



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Definição de um modelo conceitual simplificado para a previsão da ocorrência de geadas na Serra da Mantiqueira

Ana Flávia Alves Ferreira^{1,7}, Aline Araújo de Freitas^{2,7}, Vanessa Silveira Barreto Carvalho^{3,7}, Michelle Simões Reboita^{4,7}

¹ Graduada em Ciências Atmosféricas. anaflvia@unifei.edu.br, ORCID: 0009-0007-8159-8794. ² Doutoranda em Meio Ambiente e Recursos Hídricos. alinefreitas@unifei.edu.br, ORCID: 0000-0001-7868-4500. ³ Docente da Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais. vanessa.silveira@unifei.edu.br, ORCID: 0000-0001-7177-6381. ⁴ Docente da Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais. reboita@unifei.edu.br, ORCID: 0000-0002-1734-2395. ⁷ Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais

Artigo recebido em 27/06/2024 e aceito em 12/05/2025

RESUMO

O estudo e a previsão de geadas é essencial para evitar danos socioeconômicos nas regiões afetadas por esse fenômeno. Nesse contexto, o presente estudo tem como é desenvolver um modelo conceitual para a previsão de geada na região da Serra da Mantiqueira, localizada na região sudeste do Brasil, atualizando, a partir da expansão da base de dados, e complementando os resultados encontrados por Sapucci et al. (2018) incluindo, além das condições de grande escala, as condições locais. Para isso, foram utilizados dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da ocorrência de geadas e de variáveis meteorológicas registradas em quatro municípios da região (Caldas, Campos de Jordão, Maria da Fé e Monte Verde), no período de maio a setembro dos anos de 2002 a 2022. Para os dias com registros de geadas, composições de diferentes campos atmosféricos foram elaboradas a partir dos dados da reanálise ERA5. Entre os municípios considerados, a cidade que mais registrou episódios de geadas foi Monte Verde-MG, com média de 19 casos por ano. Em todas as localidades, julho foi o mês com maior frequência de geadas, com média de 8 casos/mês. Os episódios de geada foram associados com: (a) temperatura do ar mínima inferior a 3° C medida ao nível da estação meteorológica, (b) ventos fracos, (c) atuação de um sistema de alta pressão, (d) anomalia negativa de temperatura em 925 hPa e (e) anomalia positiva de altura geopotencial em 500 hPa entre 06 e 09 da manhã. Essas informações são consideradas como um modelo conceitual para indicar a possibilidade de geada na região e podem ser utilizadas operacionalmente em modelos de previsão do tempo.

Palavras chaves: condições meteorológicas, previsão do tempo, ASAS.

Definition of a simplified conceptual model for predicting the occurrence of frosts in Serra da Mantiqueira

ABSTRACT

Studying and predicting the occurrence of frost is essential to avoid socioeconomic damage in regions affected by this phenomenon. In this context, the present study aims to analyze the frequency and meteorological conditions that are directly involved in the occurrence of frosts in Serra da Mantiqueira, located in the southeast region of Brazil. For this, data made available by the National Institute of Meteorology (INMET) on the occurrence of frost and meteorological variables recorded in four municipalities in the region from May to September from 2002 to 2022 were used. For days with frost records, compositions of different atmospheric fields were generated from the ERA5 reanalysis data. Among the municipalities considered, the city that recorded the most episodes of frost was Monte Verde-MG, with an average of 19 cases per year. In all locations, July was the month with the highest frequency of frosts, with an average of 8 cases/month. Frost episodes were associated with: (a) minimum air temperature below 3° C, (b) light winds, (c) action of a high pressure system, (d) negative temperature anomaly at 925 hPa, and (e) positive geopotential height anomaly at 500

hPa between 6 and 9 am. Therefore, a conceptual model was proposed to indicate the possibility of frost in the region based on the results of operational weather forecast models.

Keywords: weather conditions, weather forecast, SASA.

Introdução

Na região sul do Estado de Minas Gerais (SMG), em particular na Serra da Mantiqueira, a agricultura tem um papel fundamental no desenvolvimento regional, atendendo tanto à demanda local quanto nacional por alimentos e matérias-primas. Destacam-se na região os cultivos de milho, laranja, batata e, principalmente, café (Ronquim et al., 2023). Segundo o primeiro levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), Minas Gerais se consolidou como o principal Estado produtor de café do Brasil.

Dados do Centro do Comércio de Café do Estado de Minas Gerais (CCCMG, 2024) indicam que cerca de 30% de toda a produção nacional de café tem origem no SMG. Esse protagonismo econômico é favorecido por características locais ideais para o cultivo do grão, como clima, topografia e características do solo (Araújo et al., 2023a; Carvalho Júnior et al., 2024).

As altitudes do SMG, especialmente na Serra da Mantiqueira, também favorecem a ocorrência de geadas no período de inverno, principalmente, nos meses de junho e julho (Alves et al., 2024; Guimarães et al., 2021; Sapucci et al., 2018), quando são registradas as menores temperaturas na região. De acordo com Vizcarrondo e Janzen (2023), a produção de café arábica, que prospera em altitudes elevadas, por exemplo, pode ser mais vulnerável à ocorrência de geadas, especialmente quando as plantas já estão debilitadas por períodos de estiagem, os quais têm sido mais frequentes no Sudeste do Brasil e tendem a se intensificar no clima futuro (Carvalho Júnior et al., 2024; Silva et al., 2022; Tavares et al., 2018).

Vale ressaltar que a geada é um fenômeno meteorológico e ocorre quando a temperatura do ar atinge ou fica abaixo de 0° C, levando à formação de gelo sobre superfícies expostas ao ar livre, como consequência da sublimação do vapor de água (Ahrens & Henson, 2020). Se a umidade do ar for baixa, a água pode congelar no interior das plantas. As geadas podem ocorrer devido à advecção do ar

frio, por perda radiativa ou pela combinação de ambas (Ahrens & Henson, 2020). No primeiro caso, a geada se forma em decorrência de uma massa de ar com temperaturas muito baixas que é advectada para uma determinada região, e no segundo caso, quando há um intenso resfriamento radiativo da superfície em noites de céu limpo, sem vento e sob a influência de sistema de alta pressão (Ahrens & Henson, 2020). Também é possível classificar a geada com base no seu aspecto visual, como geada branca e geada negra.

Na geada branca, existe a formação de cristais de gelo sobre as superfícies (Pereira et al., 2015), enquanto no caso da geada negra, devido à baixa umidade do ar, a água congela no interior das plantas (Ahrens & Henson, 2020; Snyder et al., 2005), causando danos às culturas (Ahrens & Henson, 2020; Melo-Abreu et al., 2016; Mittelman et al., 2013).

A ocorrência de geadas na Serra da Mantiqueira é resultado de diversos fatores. Alvares et al. (2018) indicaram que as áreas da Serra da Mantiqueira com altitudes superiores a 1500 m são as que apresentam o maior número de geadas no país, resultado da combinação da topografia peculiar da região com a influência de sistemas frontais e anticiclones. Silva et al. (2014) e Sapucci et al. (2018), por exemplo, observaram que as geadas nesta região são influenciadas pela perda radiativa durante a noite em decorrência da ausência de nuvens, associada à atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Os autores evidenciaram que, apesar de menos frequentes, a presença de anticiclones pós-frontais resultantes da invasão de ar polar também pode levar à ocorrência de geadas.

De acordo com relatório da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, em 2021, aproximadamente 30% das áreas de cultivo do SMG foram afetadas por geadas (G1, 2021). Nessas áreas, 70% da produção foi perdida pela queima dos cultivos devido ao gelo na superfície das plantas. Cerca de 7 milhões de sacas foram comprometidas, tornando 2021 o pior ano em termos de prejuízo econômico na região desde

1994. Como consequência disso, houve uma redução na produção do café, o que, por sua vez, resultou em um aumento expressivo dos preços finais do produto (EMATER, 2021).

Apesar de ser um fenômeno comum, ainda são escassos na literatura os estudos voltados para a previsão de geadas para a região da Serra da Mantiqueira. Por exemplo, a fim de avaliar o desempenho do modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) na simulação das variáveis meteorológicas predominantes em casos de geada na cidade Maria da Fé, situada no sul de Minas Gerais, Pereira et al. (2015) observaram que embora o modelo tenha um bom desempenho em simular o comportamento da temperatura do ar a 2 m, a representação da temperatura mínima, variável fundamental no processo de formação de geada, apresentou resultados subestimados, o que pode ser atribuído à dificuldade do modelo em reproduzir adequadamente a orografia local.

Por outro lado, Sapucci et al. (2018) definiram, a partir de um modelo conceitual, as condições propícias para a formação de geadas registradas nesta região, entre 2009 e 2014, associadas com as condições de grande escala como a presença de uma crista no centro-sul do Brasil, queda de mais de 2° C na temperatura do ar e aumento de 1,5 hPa na pressão ao nível médio do mar. O modelo conceitual proposto foi desenvolvido para auxiliar a previsão de geadas na região. Contudo, são necessárias atualizações com a consideração de mais eventos de geadas e com a adição da avaliação de condições locais geralmente registradas em diferentes pontos da região.

