



# Modelos Climáticos e Cafés Especiais no Brasil

**Palavras-chave:** Cafés Especiais, IPCC, Estatística Climatológica, Mudanças Climáticas

Matheus Alves de Andrade, IMECC-CEPAGRI, UNICAMP

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup> Priscila Pereira Coltri(Orientadora), IG-CEPAGRI, UNICAMP

Ms. Guilherme Almussa Leite Torres, IG-CEPAGRI, UNICAMP

## Introdução

O Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo (ICO, 2024) e, aproximadamente 15% de suas exportações correspondem aos Cafés Especiais (Boaventura et al., 2018). O cenário de produção de cafés especiais, tem mudado a forma de produção de café no Brasil, favorecendo cafés de maior qualidade (Torres et al., 2022). Cafés especiais necessitam de condições climáticas adequadas para o cultivo e conseqüentemente resultar em um grão com qualidades especiais (Dal Molin et al., 2008). Concomitante ao cenário de produção dos cafés especiais, a questão do impacto negativo do clima na cadeia produtiva do café tem se destacado nas pesquisas científicas (Assad et al., 2004; Zullo et al., 2011; Coltri et al., 2019; Torres et al., 2022). Eventos climáticos extremos, mudanças nos padrões dos climas das regiões de plantio, podem impactar negativamente a produção do café especial brasileiro (Torres et al., 2022).

Os estudos dos impactos das mudanças climáticas na cafeicultura, dependem, essencialmente, de modelos climáticos que representem adequadamente os climas das regiões produtoras. Diferenças acentuadas entre os modelos e mesmo nas projeções climáticas podem resultar em informações equivocadas nas determinações das atividades de adaptação e mitigação. Atualmente, existem diferentes e numerosos modelos que permitem projetar os climas das regiões produtoras de cafés especiais, mas poucos estudos conseguem indicar o quanto esses modelos representam adequadamente os climas das regiões produtoras de cafés especiais.

Atualmente, o Brasil apresenta um conjunto de dados

climáticos, o do Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) (Xavier et al., 2022), proveniente da interpolação de estações meteorológicas, sem falhas e com série histórica bastante robusta, desde 1960.

Nesse contexto, o objetivo do presente projeto foi avaliar a performance da temperatura mínima, de onze modelos climáticos, em relação aos dados do Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD), de (Xavier et al., 2022). Para tanto, foram utilizados os modelos do Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), que é o conjunto de modelos globais utilizado nas análises de mudanças climáticas do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), e o modelo BR-DWGD.

Esse trabalho de Iniciação Científica faz parte de uma tese de doutorado do Instituto de Geociências da UNICAMP e está no escopo do Projeto de Pesquisa “Coffee Change” (projeto número 403858/2021-6, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ)), que busca entender como a cafeicultura pode responder a cenários climáticos diferentes dos atuais.

## Metodologia

Como dados de referência, utilizamos o modelo BR-DWGD. Os dados de simulações foram obtidos a partir dos modelos do projeto CMIP6, para o período histórico. Esses modelos foram interpolados para a mesma resolução horizontal de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  do modelo BR-DWGD, utilizando o método de remapeamento conservativo de primeira ordem descrito em Jones (1999), disponível no software Cli-

mate Data Operators (CDO). As temperatura mínima foi extraída dos modelos para as 34 regiões de produção de cafés especiais no Brasil (Figura 1). Este processo foi realizado utilizando o pacote do R `exactextractr`, que permite agregar os dados em grade por média ponderada pela fração de cobertura de cada polígono sobre as regiões de interesse. Após essa etapa, foram obtidos dados de temperatura mínima (TMIN) para as 34 regiões estudadas.

