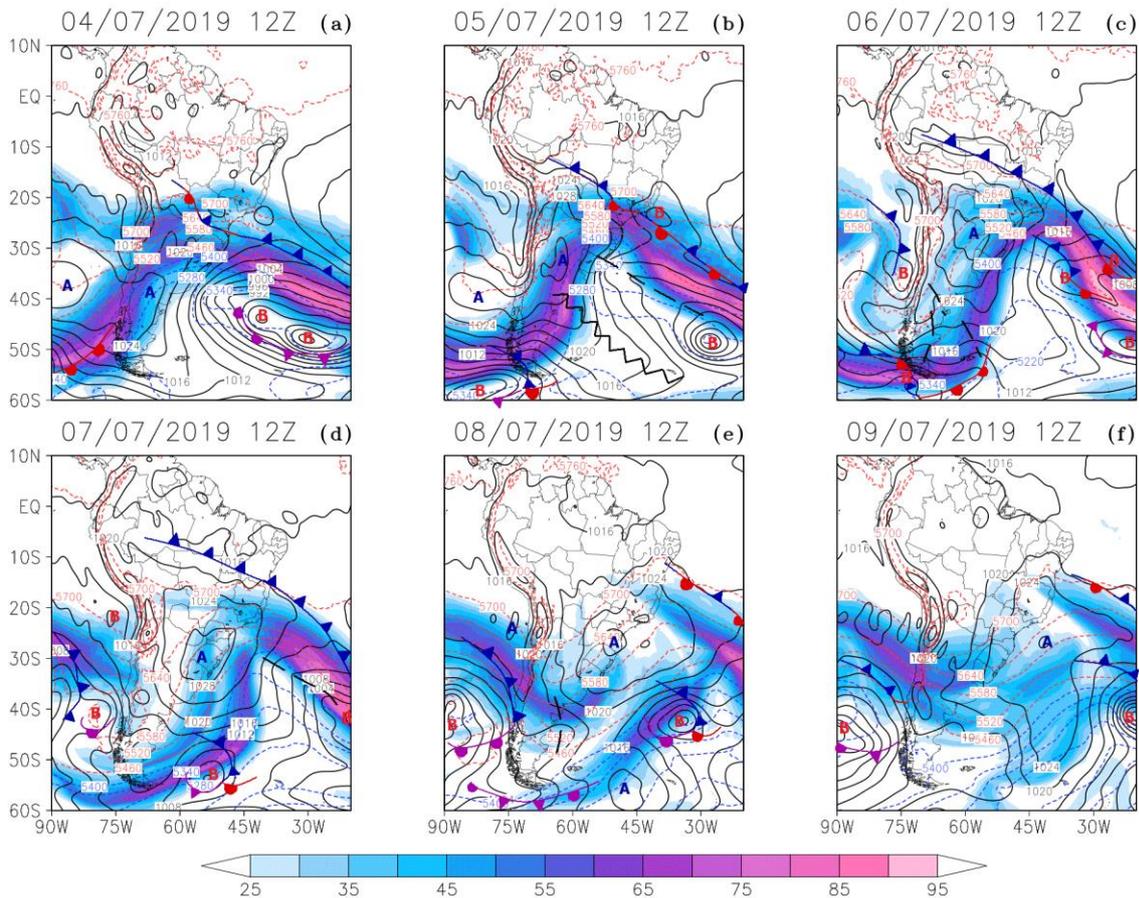


Figura 7. Análise sinótica da OF entre 04 a 09 de julho de 2019 às 1200 UTC. As isóbaras (hPa) são representadas por linhas sólidas pretas, a espessura da camada 500-1000 hPa (mgp) são apresentadas em linhas tracejadas azuis para os valores menores do que 5460 mgp e vermelhas para os valores acima de 5460 mgp. A intensidade do vento em 250 hPa superior a 25 m/s é indicada em cores.

No dia 5, devido ao intenso suporte dos cavados em médios e altos níveis, a alta transiente ganhou força com pressão de 1033 hPa no centro da Argentina (Figura 7b); ela avançou até o sul da Bolívia, Mato Grosso do Sul e região Sul do Brasil. Ainda em superfície, um cavado era observado entre o centro de baixa pressão em 30°O/50°S e a costa sul do Rio Grande do Sul, ocasionando forte gradiente de pressão. O cavado em médios níveis estendia-se até o sul do Mato Grosso do Sul, e em altos níveis o acoplamento dos jatos polar norte e subtropical ocorria entre Santa Catarina e o sul de São Paulo; a forte amplificação dos jatos favoreceu uma incursão muito forte de ar polar sobre a região Sul do Brasil.

A atuação da alta transiente era ampla no

dia 6, e se estendia do centro-sul da Argentina até o sul da Amazônia, onde o ingresso de ar frio causou um intenso evento de friagem (Figura 7c). O centro da alta localizava-se do sul do Paraguai até o oeste do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, com núcleo de 1033 hPa. Havia ainda interação com o sistema de baixa pressão sobre o oceano Atlântico, embora ele tenha se afastado. O cavado em médios níveis ainda era bem amplo, atuando até o Estado de São Paulo. O ramo norte do jato polar era observado atuando até o litoral sul de São Paulo, evidenciando um amplo alcance da porção mais forte da massa de ar frio; o jato subtropical era notado pouco a norte do jato polar, e o acoplamento entre os dois ocorria sobre o oceano, a sudeste do litoral do Rio de Janeiro. Devido a esta

configuração, a tarde do dia 6 foi bastante fria em grande parte do centro-sul do Brasil mesmo na presença de sol forte.

O avanço da alta transiente aliado à forte intensidade do ar frio e a atmosfera muito seca tornaram o ambiente propício à ocorrência de geadas. Houve intensa queda nas temperaturas já no dia 6 ao anoitecer. No dia 7, o dia pico da OF, o núcleo da alta estava sobre a região Sul do Brasil, mas com ampla atuação até a região Centro-Oeste e Sudeste (Figura 7d). O cavado em médios níveis se propagou para leste, mas ainda atuava sobre o

leste da região Sul e parte do Sudeste. Os jatos polar norte e subtropical atuavam paralelamente, mas sem acoplamento evidenciado; sobre a Argentina já era notada uma forte amplificação de uma crista em altos níveis.

No dia 8, a alta transiente atuava no leste das regiões Sul e Sudeste, com algum aporte de ar frio ainda devido ao cavado em médios níveis que embora estivesse enfraquecido ainda atuava (Figura 7e). A partir do dia 9, a alta se deslocava para leste e perdia força, bem como os sistemas em níveis superiores (Figura 7f).

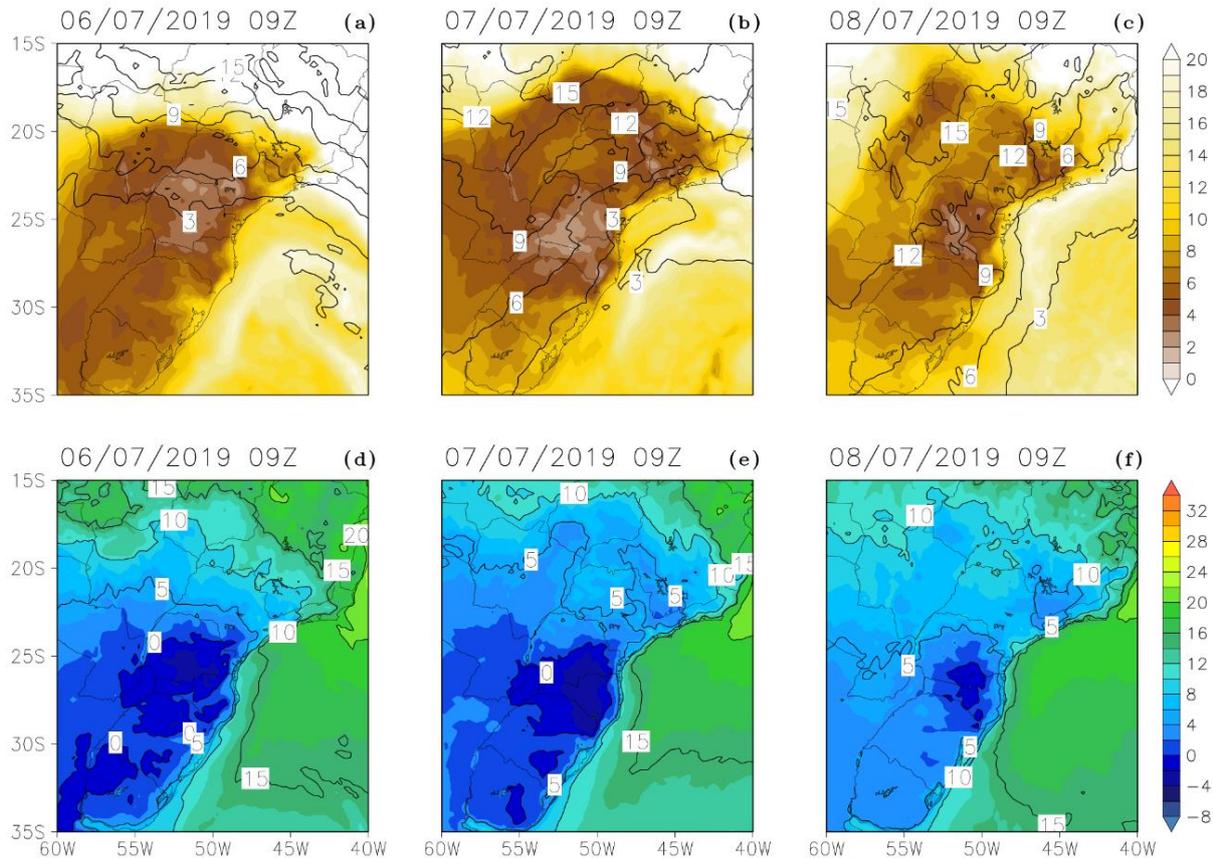


Figura 8. (a-c) PWAT (cores em kg m⁻²) e T850 (linhas pretas sólidas °C); (d-f) T2M (°C) da análise do modelo para os dias 06, 07 e 08 de julho de 2019 às 0900 UTC (próximo ao horário local da temperatura mínima).