Nesse contexto, considerando a relevância da realização de previsões de geada para o alerta da população, crescimento econômico local, planejamento e gerenciamento eficiente de recursos, e, acima de tudo, para a proteção da agricultura, o objetivo geral deste estudo é desenvolver um modelo conceitual para a previsão de geada na região da Serra da Mantiqueira, atualizando, a partir da expansão da base de dados, e complementando os resultados encontrados por Sapucci et al. (2018) incluindo, além das condições de grande escala, as condições locais registradas na região.

Metodologia

Descrição da área de estudo

A Serra da Mantiqueira é um conjunto de montanhas de aproximadamente 500 km de extensão e altitudes que variam entre 1000 e quase 3000 metros e que está localizada ao longo da divisa dos Estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro, com sua maior porção na faixa sul de Minas Gerais - SMG (Pelissari & Riumanic Neto, 2013). A mesorregião do SMG é composta por 154 municípios divididos em seis microrregiões, que são: Alfenas, Itajubá, Passos, Poços de Caldas, Pouso Alegre e Varginha (IBGE, 2022). Nessa região, a economia é altamente agrícola, marcada pela presença do agronegócio, mas também das indústrias e do comércio, destacando-se os setores metalúrgicos e automotivos. Acrescentado a isso, a região possui alto potencial turístico, agregando ainda mais a economia local (IBGE, 2015).

Segundo o estudo de Martins et al. (2018), na região SMG, predominam três tipos de clima, os quais são determinados pelos indicadores do sistema de classificação climática de Köppen-Geiger: Aw (tropical), Cwa e Cwb (temperado quente). Em consequência, o SMG pode ser caracterizado por: (a) verões chuvosos e úmidos, típicos do Sistema de Monções da América do Sul (Freitas et al., 2024) e (b) invernos secos. Os verões registram, em geral, temperaturas mínimas em torno de 18° C, máximas de 28° C e precipitação acumulada em torno de 900 mm; enquanto os invernos registram temperatura mínima de 11° C, máxima de 25° C e precipitação acumulada de 500 mm (Reboita et al., 2015a; Nogueira et al., 2024).

Os episódios mais frios na região estão associados à passagem de frentes frias (Capucin et al., 2022; Reboita et al., 2015b; Reboita et al., 2016; Silva et al., 2014) e também ao predomínio do ASAS, que permite a perda radiativa noturna causando temperaturas muito baixas ao amanhecer (Sapucci et al., 2018).

Dados

Para a análise da ocorrência de geadas na Serra da Mantiqueira, foram selecionados quatro municípios onde há estações meteorológicas do

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET): Caldas, Maria da Fé e Monte Verde, em Minas Gerais, e Campos do Jordão, no Estado de São Paulo (Figura 1). A escolha das cidades deu-se devido à disponibilidade de dados e também ao fato de que Caldas, Campos do Jordão, Maria da Fé e Monte Verde são as únicas localizadas na Serra da Mantiqueira que apresentam ocorrência

significativa e sistemática de geadas ao longo dos anos, conforme registros do INMET e análises de Sapucci et al. (2018).

Os registros da ocorrência de geada por dia, no período de 2002 a 2022, nos locais selecionados, foram obtidos a partir do <https://portal.inmet.gov.br/paginas/geadas>.

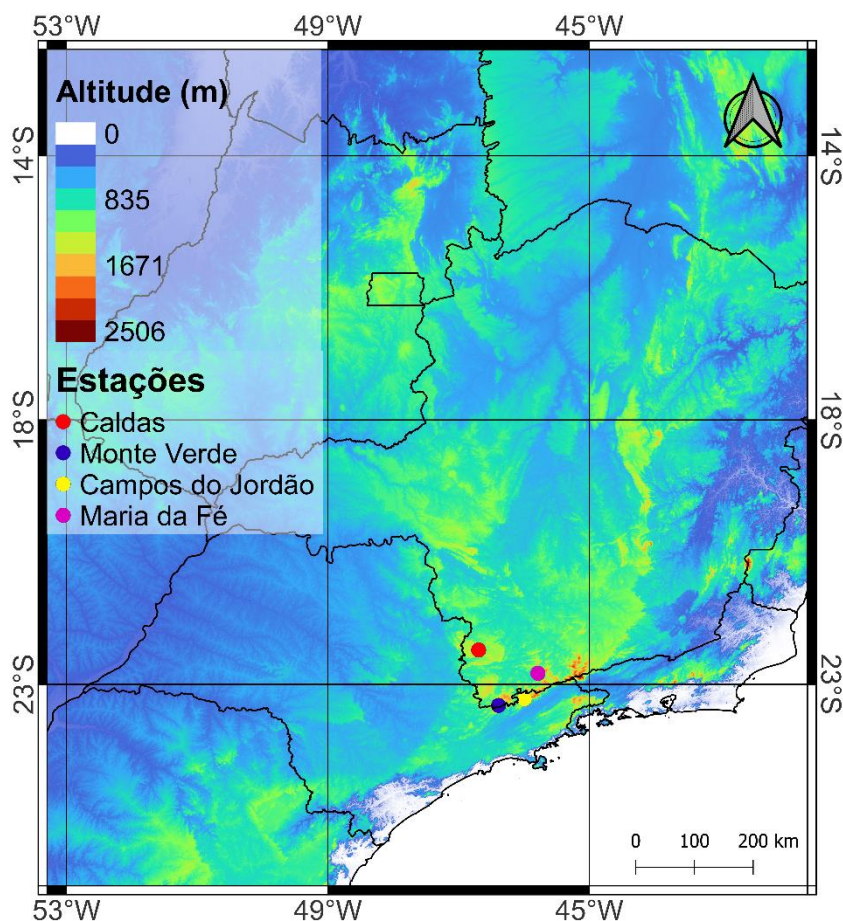


Figura 1. Topografia da região da Serra da Mantiqueira com as cidades de estudo representadas pelos pontos.

A partir do Banco de Dados Meteorológicos do INMET (BDMET; <https://bdmep.inmet.gov.br/>) foram obtidos os dados horários de temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (UR , %), velocidade (m/s) e direção dos ventos ($^{\circ}$) das estações meteorológicas dos municípios em estudo. Os dados utilizados consideraram o intervalo de maio a setembro do período de 2002 a 2022 (Tabela 1).

A análise da qualidade dos dados foi realizada para a identificação e eliminação de

valores espúrios de acordo com as normas da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1986). O intervalo de maio a setembro foi o escolhido para estudo, uma vez que os resultados obtidos por Sapucci et al. (2018) indicam este como o período de ocorrência de geadas na região. Ressalta-se, também, que neste período são registradas condições favoráveis e essenciais para a formação da geada, como baixa temperatura, céu limpo, ventos fracos, alta pressão e baixa umidade (Rozante et al., 2020; Silva et al., 2014; Sapucci et al., 2018).

Tabela 1. Especificações das estações meteorológicas utilizadas no estudo

Nome	Código	Localização	Altitude (m)	Data de instalação
Caldas, MG	A530	21,9180°S 46,3829°O	1077,34	27/11/2006
Campos do Jordão, SP	A706	22,7502°S 45,6038°O	1662,95	12/03/2002
Maria da Fé, MG	A531	22,3145°S 45,3730°O	1281,43	30/11/2006
Monte Verde, MG	A509	22,8616°S 46,0433°O	1544,89	18/12/2004

Para complementar as análises das condições meteorológicas em dias de geada, foram utilizados dados de reanálise ERA5, do *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF; Hersbach et al., 2020). Os dados possuem resolução espacial horizontal de 0,25 °. Foram consideradas as seguintes variáveis: temperatura do ar em 925 hPa, pressão ao nível médio do mar, geopotencial em 500 hPa e as componentes zonal (u) e meridional (v) do vento em 925 hPa. Todos os dados foram obtidos para o período de maio a setembro dos anos de 2002 a 2022, nos horários sinóticos de 0600 e 1200 Z para a área entre 10° N, 40° L, 26° S e 56° O. A escolha desses horários para a análise deu-se uma vez que estes são mais próximos ao horário quando a temperatura mínima é registrada, isto é, entre 3 e 9 horas local.

Análises

A frequência dos registros de geada na Serra da Mantiqueira foi analisada a partir dos cálculos do total anual em cada uma das localidades consideradas e do total mensal, sendo apresentadas em gráficos do tipo *boxplot*. Os *boxplots* sintetizam algumas medidas estatísticas onde: as hastes representam os valores máximos e mínimos da série, excluindo outliers; os limites inferior e superior da caixa correspondem ao primeiro e terceiro quartis, representando 25% e

75% dos dados, respectivamente; e no centro da caixa, encontra-se a linha que representa a mediana, uma estatística de tendência central que divide o conjunto de dados em duas partes iguais e não é influenciada por outliers (Tukey, 1977).

Também foram gerados gráficos *boxplot* para a temperatura mínima e umidade relativa do ar considerando os dias com registro de geadas (Wrege et al., 2018). A partir dos dados horários das estações consideradas, os valores de temperatura mínima foram extraídos para cada um dos dias quando geadas foram registradas na região uma vez que, para a geração dos gráficos, foram considerados apenas os dados referentes ao horário quando a temperatura mínima foi registrada. Em geral, as geadas são registradas próximas ao horário quando as temperaturas mínimas são registradas.

Para analisar o comportamento de vento durante os dias com ocorrência de geada foram geradas rosas dos ventos a partir dos dados do INMET nos horários quando a temperatura mínima foi registrada. Essas representações gráficas foram geradas a partir dos dados de direção e velocidade do vento fornecidos ao software WRPLOT.