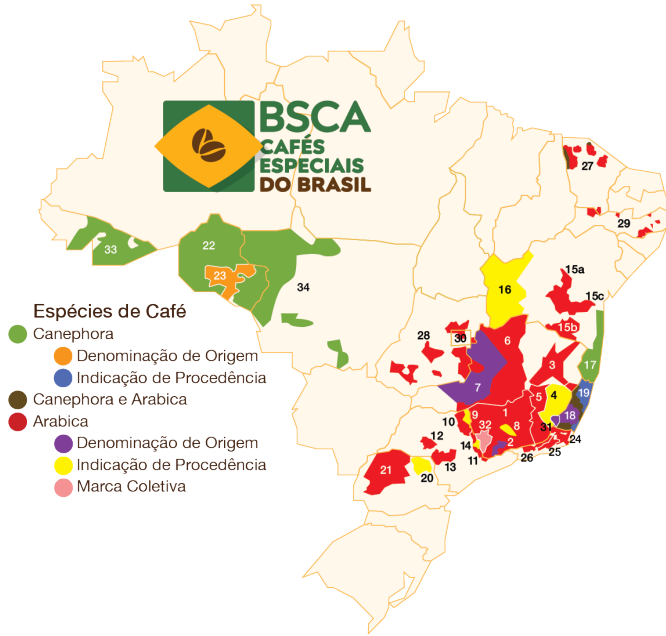


Figura 1: Regiões de Origem

<https://brazilcoffeenation.com.br/region/list>

Para comparar as distribuições e avaliar a concordância dos modelos com as observações, foram aplicados testes estatísticos de aderência, conhecidos como goodness of fit tests, em todos os modelos e regiões estudadas. Além disso, foram elaborados diagramas de Taylor (2001) para cada modelo incluído na análise. Os testes foram realizados utilizando um período comum de 1961 a 2014. As métricas utilizadas para a análise neste estudo incluem Erro Médio (ME), Erro Quadrático Médio (RMSE) e Coeficiente de Correlação de Pearson (R)

O ME, descrito pela equação 1, mede a tendência média dos valores simulados serem maiores (superestimação) ou menores (subestimação) que os dados de referência, em termos absolutos. O RMSE, descrito pela equação 2, mede o desvio entre os valores simulados por um modelo e os valores de referência.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (3)$$

Os parâmetros  $S_i$ ,  $O_i$ ,  $\bar{S}$  e  $\bar{O}$  são os valores simulados, valores de referência, a média dos valores simulados e a média dos valores de referência, respectivamente.

O Diagrama de Taylor (2001) é uma ferramenta visual que sintetiza informações complexas sobre o desempenho de modelos, permitindo uma avaliação rápida e comparativa entre diferentes simulações. A importância do diagrama reside na sua capacidade de combinar três métricas-chave em um único gráfico, fornecendo uma visão abrangente sobre a precisão, correlação e dispersão das previsões em relação aos dados observados. O coeficiente de correlação indica a força e a direção da relação linear entre as variáveis modeladas e observadas. O desvio padrão reflete a variabilidade dos dados, enquanto o erro quadrático médio centrado (RSME Centrado) mede o quão perto as simulações estão das observações, excluindo o viés sistemático.

A interpretação do diagrama é feita em três etapas, uma para cada métrica: coeficiente de correlação, desvio padrão e erro quadrático médio. O coeficiente de correlação é indicado pela posição angular de cada ponto. O desvio padrão é representado pela distância radial a partir da origem. Modelos situados sobre o círculo do desvio padrão observado têm variabilidade similar aos dados de referência. Modelos abaixo do círculo têm menor variabilidade em comparação com as observações. Modelos acima do círculo exibem variabilidade maior. O erro quadrático médio centrado é representado pela distância entre o ponto do modelo e o ponto de referência, com círculos dourados indicando essa medida. Modelos mais distantes do valor observado têm pior performance. Assim, modelos próximos ao ponto de referência, com alta correlação, desvio padrão semelhante e baixo erro quadrático médio, têm melhor performance.

Os diagramas de retrato oferecem uma visão detalhada da performance de cada modelo em relação ao erro médio (ME), considerando diversas regiões de estudo.

## Resultados

### Performance Geral

A Figura 2 apresenta o diagrama de Taylor para a variável de temperatura mínima, normalizada para ter o desvio padrão dos dados de referência como unidade.

Em termos de correlação, os modelos estão distribuídos entre 0.6 e 0.75, indicando uma correlação moderada com