Efeitos das OF e considerações gerais: Dados Observados

Os eventos de OF analisados possuem semelhanças em sua evolução, seguindo parcial ou totalmente o modelo proposto por Lucyrio *et al.* (2019), em que se nota a presença do ASPS bastante ativo na costa do Chile de 3 a 4 dias antes do dia pico da OF (d0), a transposição de parte do ASPS com conseqüente fortalecimento devido ao suporte de sistemas em médios e altos níveis entre 2 e 3 dias antes de d0, interação com uma baixa pressão no oceano Atlântico e avanço da alta transiente sobre as regiões Sul e Sudeste do Brasil.

Foi observada a ocorrência de friagem nos 3 eventos, conforme caracterização descrita por Ricarte *et al.* (2015) e Escobar *et al.* (2019).

Em todas as regiões mencionadas a OF de julho de 2019 foi a mais intensa, provocando em alguns locais as menores temperaturas em 30 anos (Leles, 2019). A OF provocou geadas intensas nas lavouras de café no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba que afetaram a safra de 2020 (Scapolatempore, 2019). Na região de Ribeirão Preto houve ocorrência de geadas amplas e até o rompimento de cabos de eletricidade nos municípios de Jaboticabal e Monte Alto (G1, 2019).

A OF ocorrida em maio de 2018 também provocou geadas no Triângulo Mineiro, especialmente na região conhecida como Cerrado Mineiro que é grande produtora de café. As baixas temperaturas afetaram mais as plantações localizadas em áreas de baixada; na ocasião, a temperatura baixou a 1,3°C em Patrocínio.

Os efeitos da OF de julho de 2016 foram amplamente sentidos nos Estados de São Paulo e

Minas Gerais com a ocorrência de geadas de moderada a forte intensidade em áreas produtoras de café (Notícias Agrícolas, 2016). No Alto Paranaíba a geadas destruiu mais de 4 milhões de cafezais, provocando um prejuízo de cerca de R\$ 1,5 milhão e prejuízo nas safras dos anos seguintes (G1, 2016). Houve registro de temperaturas negativas no interior de São Paulo, com -1,0°C em Pradópolis e -0,5°C em Ituverava (Figura 12b).

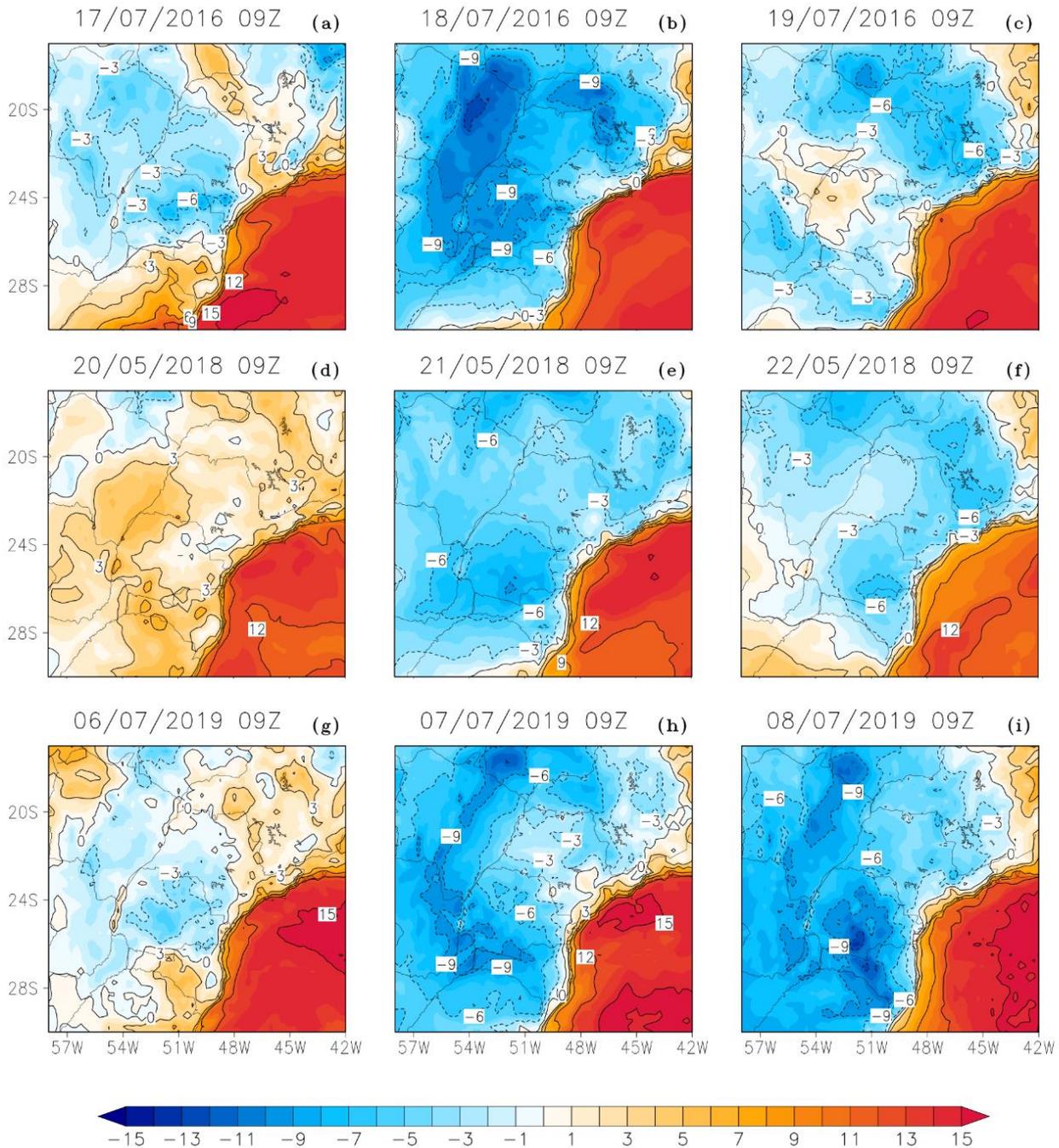


Figura 9. Diferença da T2M menos T850 hPa em °C. Valores negativos, em azul, indicam T2M inferior à T850.

Nos três casos, é notável a queda na quantidade total de vapor d'água integrado em na coluna atmosférica com valores frequentemente

abaixo dos 10 kg m⁻² (Figuras 4b, 6b e 8b). No caso de 2016, os menores valores em d-1 (um dia antes de d0) foram no centro-oeste e sul do Estado

de São Paulo, região onde houve a maior queda de temperatura durante a advecção de ar frio (Figura 3a); em d0, as menores quantidades foram observadas no nordeste do Mato Grosso do Sul, norte de São Paulo, sul e Triângulo Mineiro e extremo sudoeste de Goiás, regiões onde foram observadas as menores temperaturas durante a OF (Figuras 4b e 4e). Além das já citadas, fez 0,2°C em São Sebastião do Paraíso-MG, 1,3°C em Ariranha-SP (Figura 12b), 1,6°C em Uberaba-MG, 2,6°C em Jataí-GO e 2,8°C em Cassilândia-MS. A maior parte do vapor d'água contido na atmosfera está nos níveis mais baixos, próximos da superfície, e a baixa quantidade de vapor está diretamente ligada a uma grande perda de radiação terrestre e conseqüentemente a uma maior queda nas temperaturas. Nestes casos observa-se forte gradiente térmico vertical que foi calculado pela diferença dos valores de T2M menos T850 (Figura 9); no dia 18 de julho de 2016 a T850 estava entre 6 e 12°C mais alta que a T2M observada em grande parte da região afetada pela OF (Figura 9b).

A OF de maio de 2018 teve uma atuação mais ampla, chegando até o centro do Estado de Goiás e o leste de Minas Gerais, apesar de ter provocado geadas menos amplas (Figura 6). Os menores valores de PWAT foram observados entre o centro-sul de Goiás e Minas Gerais, região que compreende o Triângulo Mineiro, Alto Paranaíba, sul, centro e Zona da Mata, que foi a região onde as menores temperaturas foram observadas (Figuras 6b e 6e). Diferenças entre 3 e 7°C foram observadas entre a T850 e a T2M às 0900 UTC (Figura 9e).

No caso de julho de 2019, a atmosfera esteve muito seca em grande parte do Centro-Sul do Brasil, denotando ampla atuação da massa de ar frio (Figuras 8a, 8b e 8c). Dos três casos analisados, este possuía o maior suporte de ar frio nos níveis superiores. Em d-1, os valores mínimos de PWAT ocorreram entre o Paraná, sul do Mato Grosso do Sul e centro-oeste de São Paulo (Figura 8a), onde apenas a advecção de ar frio fez a temperatura baixar para menos de 3°C em amplas áreas (Figura 8d). Em d0, valores muito baixos de PWAT eram notados até o centro-sul de Goiás (Figura 8b); de fato, a forte perda radiativa e o a forte intensidade da massa de ar frio propiciaram temperaturas que chegaram a até -9,4°C em Urupema, na Serra Catarinense. Na região de estudo, fez 1,1°C em Pradópolis-SP, 1,3°C em Patrocínio-MG, -0,1°C em Ituiutaba-MG, 1,4°C em Conceição das Alagoas-MG e 1,2°C em Ituverava-SP (Figura 12d). Mais ao norte, a temperatura baixou a 5,8°C em Goiânia-GO, uma das menores temperaturas na capital goiana em 20 anos. As regiões com a ocorrência de maior inversão térmica na camada

entre a superfície e o nível de 850 hPa foram o Paraná, leste do Mato Grosso do Sul e sudoeste de Goiás, além do Triângulo Mineiro no dia 6 (Figuras 9h e 9i).