Com os dados da reanálise ERA5, foram elaboradas composições atmosféricas. Essas composições foram obtidas pela subtração dos campos médios meteorológicos dos dias de geada

em relação à climatologia. Vale ressaltar que os campos médios meteorológicos foram calculados a partir da média de cada variável durante os dias de geada, considerando os dados das 0600 e 1200 Z, separadamente. A escolha desses horários deu-se uma vez que estes são os horários sinóticos mais próximos de quando as temperaturas mínimas são registradas. A climatologia, por sua vez, foi calculada com base na média de todos os dias dos meses de maio a setembro, entre 2002 e 2022, nos mesmos horários de 0600 e 1200 Z.

A partir de todos os resultados obtidos a partir das análises neste estudo, foi proposto um modelo conceitual a ser utilizado para a previsão da ocorrência de geadas na região de interesse.

Resultados e discussão

Frequência dos eventos de geada

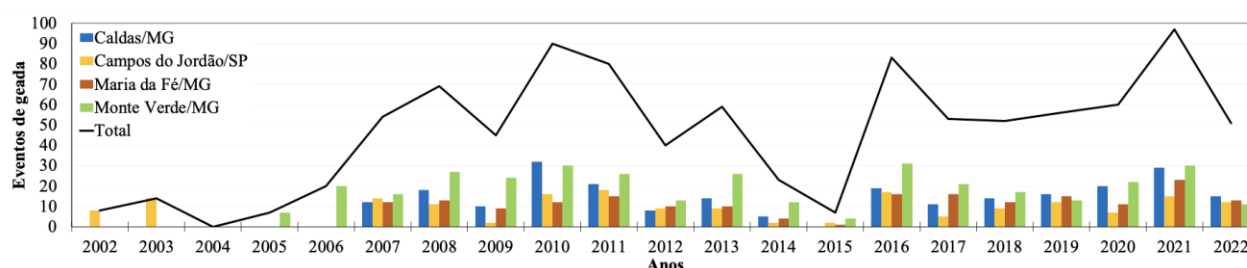


Figura 2: Número de casos de geadas registradas nos municípios de Caldas, Maria da Fé, Monte Verde e Campos do Jordão entre os anos de 2002 e 2022.

Embora Campos do Jordão possua a maior altitude entre as cidades selecionadas, é interessante notar que Monte Verde apresentou a maior quantidade de registros, totalizando 350 casos (Figura 2). Essa diferença pode estar relacionada a fatores como a vegetação, cobertura do solo e até mesmo a localização geográfica da cidade, já que a mesma está situada em um vale cercado por montanhas, o que pode influenciar as condições de formação da geada (Meireles et al., 2014).

A análise da cobertura do solo na região onde as estações estão localizadas revela que a estação Campos do Jordão está localizada em uma área urbana cercada por região de floresta, enquanto a de Monte Verde está em região de floresta com forte presença de atividades

Entre os anos de 2002 e 2022, foram registrados 968 casos de geada considerando os municípios de Caldas, Campos do Jordão, Maria da Fé e Monte Verde (Figura 2). Nesse período, os anos que se destacaram foram 2010 e 2021, com 90 e 97 casos registrados, respectivamente.

De acordo com o Boletim de Monitoramento e Análise Climática publicado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC (2010), em junho de 2010, seis massas de ar frio adentraram o território brasileiro, algumas delas passando pela região Sudeste e resultando em baixas temperaturas. Essas condições climáticas propiciaram a formação da geada, o que pode explicar o grande número de registros de geada naquele ano. Além disso, Monte Verde foi a cidade que teve mais registros de geadas no período analisado, causando impactos na saúde, na agricultura e no turismo local.

agropecuárias (Figura 3). Vale ressaltar também que a detecção da geada se baseia totalmente em observação visual, o que pode introduzir elementos subjetivos e até mesmo erros por parte dos observadores.

Em relação ao comportamento médio mensal, a Figura 4 revela que os eventos de geada têm uma maior incidência nos meses de junho e julho. Em junho, a média é de cinco (5) casos por mês, enquanto em julho, a média chega a aproximadamente oito (8) casos por mês. Notavelmente, julho registrou um valor máximo de 27 casos no mês, sendo este um número significativo de ocorrências. Esses resultados estão de acordo com os apresentados por Sapucci et al. (2018), os quais também apontam para uma frequência maior de ocorrência de geada durante os meses de junho e julho.

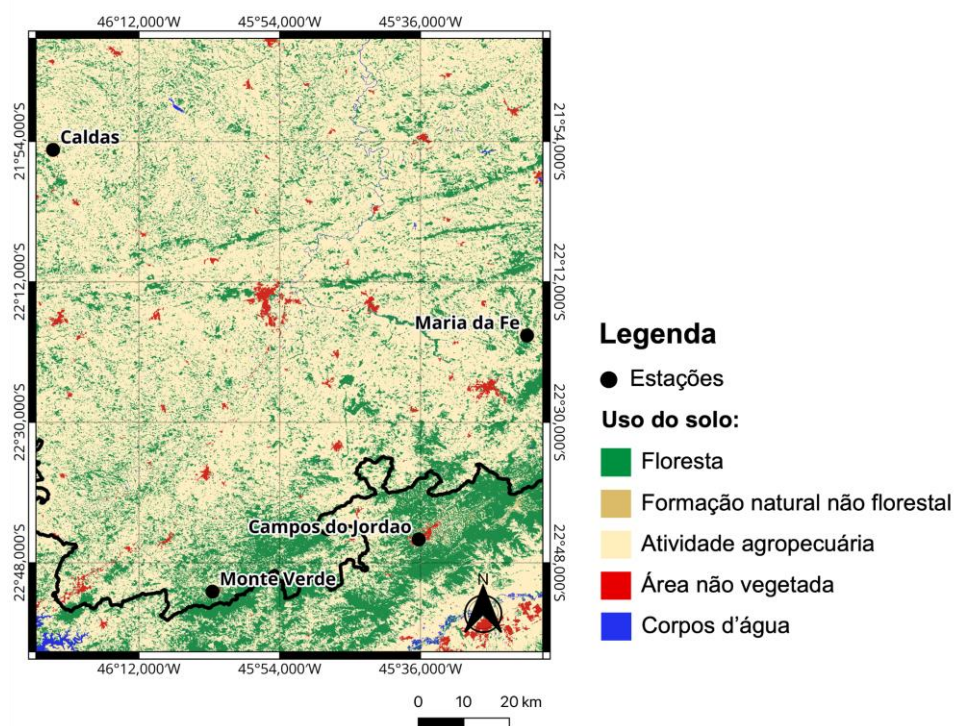


Figura 3: Mapa de uso e ocupação do solo no Sul de Minas Gerais, com a localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo. A base de dados de uso e cobertura do solo foi obtida a partir do projeto MapBiomas, disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/downloads/>.

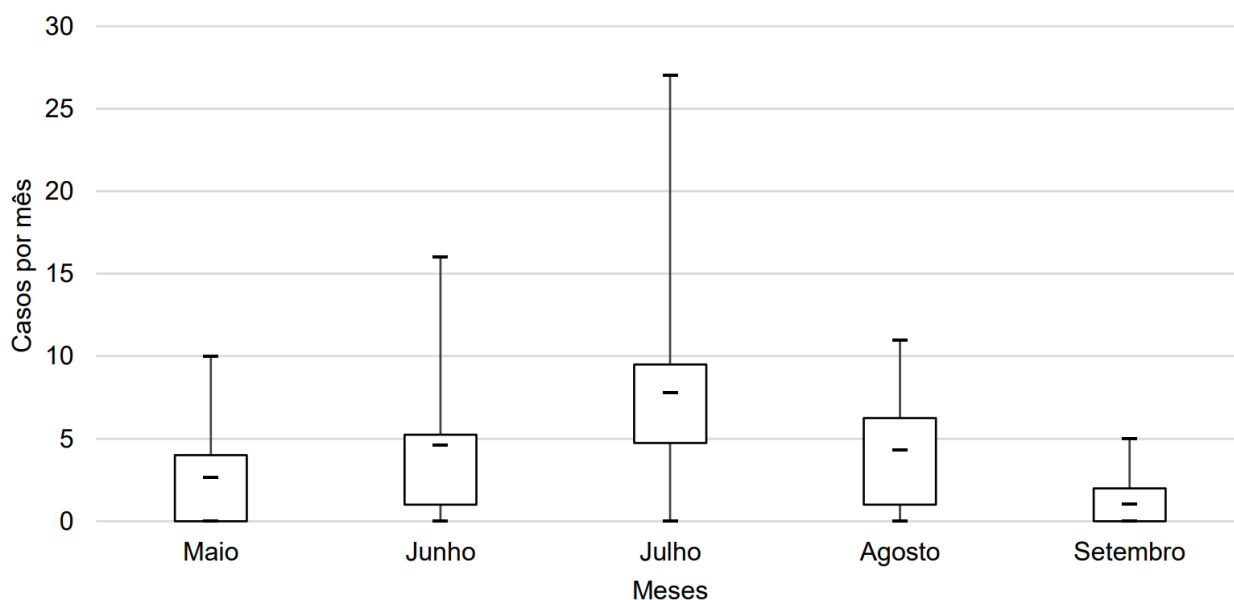


Figura 4. Casos mensais da ocorrência de geada nas quatro cidades estudadas e no período de 2002 a 2022.