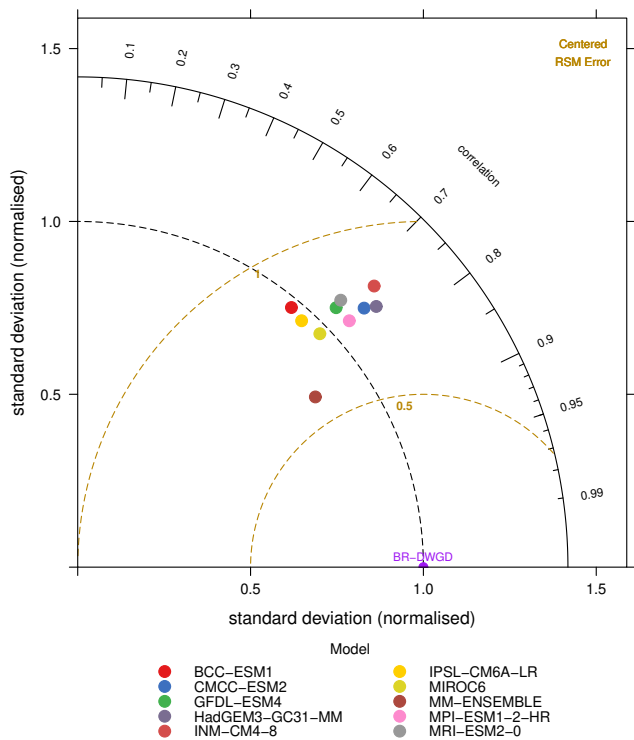


Figura 2: Diagrama de Taylor para Temperatura Mínima

os dados de referência, exceto o *multi-model ensemble* (MM-ENSEMBLE), que possui uma correlação mais alta, 0.81.

Em termos de desvio padrão, os modelos BCC-ESM1, IPSL-CM6A-LR e MIROC6 estão mais próximos do círculo de referência, mostrando variabilidade próxima à observada. O MM-ENSEMBLE apresenta menor variabilidade, e os demais modelos apresentam maior variabilidade em comparação com as observações.

Com relação ao erro quadrático médio centrado, o MM-ENSEMBLE apresenta a menor distância do ponto de referência, indicando boa performance em relação aos demais modelos.

No geral, para a temperatura mínima, o MM-ENSEMBLE é o melhor modelo, com a correlação mais alta (0.81), desvio padrão (0.84) mais próximo da referência e o menor erro (0.75). O MPI-ESM1-2-HR é o segundo melhor, com correlação de 0.74, desvio padrão de 1.06 e erro de 0.78. Para a temperatura máxima e precipitação, o MM-ENSEMBLE também se destaca com a melhor performance dentre os modelos estudados.

## Performance por Região

O diagrama de retrato na Figura 3 revela que, de maneira geral, a temperatura mínima é frequentemente subestimada pelos modelos. Os padrões destacados eviden-

ciam variações significativas na performance dos modelos para as diferentes regiões. Por exemplo, o modelo GFDL-ESM4 subestima significativamente a temperatura mínima no Noroeste e Norte do Rio de Janeiro e no Acre, enquanto o IPSL-CM6A-LR e o BCC-ESM1 superestimam essa temperatura nas Montanhas do Espírito Santo e na Mantiqueira de Minas.

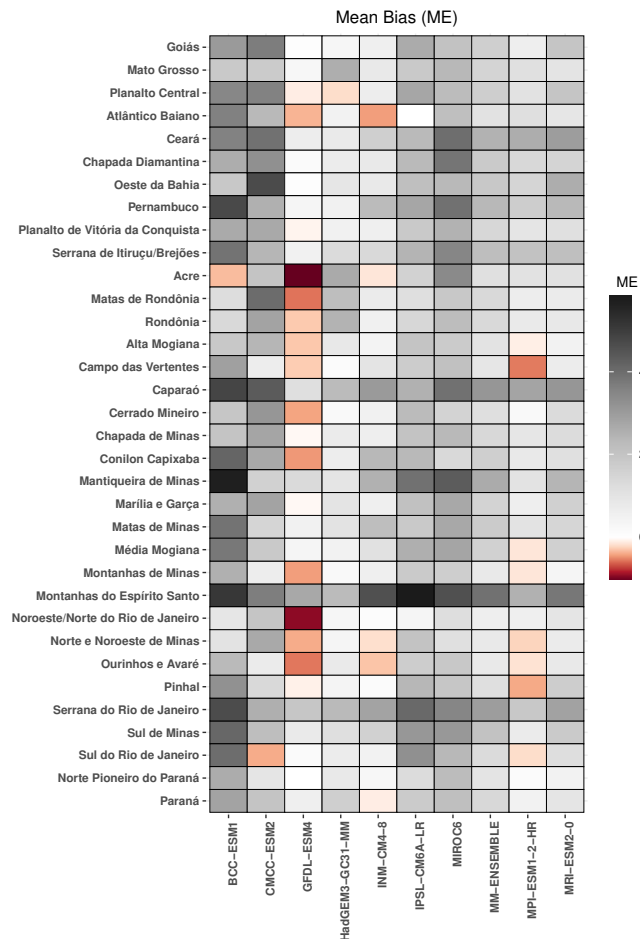


Figura 3: Diagrama de Retrato para Temperatura Mínima - ME

Apesar dessas tendências gerais, muitos modelos apresentam uma performance notável em regiões específicas, com erros médios próximos de 0. Por exemplo, as regiões Marília e Garça e Chapada de Minas são bem representadas pelos modelos GFDL-ESM4 e INM-CM4-8, enquanto que a região Atlântico Baiano é bem representada pelos modelos HadGEM-GC31-MM e IPSL-CM6A-LR