A OF de julho de 2016 teve uma atuação mais restrita que as de maio de 2018 e julho de 2019, e isso se deve ao menor suporte de sistemas nos níveis superiores da troposfera, demonstrado na Figura 2 pela menor amplificação do cavado em médios níveis e menor atividade dos jatos subtropical e polar norte sobre a região Sudeste do país. Considerando as regiões norte de São Paulo e Triângulo Mineiro, as temperaturas mínimas do dia 18 de julho de 2016 foram, na maioria das EMA, menores que as do dia 7 de julho de 2019. Em noites de grande estabilidade atmosférica, na presença de alta pressão, pouco vento e céu claro, a perda de radiação de onda longa pela superfície terrestre é mais efetiva (Streck *et al.*, 2011). Mesmo nessas situações podem ocorrer brisas de montanha. Durante a noite, o rápido resfriamento do ar nas faces das montanhas em comparação ao ar dos vales faz com que seja gerada a força do gradiente de pressão apontando da montanha para o vale surgindo um escoamento nesse sentido (Reboita *et al.*, 2014). Essa também é uma situação que se espera quando a massa de ar frio se estabelece numa dada localidade e contribui para o acúmulo de ar frio nos vales. Por outro lado, antes da chegada da massa de ar ocorre advecção fria, isto é, ventos que transportam o ar frio (Figura 10a, 10d, 10g) e, como são mais intensos do que as brisas, atuam de forma a homogeneizar a temperatura nas diferentes regiões (topos, encostas e vales). A análise a seguir mostra como as variáveis atmosféricas respondem a essas duas situações (dia pico da OF, d0, e dia anterior, d-1) no horário das 0900 UTC. Considerando o d0, nos dados observados nas EMA, foi constatada uma considerável diferença entre as temperaturas observadas em estações de encosta e baixada com as estações localizadas em regiões de topo, uma vez que as T2M de topo eram mais quentes. A diferença entre a média da T2M observada em estações de baixada e de topo foi de 4,6°C em 18/07/2016, 2,8°C em 21/05/2018 e 2,8°C no dia 07/07/2019. Por outro lado, em d-1, como há predomínio da advecção do ar frio em função dos ventos sinóticos de quadrante sul, as diferenças foram muito menores, não chegando a 1°C nos 3 casos (Figuras 10a, 10b e 10c), o que ocorre em virtude da homogeneização da atmosfera por parte do fenômeno de escala sinótica. Em d-1 os menores valores de PWAT (abaixo de 15 kg m⁻²) foram observados nas regiões onde ocorreu a advecção de ar frio e em d0 os valores mais baixos ocorreram sobre as áreas onde ocorreram as menores

temperaturas.

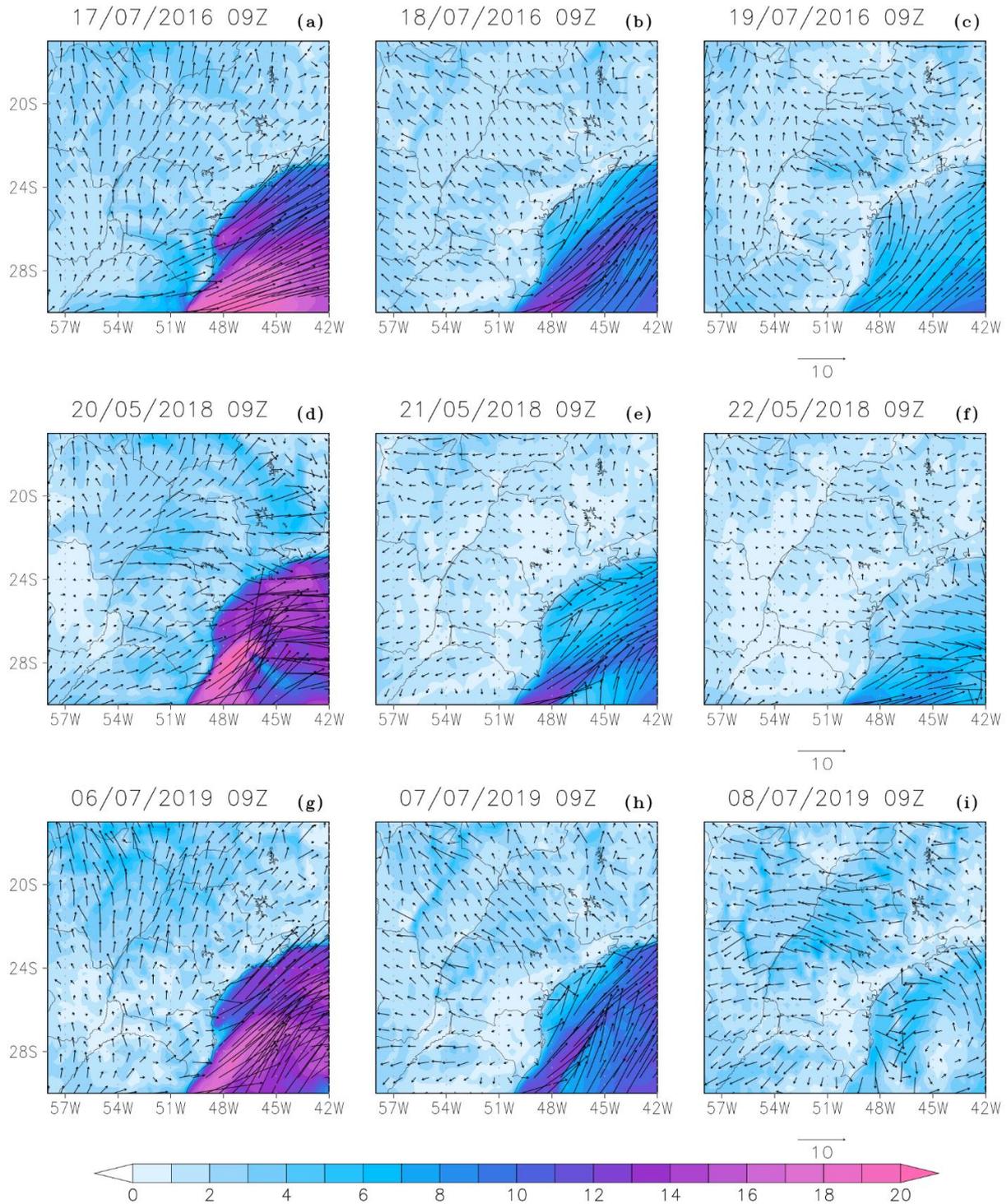


Figura 10. Intensidade (cores, em m s^{-1}) e direção (vetores) do vento a 10 metros de altura para (a, d, g) d-1, (b, e, h) d0 e (c, f, i) d+1 das três OF estudadas.

A menor diferença entre as T2M observadas em estações de topo e de baixada parece ter uma boa relação com a circulação atmosférica durante a fase escura do dia. Em d0 quando há o predomínio do sistema de alta pressão e resfriamento noturno por perda radiativa, a T2M às 0900 UTC é mais fria nas baixadas e isso se relaciona tanto a perda radiativa quanto ao

transporte de ar frio pela brisa de montanha. Já no d-1 quando o resfriamento advectivo era predominante a diferença de temperatura entre as três regiões foi muito pequena (Figura 11). No d-1 (Figuras 10a, 10d, 10g) a intensidade média do vento foi maior que em d0 (Figuras 10b, 10e, 10h). Considerando o caso de julho de 2016, a intensidade média do vento entre as 2100 UTC de

16/07/2016 e as 09 UTC de 17/07/2016 foi de $2,6 \text{ m s}^{-1}$ e de $0,7 \text{ m s}^{-1}$ entre as 21 UTC de 17/07/2016 e as 09 UTC de 18/07/2016. Em maio de 2018, a intensidade média foi de $2,3 \text{ m s}^{-1}$ entre as 21 UTC de 19/05/2018 e 09 UTC de 20/05/2018, e de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ entre as 21 UTC de 20/05/2018 e 09 UTC de 21/05/2018. Por fim, na OF de julho de 2019 o vento médio das 21 UTC de 05/07/2019 até 09

UTC de 06/07/2019 foi de $1,9 \text{ m s}^{-1}$, e de $0,9 \text{ m s}^{-1}$ das 21 UTC de 06/07/2019 até as 09 UTC de 07/07/2019. Nos três casos, notou-se que em d-1 o vento predomina de quadrante sul e sudoeste (Figuras 10a, 10d, 10g), virando para sudeste em d0 (Figuras 10b, 10e, 10h) e leste e sudeste em d+1, quando a intensidade volta a aumentar (Figuras 10c, 10f, 10i).