Condições meteorológicas locais

Os dados meteorológicos, registrados em dia com ocorrência de geadas em cada município, indicam, de forma geral, que o menor valor de temperatura mínima registrado em todas as cidades consideradas esteve abaixo ou próximo de 0° C. O horário quando as temperaturas mínimas foram registradas nesses dias variou entre 6 e 7 da manhã. Notavelmente, o ano de 2021 se destacou como o período com as temperaturas mínimas mais baixas, sendo registrado -5,0° C em Maria da Fé (Figura 5c), seguido de -4,5° C em Monte Verde (Figura 5d) e -4,4° C em Caldas (Figura 5a). Por outro lado, em Campos do Jordão, a menor temperatura registrada foi em 2011, atingindo -3,3° C (Figura 5b).

Em relação ao maior valor da temperatura mínima em dias de geada foi possível verificar uma variação mais significativa. Os registros foram de 0,8° C em 2017, 1,9° C em 2014, 0,4° C em 2013 e 0,8° C em 2015, para as cidades de Caldas, Campos do Jordão, Maria da Fé e Monte Verde, respectivamente.

Além disso, destaca-se que o valor máximo da temperatura mínima variou entre 1,9° C e 3,0° C. Considerando as médias da temperatura mínima, é possível notar que os valores estão sempre próximos de 1,0° C, não sendo maiores que 2,0° C e nem menores que 0,0° C. Dessa forma, verifica-se um padrão onde a temperatura mínima nos dias de geada nessas localidades não registra valores superiores a 3,0° C.

Embora na introdução tenha sido mencionado que para a ocorrência de geadas seja

necessária temperatura de 0° C ou menor, as temperaturas indicadas aqui são medidas ao nível da estação (2 m de altura), o que significa que na superfície o valor é mais baixo uma vez que existe uma diferença em relação à temperatura medida no abrigo meteorológico e à temperatura de relva, que é registrada na superfície do solo e determina a formação da geada. Essa variação depende das condições atmosféricas locais e da topografia e cobertura do solo, com uma diferença maior em noites de céu claro, pouco vento e baixa umidade do ar, fatores que propiciam a inversão térmica (Ferreira et al., 2006).

Por exemplo, em um estudo realizado em dez localidades de São Paulo, verificou-se que a diferença média de temperatura a 2 m e a temperatura de relva oscilou em 4,1° C (Sentelhas et al., 1995), enquanto no Paraná, considerando oito regiões do estado, a diferença foi de 5° C (Vieira Junior et al., 2018). Vale destacar também que Sanches et al. (2023), a partir de um estudo por sensoriamento remoto, destacou que a temperatura da superfície é menor em regiões menos urbanizadas com maior presença de vegetação, como é o caso do SMG, em especial da estação de Monte Verde, e/ou de corpos d'água.

Ressalta-se então que a escolha do limiar de 3°C para a temperatura mínima do ar registrada no abrigo meteorológico (2 m) como indicativo de geada baseia-se na literatura que aponta para uma diferença significativa entre essa medida e a temperatura de relva (Nascimento et al., 2022; Adão et al., 2023). Dessa forma, mesmo com valores acima de 0°C no abrigo, pode haver formação de geada ao nível do solo.

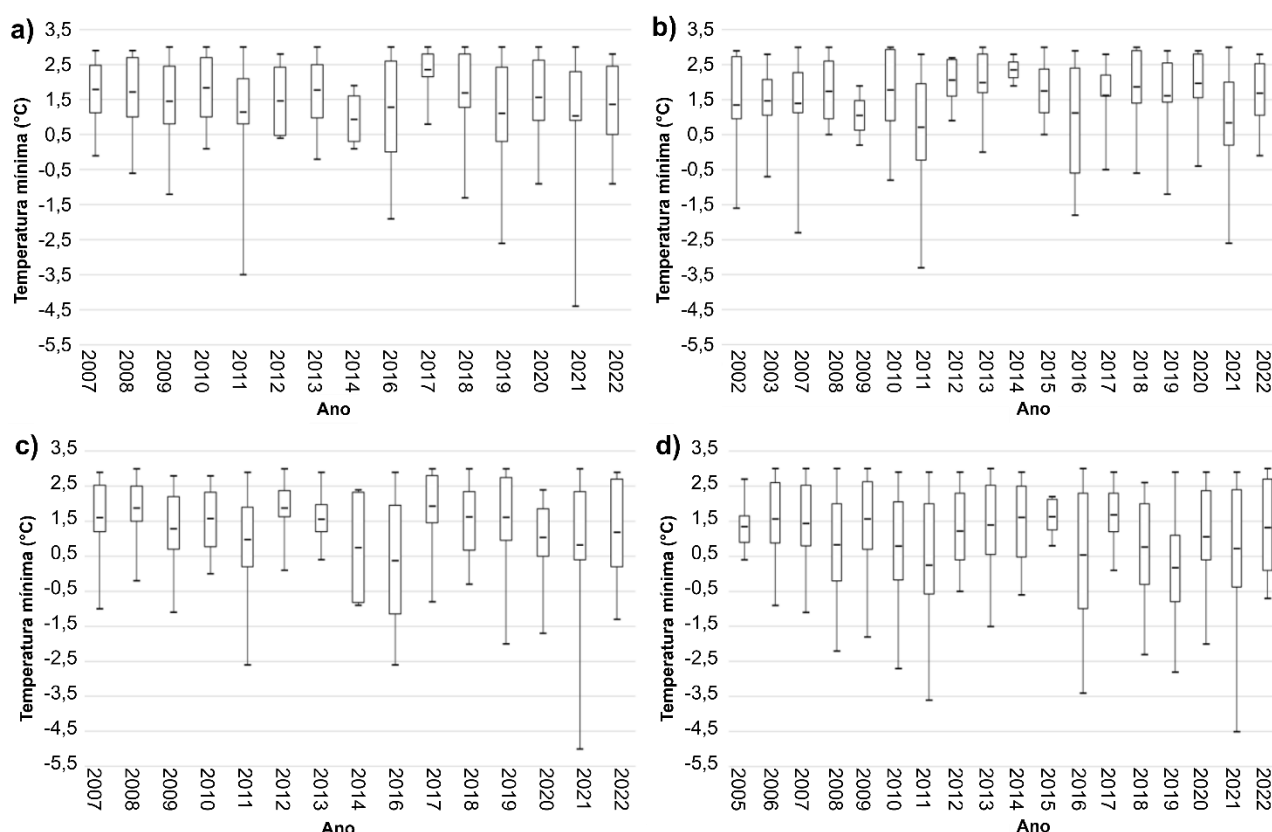


Figura 5. Boxplot da temperatura mínima: a) Caldas; b) Campos do Jordão; c) Maria da Fé; e d) Monte Verde.

A umidade relativa também desempenha um papel crucial, uma vez que é um fator determinante sobre o tipo de geada a ser formada. Por exemplo, a geada branca tende a ocorrer em condições de alta umidade enquanto a geada negra é mais comum em ambiente de baixa umidade relativa (HIGA et al., 1995). Na região de Caldas, foi observada uma predominância de valores de umidade acima de 87%, com uma média em torno

de 99% (Figura 6a). Em Maria da Fé, dentre 192 ocorrências analisadas, apenas dois casos registraram umidade relativa próxima aos 80% (Figura 6c), enquanto os demais dias registraram valores acima de 90%. Ao examinar Campos do Jordão e Monte Verde, nota-se que registros de umidade acima de 80% são predominantes, mas ainda há alguns casos com valores mais baixos, próximos a 50% (Figura 6b, 6d).