## Conclusões

Este trabalho avaliou a performance para temperatura mínima dos modelos de mudanças climáticas do CMIP6 em relação às áreas de produção de cafés especiais no Bra-

sil, comparando-os com os dados interpolados do modelo BR-DWGD, que são derivados de estações meteorológicas. Os resultados mostram que nenhum modelo individual se destaca como o melhor para todas as regiões produtoras de cafés especiais. Em termos gerais, observou-se que os modelos tendem a superestimar a temperatura mínima.

## Referências

- E. D. Assad, H. S. Pinto, J. Zullo Junior, and A. M. H. Ávila. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39(11):1057–1064, Nov. 2004. ISSN 0100-204X. doi: 10.1590/S0100-204X2004001100001. URL [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2004001100001&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2004001100001&lng=pt&tlng=pt).
- P. S. M. Boaventura, C. C. Abdalla, C. L. Araújo, and J. S. Arakelian. VALUE CO-CREATION IN THE SPECIALTY COFFEE VALUE CHAIN: THE THIRD-WAVE COFFEE MOVEMENT. *Revista de Administração de Empresas*, 58(3):254–266, June 2018. ISSN 2178-938X, 0034-7590. doi: 10.1590/s0034-759020180306. URL [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-75902018000300254&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75902018000300254&lng=en&tlng=en).
- P. P. Coltri, H. S. Pinto, R. R. D. V. Gonçalves, J. Zullo Junior, and V. Dubreuil. Low levels of shade and climate change adaptation of Arabica coffee in southeastern Brazil. *Heliyon*, 5(2):e01263, Feb. 2019. ISSN 24058440. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01263. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844018347698>.
- R. N. Dal Molin, M. Andreotti, A. R. D. Reis, E. Furlani Junior, G. C. Braga, and M. B. D. S. Scholz. Caracterização física e sensorial do café produzido nas condições topoclimáticas de Jesuitas, Paraná. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 30(3):353–358, May 2008. ISSN 1807-8621, 1679-9275. doi: 10.4025/actasciagron.v30i3.3513. URL <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/3513>.
- P. W. Jones. First- and Second-Order Conservative Remapping Schemes for Grids in Spherical Coordinates. *Monthly Weather Review*, 127(9):2204–2210, Sept. 1999. ISSN 0027-0644, 1520-0493. doi: 10.1175/1520-0493(1999)127<2204:FASOCR>2.0.CO;2. URL [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493\(1999\)127<2204:FASOCR>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493(1999)127<2204:FASOCR>2.0.CO;2).
- K. E. Taylor. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7):7183–7192, Apr. 2001. ISSN 0148-0227. doi: 10.1029/2000JD900719. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2000JD900719>.
- G. A. Torres, L. V. Zezzo, R. V. D. S. José, R. Greco, and P. P. Coltri. Exposure To Climate Risk: A Case Study For Coffee Farming In The Region Of Alta Mogiana, São Paulo. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 94(suppl 4):e20211379, 2022. ISSN 1678-2690, 0001-3765. doi: 10.1590/0001-376520220211379. URL [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0001-37652022000801005&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652022000801005&tlng=en).
- A. C. Xavier, B. R. Scanlon, C. W. King, and A. I. Alves. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *International Journal of Climatology*, 42(16):8390–8404, Dec. 2022. ISSN 0899-8418, 1097-0088. doi: 10.1002/joc.7731. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.7731>.
- J. Zullo, H. S. Pinto, E. D. Assad, and A. M. H. De Ávila. Potential for growing Arabica coffee in the extreme south of Brazil in a warmer world. *Climatic Change*, 109(3-4):535–548, Dec. 2011. ISSN 0165-0009, 1573-1480. doi: 10.1007/s10584-011-0058-0. URL <http://link.springer.com/10.1007/s10584-011-0058-0>.