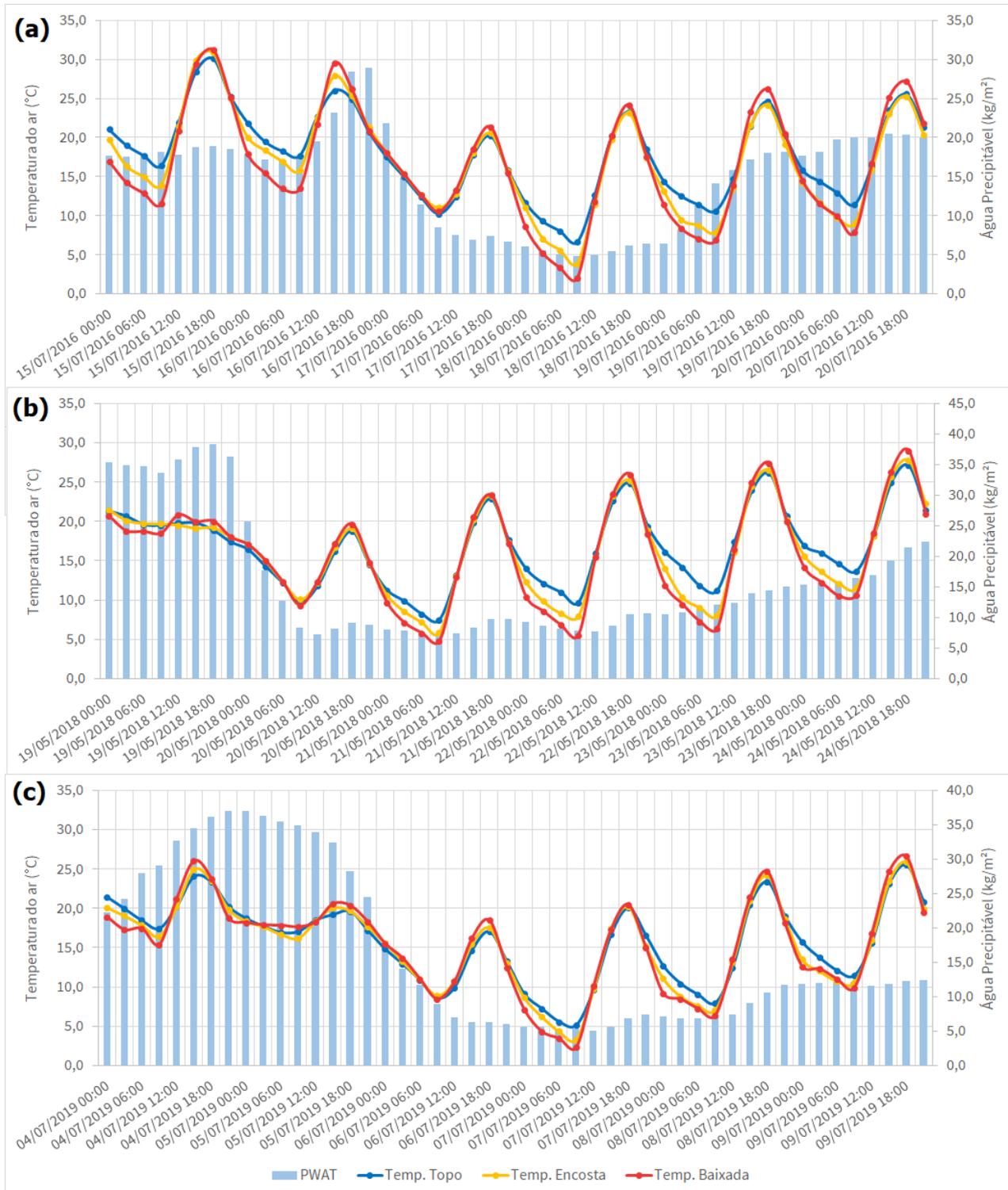


Figura 11. Médias horárias das temperaturas observadas (°C) nas EMA de topo (linha azul), de encosta (linha amarela) e de baixada (linha vermelha) e média PWAT dos pontos de grade próximos das EMA (barras azuis, kg m^{-2}) entre (a) 15 e 20 de julho de 2016, (b) 19 e 24 de maio de 2018 e (c) 04 e 09 de julho de 2019.

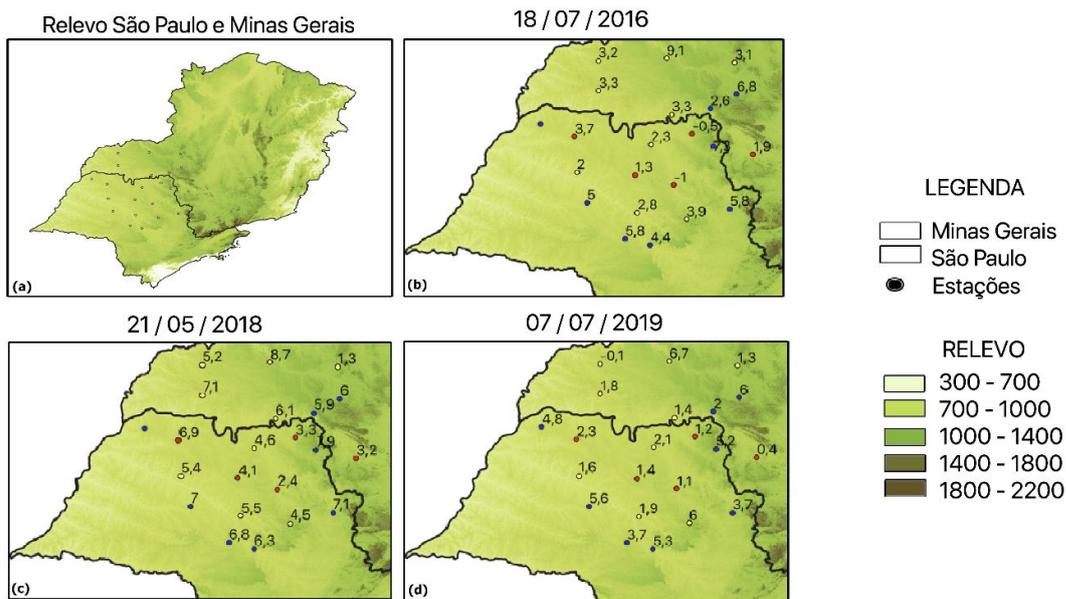


Figura 12. Temperaturas mínimas registradas (°C) nas EMA da região de estudo nos dias (b) 18 de julho de 2016, (c) 21 de maio de 2018 e (d) 07 de julho de 2019. Os pontos azuis indicam EMA situadas em topo, pontos amarelos situadas em encosta e pontos vermelhos em baixadas.

Com relação à umidade relativa do ar (UR) às 0900 UTC, espera-se que no d-1 com o predomínio do escoamento sinótico não haja grandes diferenças de UR entre as regiões, da mesma forma que foi observado na T2M, e que em d0 essa seja maior. Nos três casos, foi observada essa diferença na UR. Na OF de julho de 2016, os valores observados foram de 88,3% e 92,7% em d-1, 80,7% e 95,7% em d0, e 63,4% e 82,7% em d+1 nas EMA de topo e baixada respectivamente; em maio de 2018 os valores foram de 90,3% e 91,3% em d-1, 85,8% e 95,3% em d0, e 72,1% e 94,7% em d+1 nos topos e baixadas, respectivamente; no caso de julho de 2019, 82,7% e 86,8% em d-1, 75,0% e 93,8% em d0, e 78,9% e 87,3% em d+1 em topos e baixadas. A maior diferença nos casos de julho de 2016 e maio de 2018 foram em d+1. Em julho de 2019, a diferença observada em d+1 foi menor que em d0, e isso se deve a maior mistura provocada pelos ventos, uma vez que a intensidade do vento em d+1 foi a maior dos três casos.

A variabilidade espacial da T2M e UR nas regiões de topo, encosta e várzea se assemelham aos resultados observados por Brunini *et al.* (2004) que compararam variáveis atmosféricas em áreas de topo e de várzea no interior do Estado de São Paulo. Os autores mostram que há diferença térmica maior entre várzea e região mais elevada nos meses mais frios do ano, com uma diferença média de cerca de 3°C na temperatura mínima (o que ocorre por volta das 7 horas da manhã) e, praticamente, sem diferença na temperatura

máxima. Eles atribuíram este resultado à capacidade de regiões mais baixas acumularem ar frio (Yoshino, 1975). A respeito da umidade relativa do ar, as maiores diferenças foram observadas durante o período mais frio do ano; na várzea, a umidade relativa máxima, que ocorre próximo do horário da temperatura mínima, ficava quase sempre em 100%, com diferença média em relação ao topo de cerca de 9%.

Validação das previsões de 72, 48 e 24 horas

A avaliação do modelo GFS em relação à análise das 1200 UTC de d0 nos três casos de OF foi feita pela diferença entre as previsões inicializadas 72, 48 e 24 horas antes da ocorrência e as análises.

Na OF de julho de 2016, foi observado um viés de até 5 hPa na PNMM na previsão de 72 horas, o que foi sendo reduzido nas previsões de 48 e 24 horas, onde o *bias* era de cerca de 1 hPa principalmente no interior do continente, a leste da cordilheira dos Andes, bem como viés de queda na pressão sobre o oceano Atlântico (Figuras 13b, 13c, 13d). Com relação à EC, as previsões de 72 e 48 horas antes indicavam valores superiores aos observados na região do Chaco (Figuras 13g, 13h), norte da Argentina e Sul do Brasil; os valores mais negativos foram entre o litoral do Rio Grande do Sul, Uruguai e a foz do Rio da Prata 72 horas antes (Figura 13h). 24 horas antes, os desvios variaram entre -10 e 10 mpp, denotando um bom

desempenho geral (Figura 13f).