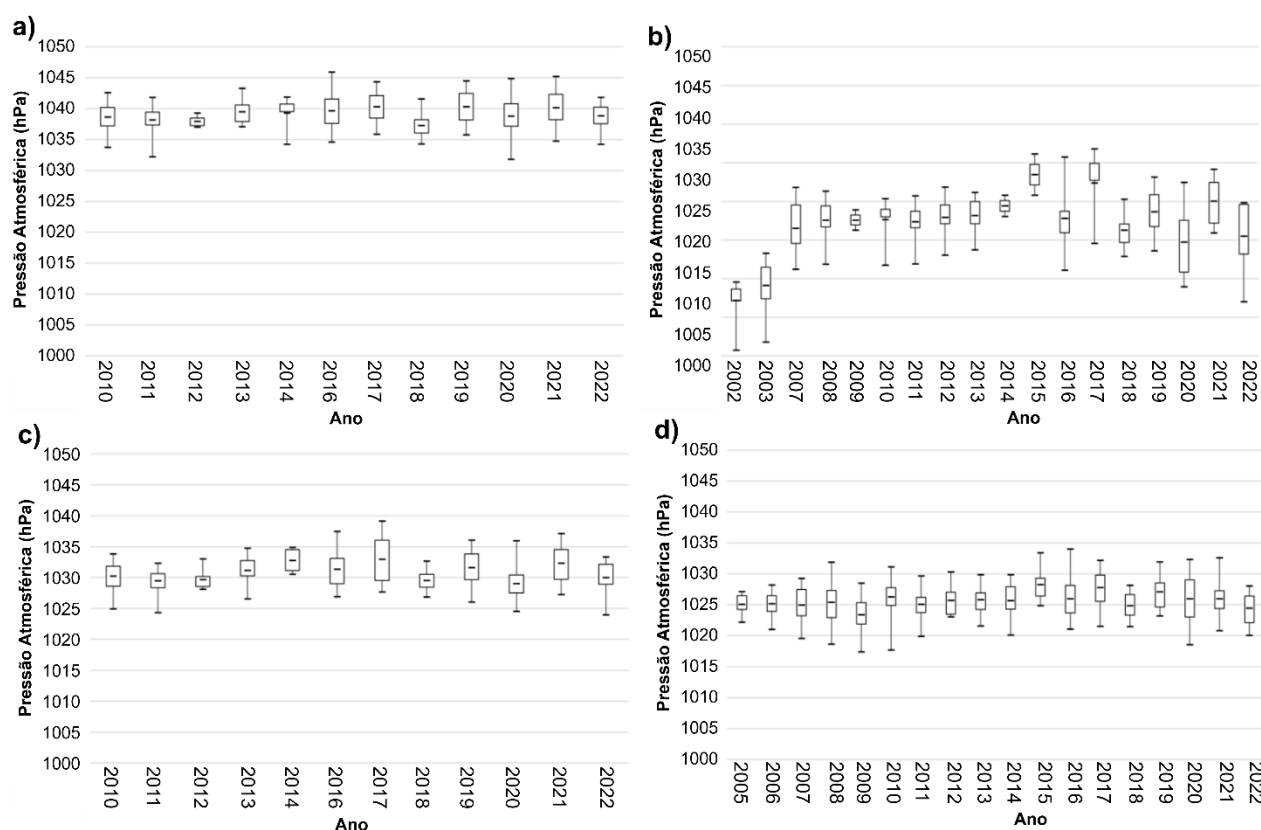


Figura 6. Boxplot da umidade relativa: a) Caldas; b) Campos do Jordão; c) Maria da Fé; e d) Monte Verde.

Ao se analisar as condições do vento predominantes em dias de ocorrência de geadas, pode-se notar que em todas as cidades predominam valores de velocidade do vento inferiores a 2,1 m/s. É importante destacar que, independentemente da localidade, a frequência de ocorrência diminui quando as velocidades ultrapassam 2,1 m/s. Em Caldas e Maria da Fé, por exemplo, foram registradas condições de calmaria, ou seja, ventos abaixo de 1 m/s, em 97,14% e 98,96% das ocorrências, respectivamente (Figura 7a, 7c), e que em ambas as cidades não foram verificadas ocorrências de geadas em condições de vento acima de 2,1 m/s. Para Campos do Jordão e Monte Verde também observam-se predominância de ventos abaixo de 2,1 m/s, contudo, ventos mais intensos também são registrados em dias de geada (Figura 7b, 7d).

Em relação a direção do vento, que desempenha um papel relevante na advecção de ar frio, é possível verificar nas regiões de Campos do

Jordão e Monte Verde predominância de ventos dos quadrantes noroeste e nordeste (Figura 7b, 5d), direções que em geral estão associadas com a atuação do ASAS na região. Em Maria da Fé são observados ventos predominantes de sudeste e noroeste (Figura 7c) enquanto em Caldas prevalecem ventos oriundos do quadrante sul (Figura 7a).

Ventos de sul e sudeste podem estar associados com a atuação da alta pós-frontal, o que pode contribuir para a advecção de ar frio para a região. Isso corrobora os resultados obtidos por Sapucci et al. (2018), que revelaram que o ASAS exerce influência na direção dos ventos, favorecendo a predominância de ventos provenientes de norte durante sua atuação e que a presença de anticiclones pós-frontais também pode influenciar na direção dos ventos, resultando, neste cenário, em ventos predominantemente do quadrante sul.

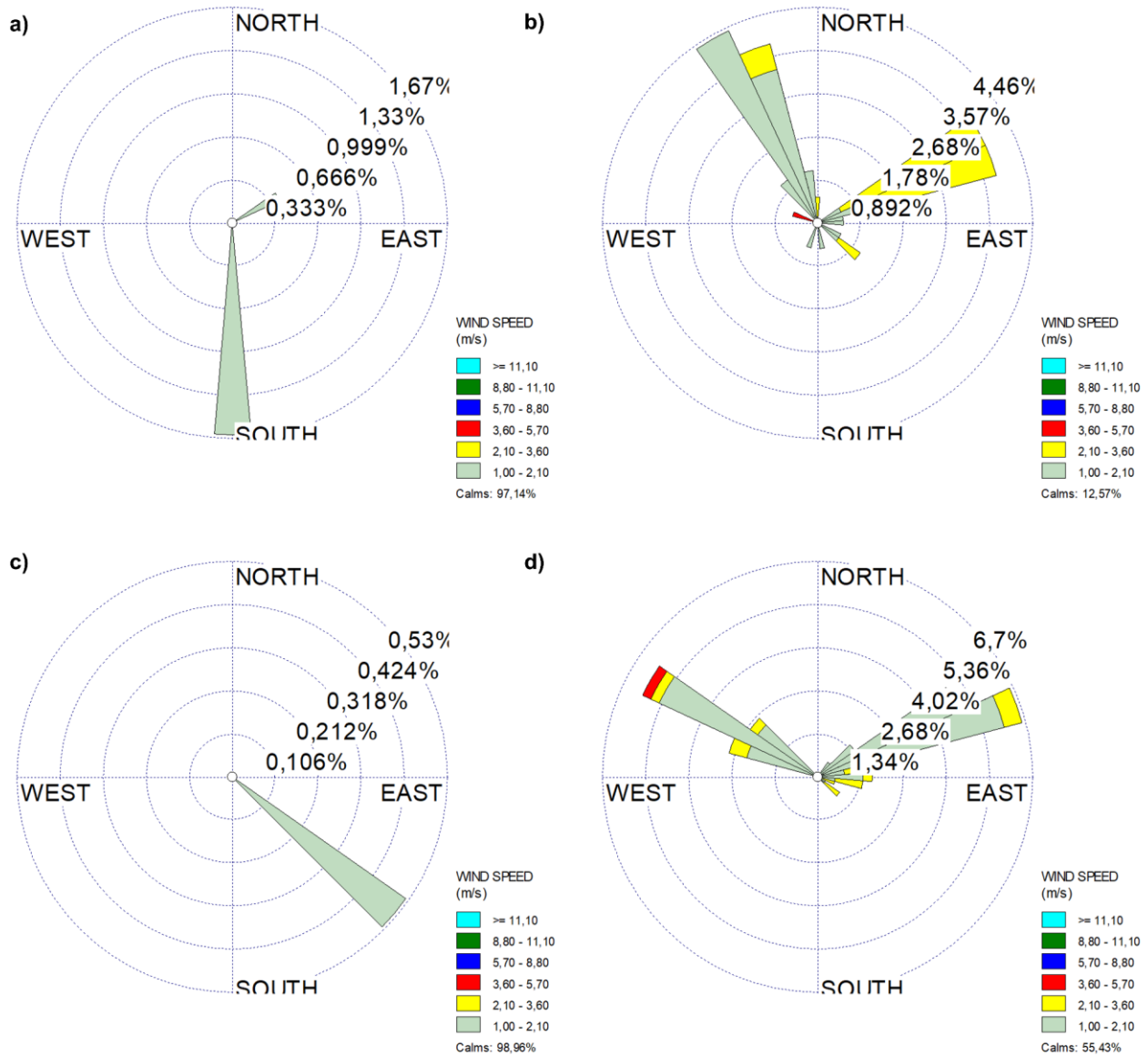


Figura 7. Rosa dos ventos da velocidade e direção predominante do vento para as cidades: a) Caldas; b) Campos do Jordão; c) Maria da Fé; e d) Monte Verde considerando apenas dados em dia com geadas registrados entre maio e setembro de 2002 a 2022.

Análise das condições de escala sinótica

A anomalia de temperatura do ar em 925 hPa foi obtida através da diferença entre o campo médio dessa variável em dia com ocorrência de geadas e a média de todo o período de estudo, considerando dados de maio a setembro entre 2002 e 2022 para os horários sinóticos de 0600 Z (Figura

8a) e 1200 Z (Figura 8b). Os resultados encontrados evidenciam a presença de uma anomalia negativa na região de Serra da Mantiqueira com valores abaixo de $-3,0^{\circ}\text{C}$ no horário das 1200 Z (9 horas local) e abaixo de $-2,5^{\circ}\text{C}$ às 0600 Z (3 horas local), sugerindo um período de resfriamento acentuado em comparação com as condições médias observadas no período na região.