18/07/2016

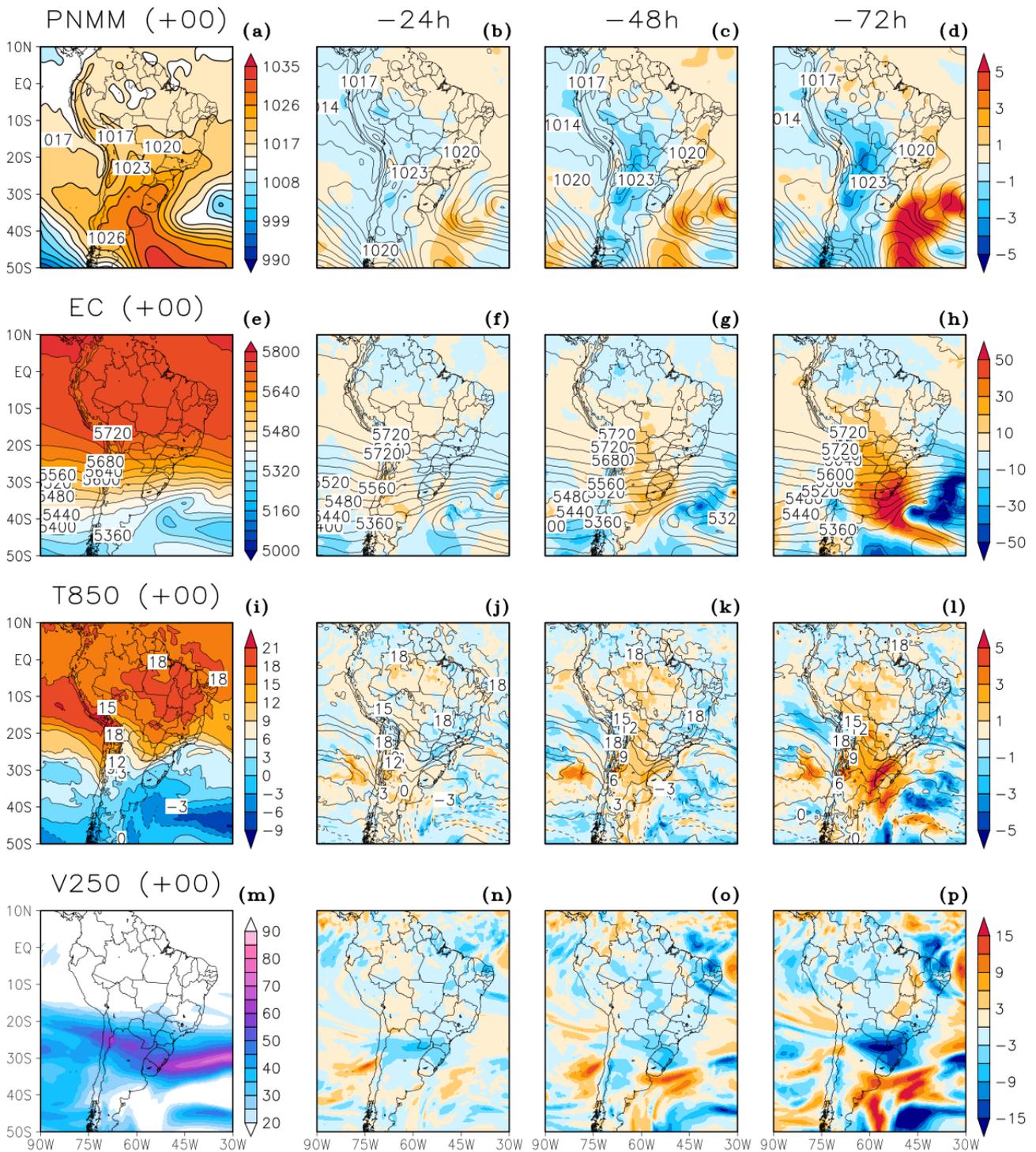


Figura 13. Validação dos campos espaciais de pressão no nível médio do mar (PNMM), espessura da camada 500-1000 hPa (EC), temperatura no nível de 850 hPa (T850) e intensidade do vento em 250 hPa (V250) em relação às previsões de 24, 48 e 72 h antes de 18 de julho de 2016 (d0). Valores negativos indicam que a previsão apontou valores inferiores aos observados. Os quadros (a), (e), (i) e (m) indicam a análise do modelo, (b), (f), (j) e (n) a previsão de 24h, (c), (g), (k) e (o) a previsão de 48h e (d), (h), (l) e (p) a previsão de 72h.

21/05/2018

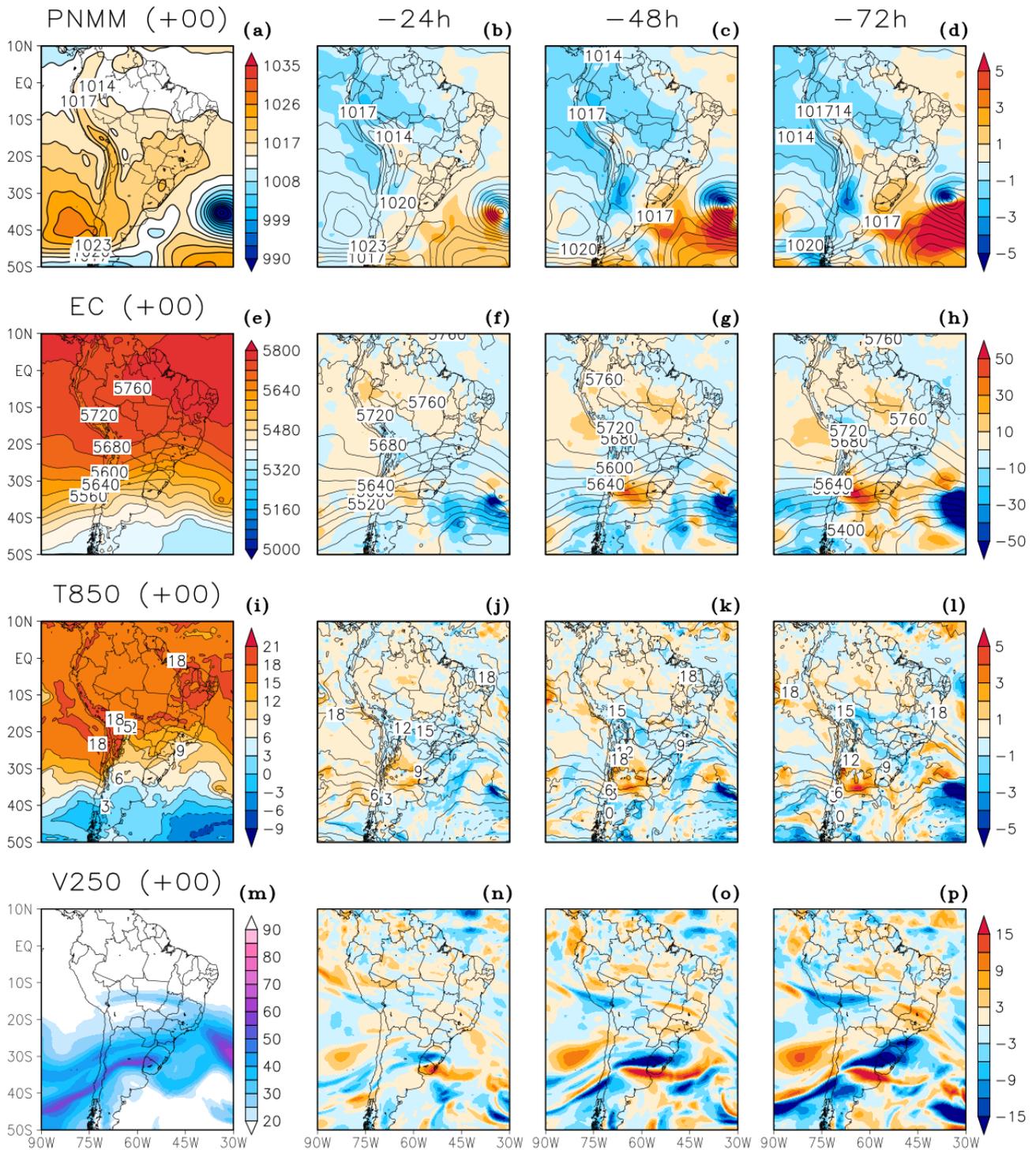


Figura 14. Validação dos campos espaciais de pressão no nível médio do mar (PNMM), espessura da camada 500-1000 hPa (EC), temperatura no nível de 850 hPa (T850) e intensidade do vento em 250 hPa (V250) em relação às previsões de 24, 48 e 72 h antes de 21 de maio de 2018 (d0). Valores negativos indicam que a previsão apontou valores inferiores aos observados. Os quadros (a), (e), (i) e (m) indicam a análise do modelo, (b), (f), (j) e (n) a previsão de 24h, (c), (g), (k) e (o) a previsão de 48h e (d), (h), (l) e (p) a previsão de 72h.

07/07/2019

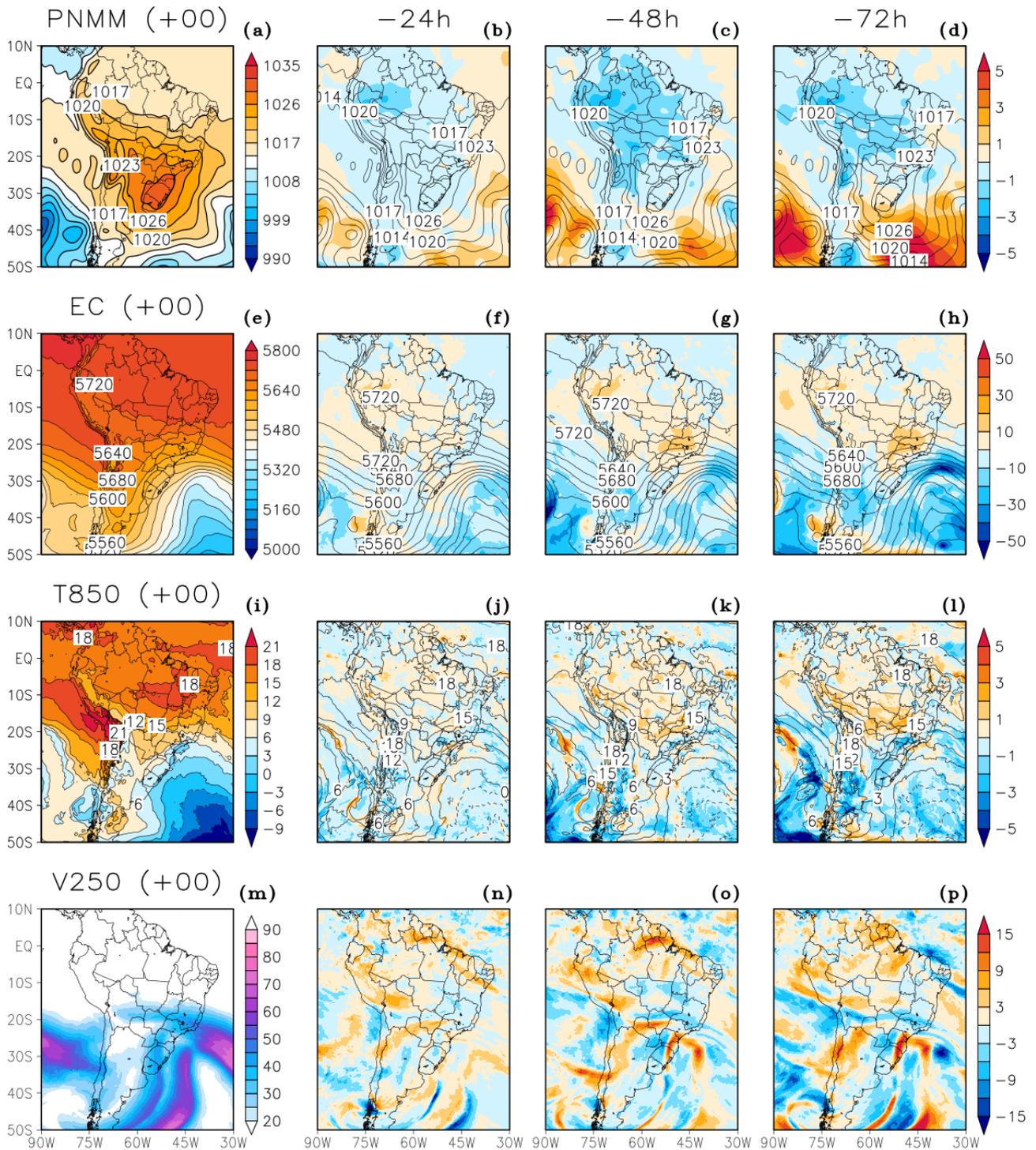


Figura 15. Validação dos campos espaciais de pressão no nível médio do mar (PNMM), espessura da camada 500-1000 hPa (EC), temperatura no nível de 850 hPa (T850) e intensidade do vento em 250 hPa (V250) em relação às previsões de 24, 48 e 72 h antes de 07 de julho de 2019 (d0). Valores negativos indicam que a previsão apontou valores inferiores aos observados. Os quadros (a), (e), (i) e (m) indicam a análise do modelo, (b), (f), (j) e (n) a previsão de 24h, (c), (g), (k) e (o) a previsão de 48h e (d), (h), (l) e (p) a previsão de 72h.

No campo de T850, houve boa acurácia do GFS na previsão de 24 horas com diferenças entre -1 e 1°C na maior parte do Centro-Sul do Brasil

(Figura 13j). Entre 48 e 72 horas antes (Figura 13k, 13l), foram observados vieses negativos nas mesmas regiões onde os desvios de EC foram mais

acentuados, indicando uma tendência do modelo a mostrar uma intensificação da incursão de ar frio quanto mais próximo de d0. No campo de V250, os desvios positivos foram observados praticamente na mesma região, entre o norte da Argentina e a região Sul do Brasil; novamente, os desvios positivos diminuíram com a proximidade de d0 (Figuras 13n, 13o, 13p). Este desvio indica um posicionamento mais ao norte e mais intensificado dos jatos polar norte e subtropical.

O modelo apresentou um melhor desempenho geral na OF de maio de 2018, com menores desvios na PNMM (Figuras 14b, 14c, 14d) sobre o continente mesmo na previsão de 72 horas antes (Figura 14d). Uma região que merece destaque é o oceano Atlântico, precisamente a sul e sudoeste do centro de baixa pressão próximo de 35°S e 40°O, onde houve um desvio predominantemente negativo indicando que a baixa pressão, de fato, ficou mais próxima do continente que o previsto, indicando uma interação maior entre a baixa e a alta transiente continental. Com relação à EC, também foi observada boa acurácia do GFS, com maiores desvios na porção central da Argentina, Uruguai e sul do Rio Grande do Sul na previsão de 48 a 72 horas (Figuras 14g, 10h); este desvio foi bastante suavizado na previsão de 24 horas (Figura 14f). No campo de T850, os desvios mais significativos foram entre -2 e -3°C entre o norte do Rio Grande do Sul e extremo sul de São Paulo mesmo na previsão de 24 horas (Figura 14j); na maior parte do continente houve pouca diferença entre as previsões. O vento em 250 apresentou-se mais intenso que o previsto nos três cenários (Figuras 14n, 14o, 14p) sobre o centro-sul do Rio Grande do Sul, estendendo-se até o Paraná na previsão de 72 horas (Figura 14p); este resultado demonstra que a posição do ramo norte do jato polar manteve-se mais ao norte que o previsto (Figura 14m).

A tendência de intensificação da incursão de ar frio com a aproximação de d0, conforme observada nos outros dois casos, ocorreu também na OF de julho de 2019. Isso foi notável mesmo com o modelo apresentando boa acurácia geral, a melhor nos três casos analisados. No que diz respeito à PNMM, desvios próximos a 1 hPa foram observados amplamente na previsão de 24 horas (Figura 15b), com alteração bastante incremental. Em 48 e 72 horas, desvios maiores, entre -2 e -3 hPa foram constatados na região Amazônica e no Centro-Oeste do Brasil (Figuras 15c e 15d), com desvios negativos mais significativos ocorrendo ao sul do oceano Atlântico; houve suavização deste desvio em 24 horas. No campo de EC, desvios mais negativos em 48 e 72 horas sobre o norte de São Paulo, Minas Gerais, sul de Goiás e leste do Mato

Grosso do Sul (Figuras 15g, 15h), indicando uma tendência a maior amplificação do cavado em médios níveis.; em 24 horas praticamente não houve desvios significativos (Figura 15f). A T850 apresentou poucas alterações nas previsões, com poucos desvios importantes. Destaca-se o maior desvio positivo entre o oeste do Rio Grande do Sul e oeste de São Paulo na previsão de 72 horas, sendo este entre -2 e -3°C (Figura 15l). No campo de V250, os vieses observados foram menos destacados que nos outros dois casos. Somente na previsão de 72 horas (Figura 15p) nota-se uma área com valores negativos na faixa leste da região Sul; sendo feita a comparação com a análise (Figura 15m) é notável que houve tendência a interiorização do cavado formado em altos níveis, com o jato subtropical passando sobre a região central do Sul do Brasil, de sul a norte, e o jato polar norte mais próximo do continente.

3.4 Verificação do modelo GFS na previsão de temperaturas em 2 m

O modelo GFS, utilizado nas análises e na previsão dos eventos, possui resolução horizontal de 27 km. Modelos globais não são indicados para a simulação e visualização precisa de feições detalhadas de relevo devido a resolução horizontal não ser capaz de representar as variações em escala local. Na validação da previsão de T2M do modelo GFS em relação aos valores observados, isso pode ser deduzido a partir da diferença entre o erro médio observado nas estações de baixada e encosta em relação às de topo. A Figura 12 mostra a média horária das temperaturas observadas das EMA de topo, encosta e baixada, além da PWAT média de toda a região de estudo.

Na análise da OF de julho de 2016, em d-1, dia em que ocorreu a advecção do ar frio sobre a região de estudo, o erro médio observado foi menor que 1°C. Na manhã de d0, no horário das 0900 UTC, o erro foi de 4,2°C nas baixadas, 3,0°C nas encostas e 0,5°C nos topos. Em d+1 a magnitude do erro foi menor, embora continuasse em destaque o *bias* das baixadas, que teve erro médio de 2,3°C no horário das 0600 UTC; nas estações de topo, o erro foi de -1,9°C no horário das 0900 UTC (Figura 16a).

Diferentemente do caso de 2016, a OF de maio de 2018 teve o maior erro ocorrendo em d+2 nas EMA de encosta e baixada, com valores de 4,1°C e 3,1°C respectivamente; em d+1 também foram observados erros maiores que em d0, sendo 3,5°C e 1,6°C em baixada e encosta, respectivamente, e em d0 2,6°C e 2,1°C (Figura 16b). Nas estações de topo, o viés ficou próximo de 0.

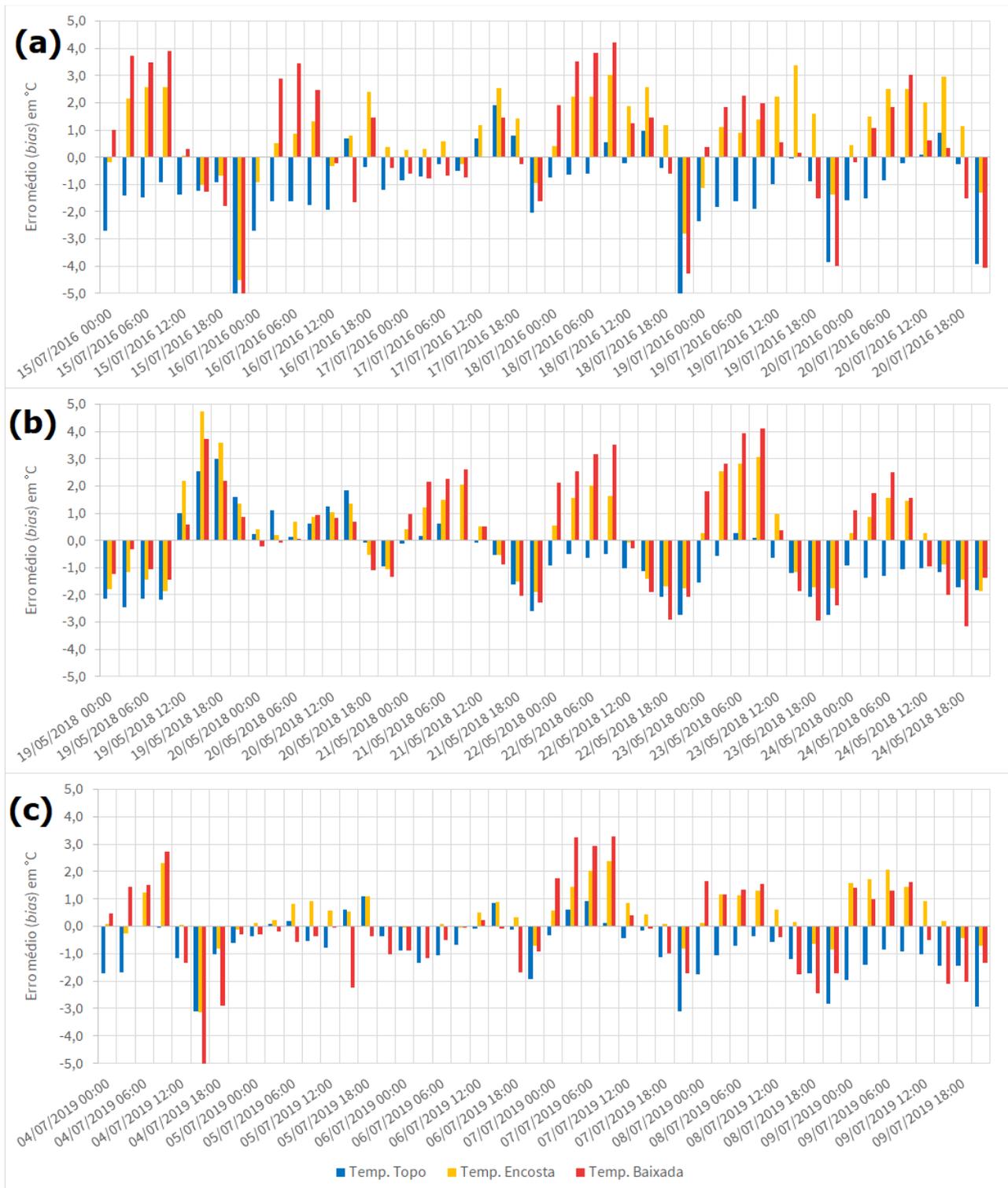


Figura 16. *Bias* da previsão de 24h do modelo GFS em relação às médias horárias das temperaturas observadas nas EMA de topo (azul), encosta (amarelo) e baixada (vermelho), em °C. Viés positivo indica que a previsão apontou valores maiores que os observados. (a) caso de julho de 2016, (b) caso de maio de 2018, (c) caso de julho de 2019.