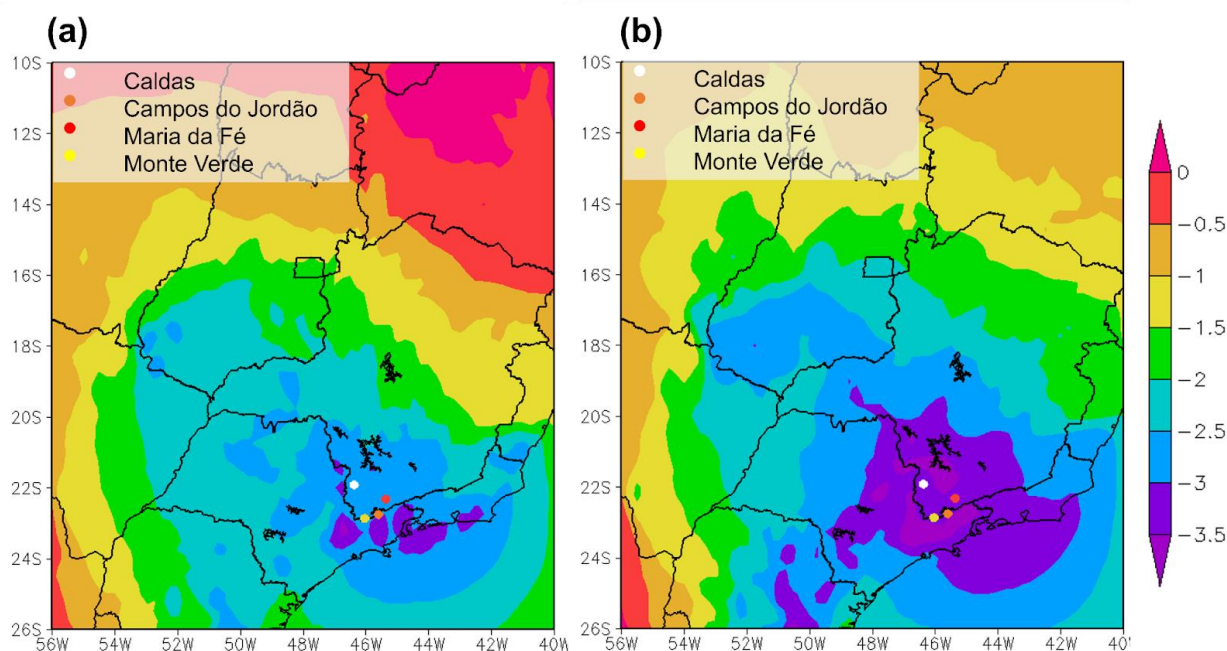


Figura 8. Anomalia de temperatura do ar (°C) em 925 hPa para os horários sinóticos das 0600 Z (a) e 1200 Z (b).

A anomalia de PNMM (hPa) e da altura geopotencial calculada a partir da diferença dos campos médios de PNMM e altura geopotencial, considerando apenas dias com geada e considerando a climatologia do período, para os horários sinóticos de 0600 Z e 1200 Z pode ser observada na Figura 9. Sobre a região sudeste e o oceano Atlântico predominam anomalias positivas de pressão e da altura geopotencial, o que é um indicativo da atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), também confirmado a partir da composição dos campos médios de

PNMM e vento em 925 hPa (ver Figura 10). Durante o inverno do Hemisfério Sul, o ASAS tende a se expandir para oeste, influenciando a região sudeste do Brasil (Reboita et al., 2012; Santos et al., 2016). Por ser um sistema de alta pressão, o ASAS contribui para condições climáticas estáveis e dias sem nuvens, favorecendo o resfriamento da superfície durante a noite, levando a uma redução significativa na temperatura mínima e criando condições ideais para a formação da geada (Reboita et al., 2015b; Santos et al., 2016; Sapucci et al., 2018; Silva et al., 2014).

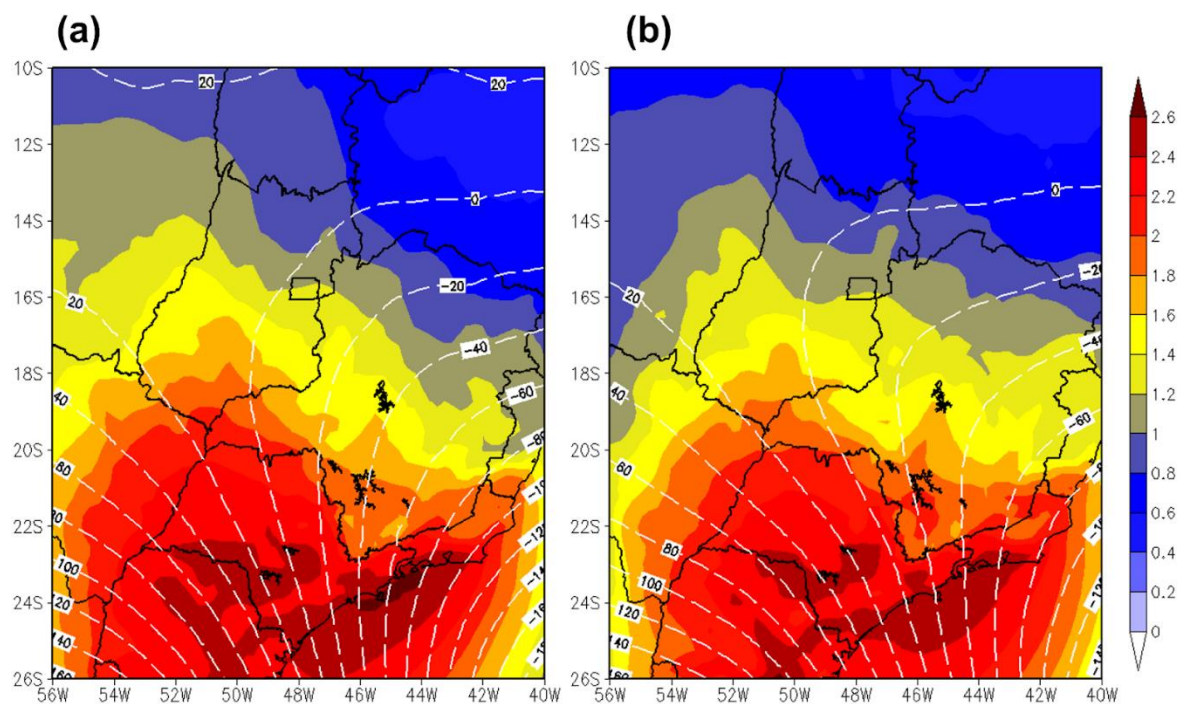


Figura 9. Anomalia de pressão ao nível do mar (hPa) em colorido e anomalia de altura geopotencial (m) em tracejado branco para às 0600 Z (a) e às 1200 Z (b).

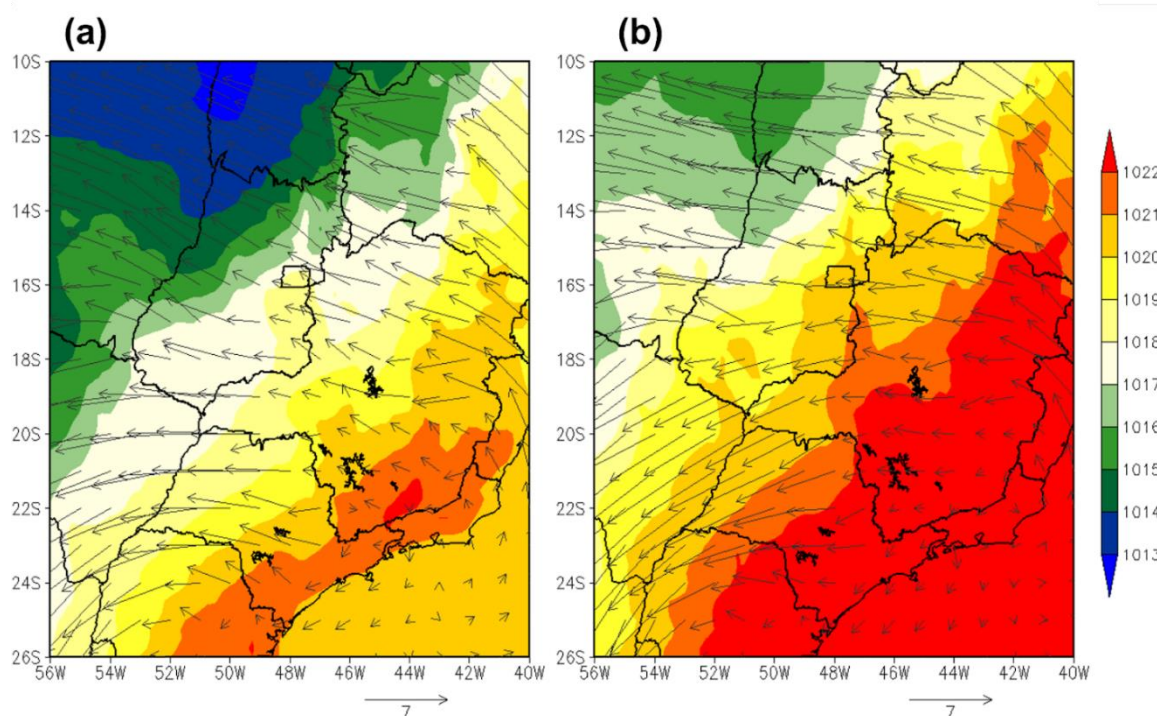


Figura 10. Composição de média de pressão ao nível do mar (hPa) em colorido e direção e velocidade do vento em 925 hPa (m/s) em vetores para às 0600 Z (a) e às 1200 Z (b) em dias com ocorrência de geada.

As características descritas nesta seção indicam o padrão atmosférico mais frequentemente associado às geadas na região de estudo. Isso não significa que outros não ocorram, porém, são menos frequentes. A presença de cristas e cavados em níveis médios sobre o Brasil e a incursão de massas de ar polar e ondas de frio, padrões não observados por este estudo, podem favorecer ou intensificar a ocorrência de geadas no SMG (Algarve, 1996; Capucin et al., 2022). Contudo, a presença de anomalia negativa de temperatura e a anomalia positiva de PNMM e da altura geopotencial em 500 hPa na região também foram constatadas nos resultados de Sapucci et al. (2018), confirmando assim que este padrão de grande escala influencia a formação da geada na região.