No caso de julho de 2019, o viés ficou próximo de 0°C em d-1. Em d0 os maiores erros foram observados, sendo de 3,3°C em baixadas e 2,4°C em encostas; nos topos, a tendência se manteve próxima de 0. Em d+1 não foram observadas grandes diferenças entre os erros médios das baixadas e encostas, com 1,6°C e 1,3°C

respectivamente (Figura 16c). Novamente, o viés das EMA de topo ficou próximo de 0, com discreta tendência positiva. Nos três casos, nota-se uma melhor performance do modelo GFS nas estações de topo (Figura 17a, 17d, 17g), com menor desempenho verificado no período noturno entre d0 e d+1. Nas EMA de encosta, verifica-se que os

valores previstos são mais altos que os observados no período noturno, com melhor desempenho no período da tarde (Figuras 17b, 17e, 17h). O mesmo comportamento é verificado nas estações de

baixada, mas de forma mais acentuada no período noturno especialmente em d0 (Figuras 17c, 17f, 17i).

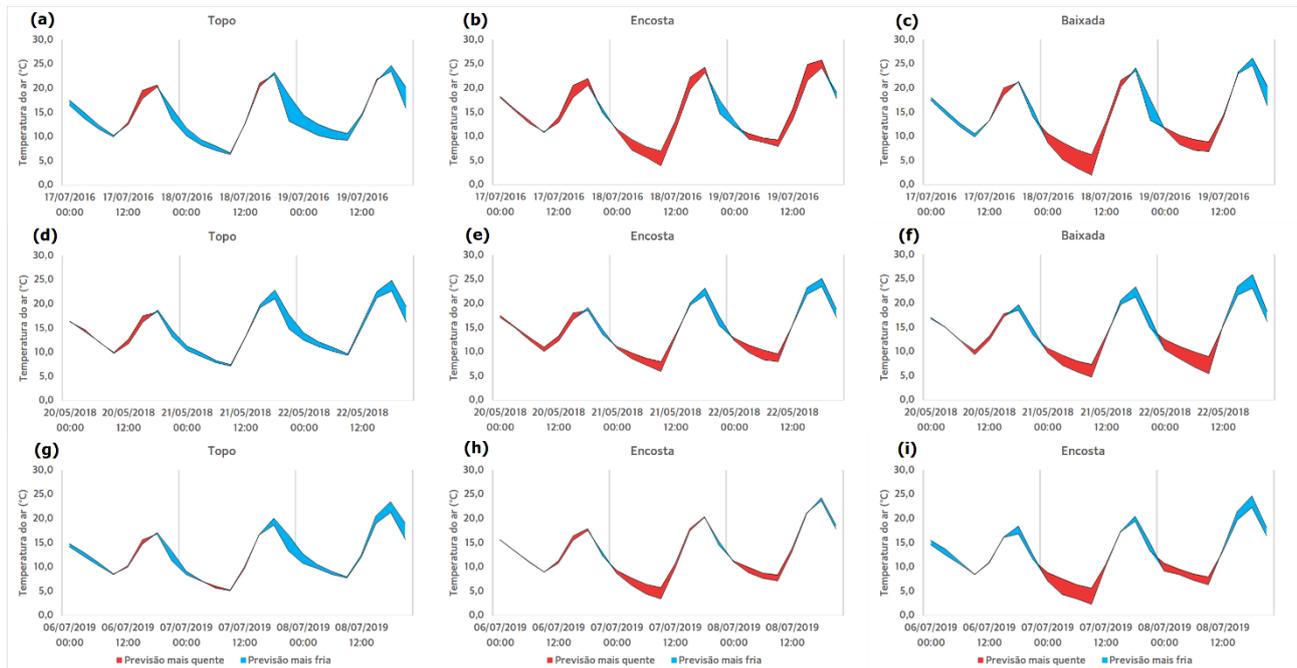


Figura 17. Validação do modelo GFS na previsão de temperaturas entre d-1 e d+1 das OF para as estações de topo (a, d, g), encosta (b, e, h) e baixada (c, f, i). Preenchimento vermelho indica que a previsão esteve mais quente que os valores observados nas EMA, e em azul indica que os valores previstos foram abaixo dos observados.

Conclusões

Nesse estudo foi verificada a habilidade do modelo global GFS em prever três casos de OF: julho de 2016, maio de 2018 e julho de 2019. Foram analisadas as previsões de 72, 48 e 24 horas para os campos sinóticos de PNMM, EC, T850 e V250, além da previsão de 24 horas para a T2M. O padrão sinótico das OF se assemelha em grande parte com o modelo descrito por Lucyrio *et al.* (2019). Por exemplo, nos casos de julho de 2016 e maio de 2018 há o ASPS ativo na costa do Chile de 3 a 4 dias antes de d0 e a presença de uma alta pressão no sul do continente em d-3; em julho de 2019 havia uma crista ao sul da América do Sul e uma alta transiente em formação sobre a Argentina. Nos três casos houve o avanço da alta transiente por via continental, rumo ao Paraguai e sul da Bolívia, em interação com sistemas de baixa pressão no oceano Atlântico próximo da costa sul do Brasil, o que favorecia forte ingresso de ar frio; nos médios e altos níveis houve a amplificação de cavados que davam suporte para os sistemas em superfície. Em d-1, a alta transiente sobre o continente estava centrada entre o oeste do Rio Grande do Sul, Paraguai e Mato Grosso do Sul e havia um cavado em médios níveis orientado meridionalmente sobre

a região Sul do Brasil; também era evidente a atividade dos jatos subtropical e polar norte sobre o Sul do Brasil. O vento em 10 metros neste dia denota advecção de ar frio sobre o Sul, Sudeste e parte do Centro-Oeste do Brasil, com ventos de quadrante S/SW. Em d0 a alta transiente se posiciona sobre o Sul do Brasil, exceto no caso de julho de 2016 posicionada mais ao sul. Em d+1 e d+2 a alta transiente tende a ir para leste até se juntar ao ASAS, além da desconfiguração do cavado em médios níveis.

O modelo GFS mostrou desempenho bom na previsão de campos espaciais especialmente nos casos de maio de 2018 e julho de 2019. No caso de julho de 2016, houve um viés maior na previsão de 72 horas, erro este que foi reduzido nas previsões de 48 e 24 horas. Nos três casos observaram-se aumento no erro conforme a previsão se distancia de d0, o que é consistente com outros estudos como o de Kendzierski *et al.* (2018) no prognóstico de T2M sobre a Polônia. Nos casos de maio de 2018 e julho de 2019, foi observado um viés negativo na PNMM sobre a porção norte da América do Sul, o que foi mantido, embora suavizado, até a previsão de 24 horas; no caso de julho de 2016 este viés foi observado entre o sul da Amazônia e a região do Chaco. Os maiores erros observados na OF de

julho de 2016 foram na EC 72 horas antes de d0, o que, por consequência, provocou erros mais acentuados nas outras variáveis. A EC denota o suporte de ar frio na média atmosfera, e quando ela é mais baixa a PNMM sofre um aumento e a T850 cai.

Em relação à T2M, o objetivo foi verificar a diferença entre as temperaturas observadas em localidades de topo, de encosta e de baixada. De fato, o viés foi maior nas EMA de baixada em d0 e d+1 quando havia pouco vento próximo à superfície, sendo entre 2,6°C e 4,2°C em d0 e entre 1,6°C e 3,5°C em d+1; no entanto, estações de topo obtiveram um bom desempenho. Isto se deve à maior perda radiativa na presença de céu claro, pouco vento e, conseqüentemente, menor mistura, e pouco vapor d'água na coluna atmosférica. Em d-1 ocorre uma homogeneização maior do ar devido a maior intensidade do vento causada pela advecção de ar frio, e o erro foi baixo nos três casos. Considerando a resolução do modelo (27 km), é improvável se obter boa acurácia se o modelo não representa com fidelidade o relevo sendo necessário um modelo regional de maior resolução. No entanto, representa bem os campos sinóticos e as temperaturas em regiões de topo. Conhecendo-se o erro médio da previsão de pontos de baixada em relação aos de topo, é possível a utilização do modelo como ferramenta para se prever temperaturas nestas áreas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) e ao *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) pelos dados do modelo GFS, ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pelos dados das estações meteorológicas automáticas que foram usados no estudo, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro. O primeiro autor agradece ao CNPq pela bolsa de iniciação científica.

Referências

Bender, F. D., 2012. Verificação da Previsão do tempo em São Paulo com o modelo operacional WRF. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Bootsma, A., 1976. Estimating grass minimum temperatures from screen minimum values and other climatological parameters. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, 16, 103-113

Bootsma, A., 1980. Frost risk survey of Prince Edward Island. P. E. I. Department of

Agriculture and Forestry, Canada.

Borges, D. M., 2019. Sistema de previsão de ondas oceânicas no litoral sul do Brasil e águas adjacentes do Oceano Atlântico Sul. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil.

Brunini, A. P. C.; Júnior, P. J. M.; Gallo, P. B., 2004. Comparação microclimática de ambiente de várzea e de posto meteorológico. *Bragantia*, 63, 291-297.

Cabral, D. E. C., 2018. Análise da variabilidade espaço-temporal da água precipitável na atmosfera utilizando dados do ERA-Interim/ECMWF (Dissertação de mestrado). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

Café: Geada atinge lavouras do cinturão produtivo e prejudica próxima safra; condição volta na madrugada desta 3ª feira. *Notícias Agrícolas*, 2016. Acesso em 9 abr. 2020, de <https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/cafe/176503-cafe-geada-volta-a-atingir-lavouras-do-cinturao-produtivo-do-sudeste-condicao-volta-na-madrugada-desta.html#.Xo-2WshKhPY>

Camargo, A. P., 1972. *Agrometeorologia*. Faculdade de Agronomia e Zootecnia “Manoel Carlos Gonçalves”, Espírito Santo do Pinhal, SP, Brasil.

Camargo, A. P., 1997. Geada, o “remédio” é prevenir. *Boletim Técnico CATI*, (227). Governo de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Caramori, P. H.; Manetti Filho, J., 1993. Proteção dos cafeeiros contra geadas. Instituto Agrônomo do Paraná, Londrina, PR, Brasil.

Charles, M. E., Colle, B. A., 2009. Verification of extratropical cyclones within the NCEP operational models. Part I: Analysis errors and short-term NAM and GFS forecasts. *Weather and Forecasting*, 24, 1173-1190.

Costa, A. B. F.; Morais, H.; Kneib, R.; Caramori, P. H., 2015. Alerta geada para a cafeicultura paranaense - Estudo de caso 2013. IX Simpósio Brasileiro dos Cafés do Brasil. Curitiba, PR, Brasil.

Ding, T.; Gao, H.; Yuan, Y., 2020. Pre-signal and influencing source of the extreme cold surges at the Beijing 2022 winter Olympic competition zones. *Atmosphere*, 11(x).

Du, J.; Kimball, J. S.; Jones, L. A., 2015. Satellite Microwave Retrieval of Total Precipitable Water Vapor and Surface Air Temperature Over Land From AMSR2. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53, 2520-

- 2531.
- Dylik, J., 1968. Notion du Versant en Geomorphologie. Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences, Série de Sciences Geol. et Geogr., 16, 125-132.
- Escobar, G. C. J.; Vaz, J. C. M.; Reboita, M. S., 2019. Circulação Atmosférica em Superfície Associada às Friagens no Centro-Oeste do Brasil. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, 42, 241-254.
- Fortune, M. A.; Kousky, V. E., 1983. Two severe freezes in Brazil: precursors and synoptic Evolution. Monthly Weather Review, 111, 181-196.
- Geada destrói cerca de 4 milhões de pés de café em Campos Altos. G1., 2016. Acesso em 9 abr. 2020, de <http://g1.globo.com/minas-gerais/triangulo-mineiro/noticia/2016/07/geada-destroi-cerca-de-4-milhoes-de-pes-de-cafe-em-campos-altos.html>.
- Girardi, C., 1983. O Poço dos Andes. Relatório Técnico ECA 01/83, Centro Técnico Aeroespacial.
- Glickman, T. S., 2000. Glossary of Meteorology. American Meteorological Society.
- IPCC., 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley, Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Kendzierski, S., Czernecki, B., Kolendowicz, L., Jaczewski, A., 2018. Air temperature forecasts' accuracy of selected short-term and long-term numerical weather prediction models over Poland. Geofizika, 35, 67-85.
- Krishnamurti, T. N.; Tewari, M.; Chakraborty, D. R.; Marengo, J.; Dias, P. L.; Satyamurty, P., 1999. Downstream amplification: a possible precursor to major freeze events over Southeastern Brazil. Weather and Forecasting, 14, 242-270.
- Lanfredi, I. S.; Camargo, R., 2018. Classification of Extreme Cold Incursions over South America. Weather and Forecasting, 33, 1183-1202.
- Leles, L., 2019. Fim de semana foi de temperatura negativa no Triângulo e Alto Paranaíba; veja como fica o tempo nos próximos dias. G1. Acesso em 9 abr. 2020, de <https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2019/07/08/temperatura-negativa-e-registrada-na-regiao-do-triangulo-e-alto-paranaiba-segundo-inmet.ghtml>
- Lucyrio, V.; Reboita, M. S.; Albieri, M. C. G., 2019. Ondas de frio intensas sobre o nordeste do Estado de São Paulo entre 1961 e 2017. Revista Brasileira de Climatologia, 15, 571-593.
- Manabe, S. 2019. Role of greenhouse gas in climate change. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 71, 1-13.
- Marengo, J. A.; Cornejo, A.; Satyamurty, P.; Nobre, C.; Sea, W., 1997. Cold surges in tropical and extratropical South America: the Strong event in June 1994. Monthly Weather Review, 125, 2759-2786.
- NCEP - National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, 2015. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory.
- Parmenter, F. C., 1976. A Southern Hemisphere cold front passage at the equator. Bulletin of the American Meteorological Society, 57, 1435-1440.
- Pereira, R. A. A.; Freitas, C. H.; Campos, B.; Carvalho, V. S. B.; Martins, F. B., 2015. Utilização do modelo WRF para simulação de episódios de geada na região de Maria da Fé, Minas Gerais. IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia. Santa Maria, RS, Brasil.
- Pezza, A. B., 2003. Ondas de frio na América do Sul e as trajetórias dos ciclones e anticiclones extratropicais: climatologia sinótica (Tese de doutorado). Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- Rasera, G., 2017. Determinação do potencial de ocorrência de sistemas convectivos de mesoescala para a América do Sul. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.
- Reboita, M. S., Assireu, A., da Silva, L. C., & Rios, N., 2014. Evidências de Circulação de Brisa Vale-Montanha na Serra da Mantiqueira: Cidade de Itajubá–MG. Ciência e Natura, 36, 61-71.
- Reboita, M. S.; Escobar, G., 2015. Manual para Análise de Cartas Sinóticas. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil.
- Reboita, M. S.; Escobar, G.; Lopes, V. S., 2015.

- Climatologia Sinótica de eventos de ondas de frio sobre a região sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, 11, 72-92.
- Ricarte, R. M. D.; Herdies, D. L.; Barbosa, T. F., 2015. Patterns of atmospheric circulation associated with cold outbreaks in southern Amazonia. *Meteorological Applications*, 22, 129-140.
- Ross, J. L. S., 2016. O relevo brasileiro no contexto da América do Sul. *Revista Brasileira de Geografia*, 61(1), 21-58.
- Rozante, J. R., Gutierrez, E. R., da Silva Dias, P. L., de Almeida Fernandes, A., Alvim, D. S., & Silva, V. M., 2020. Development of an index for frost prediction: Technique and validation. *Meteorological Applications*, 27, e1807.
- Santos, A. P. P.; Gonçalves, J. P.; Ferreira, J. A. S.; Santos, S. R. Q., 2013. 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*, 06, 100-109.
- Sapucci, C. R.; Reboita, M. S.; Carvalho, V. S. B.; Martins, F. B., 2018. Condições meteorológicas associadas com a ocorrência de geadas na Serra da Mantiqueira, região Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 14 (Edição Especial Dossiê Clima de Minas Gerais), 153-167
- Scapolatempore, R., 2019. Associações de cafeicultores do Triângulo e Alto Paranaíba relatam prejuízos com geada. G1. Acesso em 9 abr. 2020, de <https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2019/07/08/associacoes-de-cafeicultores-do-triangulo-e-alto-paranaiba-relatam-prejuizos-com-geada.ghtml>
- Sentelhas, P. C., Ortolan, A. A., Pezzopane, J. R. M., 1995. Estimativa da temperatura mínima de relva e da diferença de temperatura entre o abrigo e a relva em noites de geada. *Bragantia*, 54, 437-445.
- Silva, A.; Minuzzi, R. B., 2016. Modelagem estatística para a previsão de geada de radiação. *Ciência e Natura*, 38, 1453-1460.
- Sridevi, C., Kumar Singh, K., Suneetha, P., Reval Durai, V., Kumar, A., 2018. Rainfall forecast skill of Global Forecasting System (GFS) model over India during summer monsoon 2015. *Geofizika*, 35, 40-52.
- Streck, N. A., Gabriel, L. F., Heldwein, A. B., Buriol, G. A., & Paula, G. M. D., 2011. Temperatura mínima de relva em Santa Maria, RS: climatologia, variabilidade interanual e tendência histórica. *Bragantia*, 70, 696-702.
- Termômetros marcam 1,6°C na região de Ribeirão Preto e geada rompe até cabos de eletricidade. G1., 2019. Acesso em 9 abr. 2020, de <https://g1.globo.com/sp/ribeirao-preto-franca/noticia/2019/07/07/termometros-marcam-16oc-na-regiao-de-ribeirao-preto-e-geada-rompe-ate-cabos-de-eletricidade.ghtml>.
- WMO. Guidelines of the definition and monitoring of extreme weather and climate events., 2016. Disponível em: <https://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/opa-ce/opace2/documents/DraftversionoftheGuidelinesontheDefinitionandMonitoringofExtremeWeatherandClimateEvents.pdf>. Acesso em 30 nov. 2019.
- Wrege, M. S.; Fritzsos, E.; Soares, M. T. S.; Prael-Pântano, A.; Steinmetz, S.; Caramori, P. H.; Radin, B.; Pandolfo, C., 2018. Risco de Ocorrência de Geada na Região Centro-Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 14, 524-553.
- Ynoue, R. Y.; Reboita, M. S.; Ambrizzi, T.; Silva, G. A., 2017. *Meteorologia: noções básicas*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Yoshino, M. M., 1975. *Climate in a small area: An introduction to local meteorology*. University of Tokyo Press, Tóquio, Japão.