Modelo conceitual para a previsão de geadas

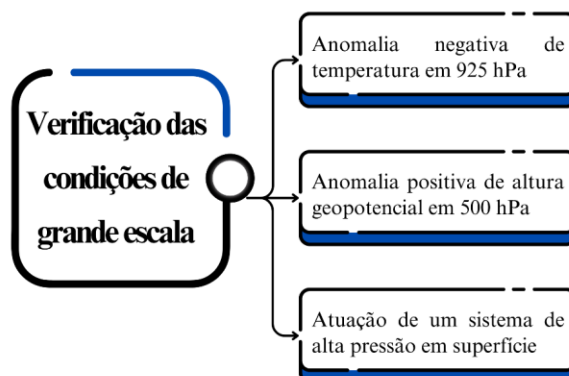
A partir dos resultados obtidos nas seções sobre as condições meteorológicas locais e de análise das condições de escala sinótica, foi possível desenvolver um modelo conceitual indicativo das condições atmosféricas predominantes em episódios de geada ilustrado como um fluxograma na Figura 11. Destaca-se que o modelo conceitual pode auxiliar o previsor de tempo na emissão de alertas sobre o potencial de ocorrência de geadas na região uma vez que este pode, a partir das saídas dos modelos de previsão numérica de tempo (PNT), verificar se as condições indicadas no modelo conceitual, (Figura 11) estão sendo previstas. Em outras palavras, o modelo conceitual pode ser utilizado pelos previsores como um *checklist*. Uma vez que o

modelo de PNT preveja a ocorrência das condições de escala sinótica e local indicadas no modelo conceitual, o previsor poderá alertar a população e os órgãos responsáveis sobre a possibilidade da ocorrência de geada na região por um determinado dia.

Embora o modelo conceitual proposto representa, de forma simplificada, as principais condições atmosféricas observadas durante episódios de geada na Serra da Mantiqueira, ele apresenta algumas limitações que devem ser consideradas. O modelo baseia-se em médias compostas e não contempla todos os padrões sinóticos que podem gerar geadas, como a atuação de cavados em níveis médios, incursões intensas de massas polares e a influência de ondas de frio de origem extratropical. Além disso, aspectos como a variabilidade interanual (e.g., eventos de El Niño ou La Niña), uso e cobertura do solo, e microclimas locais não foram incorporados de forma quantitativa no modelo.

Vale destacar também que o modelo conceitual, apesar de representar padrões recorrentes, ainda não foi testado quanto à sua capacidade preditiva. Sua aplicação como ferramenta de apoio ao prognóstico depende de validações futuras a partir das saídas de modelos numéricos de previsão do tempo, como as produzidas pelo WRF, utilizado operacionalmente no Centro de Estudos e Previsão de Tempo e Clima de Minas Gerais - CEPremG como descrito por Garcia et al. (2023) e Araújo et al. (2023b).

a)



b)

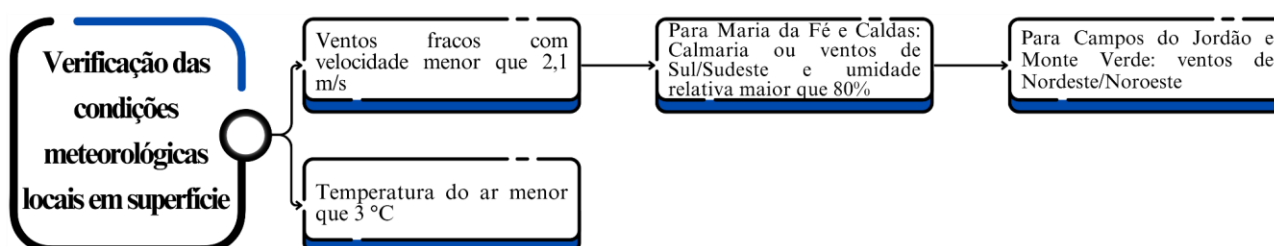


Figura 11. Fluxograma representando os requisitos para a verificação de: a) condições de grande escala e b) condições meteorológicas locais em superfície. UR é umidade relativa.

Conclusões

Após investigar a frequência da ocorrência de geadas nas cidades Caldas-MG, Campos do Jordão-SP, Maria da Fé-MG e Monte Verde-MG, localizadas na Serra da Mantiqueira, entre os anos de 2002 e 2022, constatou-se que a cidade com maior número de ocorrências de geadas nesse período foi Monte Verde, com média de 19 casos por ano. Considerando os totais anuais de todas as cidades, 2021 foi o ano com maior número de registros, com destaque para o mês de julho, com média de 8 casos/mês e máxima de 27 casos/mês.

Os resultados encontrados revelam que a formação de geadas no SMG requer a atuação de um sistema de alta pressão no sudeste do Brasil e que a anomalia seja negativa para a temperatura em 925 hPa e positiva para a altura geopotencial em 500 hPa. Além disso, em superfície, é necessário que os ventos sejam fracos ou estejam em calmaria,

enquanto a temperatura do ar deve ser menor que 3° C.

Conhecidos os padrões médios das variáveis atmosféricas, definiu-se um modelo conceitual que pode ser aplicado nas saídas dos modelos numéricos de previsão de tempo. O modelo conceitual pode ser aplicado como um *checklist*, ou seja, caso as condições indicadas neste sejam verificadas nas saídas dos modelos de PNT para um determinado dia futuro, pode-se indicar a possibilidade de ocorrência de geadas na região. Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação do método para a verificação de sua eficácia na previsão de geadas na região da Serra da Mantiqueira.

Ressalta-se que o modelo conceitual aqui proposto é uma primeira aproximação baseada em padrões médios, e sua aplicação operacional ainda demanda validações adicionais. Recomenda-se, em estudos futuros, a incorporação de outros sistemas

atmosféricos menos frequentes, bem como a avaliação do desempenho do modelo em previsões reais. Além disso, destaca-se que o uso de 3°C como limiar para a previsão de geadas reflete uma aproximação prática diante da ausência de dados contínuos de temperatura de relva, sendo recomendável, em trabalhos futuros, a utilização de sensores ao nível do solo ou produtos de sensoriamento remoto que possibilitem uma caracterização mais acurada das condições térmicas na superfície.

Referências

- Adão, F., Fraga, H., Fonseca, A., Malheiro, A. C., & Santos, J. A. (2023). The relationship between land surface temperature and air temperature in the Douro Demarcated Region, Portugal. *Remote Sensing*, 15(22), 5373. <https://doi.org/10.3390/rs15225373>
- Ahrens, C., & Henson, R. (2020). *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment* (13th ed.). Cengage Learning.
- Algarve, V. R. (1996). Geadas no Brasil. *Climanálise Especial*, 123-128. Disponível em <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/geada.html>. Acesso em 10 de maio de 2023.
- Alvares, C. A., Sentelhas, P. C., & Stape, J. L. (2018). Modeling monthly meteorological and agronomic frost days, based on minimum air temperature, in Center-Southern Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(1), 177-191. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2267-6>
- Alves, L. Q., da Silva, A. B., Putti, F. F., & Góes, B. C. (2024). Danos na cultura do café causados pelas geadas ocorridas no ano de 2021 nos municípios de Alfenas e Poços de Caldas, Brasil. *Peer Review*, 6(9), 1-15. <https://doi.org/10.53660/PRW-2117-3911>
- Araújo, M. D. R. P., da Silva, P. L., & da Rocha, A. P. S. (2023a). Cafeicultura: Evolução do café no Brasil, Minas Gerais e no município de João Pinheiro–MG. *Revista Contemporânea*, 3(11), 21683-21706. <https://doi.org/10.56083/RCV3N11-091>.
- Araújo, A. A., Garcia, D. W., Monteiro, J. R., Miguel, T. V., Campos, B., Carvalho, V. S. B., & Reboita, M. S. (2023b). Avaliação do modelo Weather Research and Forecasting (WRF) na simulação operacional de um evento de frente

Agradecimentos

Os autores agradecem às instituições que disponibilizaram os dados utilizados neste estudo, como o INMET, além da UNIFEI e às agências FAPEMIG, CAPES e ao CNPq.

- fria no sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(2), 805–817. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.2.p805-817>
- Capucin, B. C., Rehbein, A., Reboita, M. S., Lucyrio, V., & Escobar, G. C. J. (2022). Análise sinótica e de grande escala de ondas de frio extremas no Sudeste do Brasil no século XX. *Anuário do Instituto de Geociências*, 45, 1-15. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2022_45_41532
- Carvalho Júnior, F. V. D., Alves, M. D. C., & Carvalho, L. G. D. (2024). Analysis of rainfall variations and coffee production areas with climate change in Minas Gerais via future scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(7), 5887–5908. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04979-7>
- CCCMG – Centro do Comércio de Café do Estado de Minas Gerais. (2024, junho 3). 'Dias de Campo' estimula novas tecnologias no desenvolvimento da cadeia de café do Sul de Minas. <https://cccmg.com.br/dias-de-campo-estimula-novas-tecnologias-no-desenvolvimento-da-cadeia-de-cafe-do-sul-de-minas/>. Acesso em 4 de junho de 2024.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. (2023, setembro 20). *Produção de café está estimada em 54,36 milhões de sacas, 3ª maior na série histórica*. <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5175-producao-de-cafe-esta-estimada-em-54-36-milhoes-de-sacas-3-maior-na-serie-historica>. Acesso em 10 de outubro de 2023.
- CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. (2010). *Climanálise: Boletim de monitoramento e análise climática*. <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/pdf/pdf10/jun10.pdf>. Acesso em 18 de setembro de 2023.

- EMATER – Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais. (2021, julho 27). *Emater-MG faz levantamento de áreas produtoras de café atingidas pela geada da última semana*. https://www.emater.mg.gov.br/portal.do/site-noticias/emater-mg-faz-levantamento-de-areas-produtoras-de-cafe-atingidas-pela-geada-da-ultima-semana/?flagweb=novosite_pagina_interna_noticia&id=25774. Acesso em 10 de maio de 2023.
- Ferreira, C. F., Fontana, C. F., & Berlato, M. A. (2006). Relação entre a temperatura mínima do ar medida no abrigo meteorológico e na relva no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 14, 53-63. <https://www.sbagro.org/files/biblioteca/3942.pdf>. Acesso em 10 de maio de 2023.
- Freitas, A. A. de, Carvalho, V. S. B., & Reboita, M. S. (2024). Extreme precipitation events during the wet season of the South America Monsoon: A historical analysis over three major Brazilian watersheds. *Climate*, 12(11), 188. <https://doi.org/10.3390/cli12110188>
- Garcia, D. W., Reboita, M. S., & Carvalho, V. S. B. (2023). Evaluation of WRF performance in simulating an extreme precipitation event over the South of Minas Gerais, Brazil. *Atmosphere*, 14(8), 1276. <https://doi.org/10.3390/atmos14081276>
- G1. (2021, julho 22). *Geadas no Sul de MG podem elevar preços do café para safra de 2022; entenda*. <https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2021/07/22/geadas-no-sul-de-mg-podem-elevar-precos-do-cafe-para-safra-de-2020-entenda.ghtml>. Acesso em 11 de maio de 2023.
- Guimarães, D., Landau, E., & Landau, E. C. (2021). *Reflectância espectral do satélite Amazonial para a estimativa de efeitos provocados por geadas na cultura do café em Minas Gerais*. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1134821/1/COT-250-EfeitoGeadas2021CafeMG.pdf>. Acesso em 15 de maio de 2023.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., & et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Higa, A. R., Garcia, C. H., & Santos, E. T. (1995). Geadas, prejuízos à atividade florestal. *Silvicultura*, 15(58), 40-43. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/287702/1/v.-16-n.-59-p.-40-43.pdf>. Acesso em 11 de maio de 2023.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2015). *Cidades e estados*. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/panorama>. Acesso em 24 de junho de 2023.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). *DTB: Divisão Territorial Brasileira*. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/divisao-regional/23701-divisao-territorial-brasileira.html>. Acesso em 11 de maio de 2023.
- Martins, F. B., Gonzaga, G., Dos Santos, D. F., & Reboita, M. S. (2018). Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: Cenário atual e projeções futuras. *Revista Brasileira de Climatologia*. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>
- Meireles, L. D., Kinoshita, L. S., & Shepherd, G. J. (2014). Composição florística da vegetação altimontana do distrito de Monte Verde (Camanducaia, MG), Serra da Mantiqueira Meridional, Sudeste do Brasil. *Rodriguésia*, 65, 831-859. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201465403>
- Melo-Abreu, J. P., Villalobos, F. J., & Mateos, L. (2016). Frost protection. In *Principles of agronomy for sustainable agriculture* (pp. 443-457). https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_29
- Mittelmann, A., Amarante, L. do, Pezzopane, J. R. M., Matta, F. de P., Fávero, A. P. & Silva, J. L. S. (2013). Características morfoanatômicas e fisiológicas de gramíneas associadas à tolerância ao frio e à geada. Embrapa. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/976359/1/proci-2013.000241.pdf>. Acesso em 22 de maio de 2025.
- Nascimento, A. C. L., Galvani, E., Gobo, J. P. A., & Wollmann, C. A. (2022). Comparison between air temperature and land surface temperature for the city of São Paulo, Brazil. *Atmosphere*, 13(3), 491. <https://doi.org/10.3390/atmos13030491>

- Nogueira, N. C. O., Machado, P. H. G., & Reboita, M. S. (2024). Estudo climatológico das frentes frias atuantes no sul do Rio Grande do Sul e no sul de Minas Gerais entre 2009 e 2021. *Revista Brasileira de Climatologia*, 34, 306–334. <https://doi.org/10.55761/abclima.v34i20.16664>
- Pelissari, G., & Romaniuc Neto, S. (2013). Ficus (Moraceae) da Serra da Mantiqueira, Brasil. *Rodriguésia*, 64, 91-111. <https://doi.org/10.1590/S2175-78602013000100009>
- 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 registrados na região de Maria da Fé, Minas Gerais. In *IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 2015, Santa Maria, RS*. https://www.researchgate.net/profile/Cleverson-Freitas/publication/284437854_WRF_MODEL_FOR_SIMULATION_USE_OF_EPISODES_OF_FROST_REGISTERED_IN_MARIA_DA_FE_MINAS_GERAIS/links/56531de808afe619b19121d/WRF-MODEL-FOR-SIMULATION-USE-OF-EPISODES-OF-FROST-REGISTERED-IN-MARIA-DA-FE-MINAS-GERAIS.pdf. Acesso em 10 de maio de 2023.
- Reboita, M. S., Krusche, N., Ambrizzi, T., & Rocha, R. P. (2012). Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. *Terræ Didática*, 8(1), 34-50. <https://doi.org/10.20396/td.v8i1.8637425>
- Reboita, M. S., Rodrigues, M., Silva, L. F., & Alves, M. A. (2015a). Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, 17. <https://doi.org/10.5380/abclima.v17i0.41493>
- Reboita, M. S., Escobar, G., & Lopes, V. S. (2015b). Climatologia sinótica de eventos de ondas de frio sobre a região sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, 16. <https://doi.org/10.5380/abclima.v16i0.40327>
- Reboita, M., Corrêa, M., Rodrigues, M., & Silva, J. (2016). Um balanço do curso de ciências atmosféricas no sul de Minas Gerais: Ensino, pesquisa, extensão e benefícios à sociedade. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(7), 2312-2324. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160165>
- Ronquim, C. C., Rodrigues, C. A. G., & Quartaroli, C. F. (2023). *Características de uso e ocupação da cafeicultura em Divinolândia, SP*. Campinas: Embrapa Territorial, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 150, p. 1-25. <https://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/14288>. Acesso em 3 de março de 2024.
- 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(1), e1807. <https://doi.org/10.1002/met.1807>
- Sanches, N., Angelini, P. C. B., Angelini, L. P., & de Paula, D. C. J. (2023). Análise da temperatura da superfície estimada por imagens OLI-Landsat 8 em área urbana. *E&S Engineering and Science*, 12(1), 53–64. <https://doi.org/10.18607/ES20231215183>
- Santos, T. C., Carvalho, V. S. B., & Reboita, M. S. (2016). Avaliação da influência das condições meteorológicas em dias com altas concentrações de material particulado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 21, 307-313. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016139269>
- 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. *Revista Brasileira de Climatologia*. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60948>
- 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. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051995000200023>
- Silva, L. J., Reboita, M. S., & Rocha, R. P. (2014). Relação da passagem de frentes frias na região sul de Minas Gerais (RSMG) com a precipitação e eventos de geada. *Revista Brasileira de Climatologia*, 14. <https://doi.org/10.5380/abclima.v14i1.36314>
- Silva, V. O., de Mello, C. R., & Chou, S. C. (2022). Projections of severe droughts in future climate in Southeast Brazil: A case study in Southern Minas Gerais State, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(3), 1289–1302. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-03993-x>

- Snyder, R. L., Abreu, J. D. M., & Matulich, S. (2005). *Frost protection: Fundamentals, practice, and economics*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/y7231e>. Acesso em 10 de maio de 2025.
- Tavares, P. da S., Zullo, J., Pinto, H. S., & Assad, E. D. (2018). Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in Southeast Brazil. *Regional Environmental Change*, 18, 873–883. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1236-z>
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis* (Vol. 2, pp. 131-160). Reading, MA: Addison-wesley.
- Vieira Junior, N. A., Caramori, P. H., de Aguiar, M. A., & Nitsche, P. R. (2018). Minimum temperature differences between the meteorological screen and grass in radiative frost nights. *Semina: Ciências Agrárias*, 39(6), 2337-2350. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2018v39n6p2337>
- Vizcarrondo, E., & Janzen, J. (2023). The weather risk premium in coffee futures prices. *farmdoc daily*, 13(237).
- WMO. (1986). *Guidelines on the quality control of surface climatological data*. https://library.wmo.int/viewer/36897/download?file=wmo-td_111.pdf&type=pdf&navigator=1. Acesso em 10 de maio de 2023.
- Wrege, M. S., Fritzsons, E., Soares, M. T. S., Prael-Pântano, A., Steinmetz, S., Caramori, P. H., & et al. (2018). Risco de ocorrência de geadas na região centro-sul do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22. <https://doi.org/10.5380/abclima.v22i0.57306>