



Previsão climática sazonal da temperatura no Brasil a partir da regionalização de modelos dinâmicos.

Mário Henrique Guilherme dos Santos Vanderlei ¹
Fabrício Daniel dos Santos Silva ²
Rafaela Lisboa Costa ³
Nathalia Bissaque Pessota ⁴
Luiz Soares Neto ⁵
Katyelle Ferreira da Silva Bezerra ⁶

Resumo

Este estudo teve como objetivo principal avaliar a eficácia da combinação do North Multi-Model Ensemble (NMME) com a Regressão por Componentes Principais (RCP) na geração de previsões climáticas de temperatura para o Brasil. O NMME, um produto relativamente novo na comunidade científica, reúne um conjunto de modelos climáticos globais para produzir previsões sazonais de variáveis como precipitação, temperatura a 2 metros e temperatura da superfície do mar. Técnicas estatísticas como RCP são frequentemente utilizadas para explorar as relações entre as variáveis climáticas e melhorar a interpretação dos resultados dos modelos. O RCP foi empregado para calibrar previsões retrogradadas do NMME a partir de um conjunto de dados observados em estações no período 1991-2020, para avaliar sua performance em termos de correlação histórica e erros estimados para duas estações do ano, o verão representado pelo trimestre dezembro-janeiro-fevereiro (DJF), e inverno representado pelo trimestre junho-julho-agosto (JJA). Os resultados obtidos indicaram que a combinação do NMME com a RCP demonstrou um potencial significativo para gerar previsões climáticas mais confiáveis. Dessa forma, os resultados preliminares sugerem que essa abordagem representa uma metodologia promissora para a previsão climática da temperatura no Brasil.

Palavras-chave: Temperatura média; NMME; Regressão por componentes principais.

¹ Aluno do Curso de Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas, mario.vanderlei@icat.ufal.br.

² Prof. Dr. da Universidade Federal de Alagoas – Campus Maceió, Instituto de Ciências Atmosféricas, fabricao.santos@icat.ufal.br.

³ Bolsista PNPd da Universidade Federal de Alagoas – Campus Maceió, Instituto de Ciências Atmosféricas, rafaela.costa@icat.ufal.br.

⁴ Aluna do Curso de Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas, nathaliabissaquep@gmail.com.

⁵ Aluno do Curso de Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas, luiz.neto@icat.ufal.br.

⁶ Aluna do Curso de Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas, katyelle.silva@icat.ufal.br.



INTRODUÇÃO

A intensificação da variabilidade climática evidenciada pelo aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos como secas e inundações, tem sido impulsionada pelas mudanças climáticas antropogênicas. Os impactos desses eventos que incluem perdas econômicas, danos à infraestrutura e riscos à saúde humana, têm se intensificado em diversas regiões do mundo (IPCC, 2021). Diante desse cenário, a demanda por previsões climáticas mais precisas e confiáveis tem crescido exponencialmente. Decorrente disso, a previsão climática em nível sazonal ainda enfrenta desafios como a complexidade dos sistemas climáticos e a incerteza nas projeções futuras de curto prazo (Barnston et al., 2012). A incerteza nas previsões climáticas é inerente ao sistema climático e se manifesta em diversas escalas de tempo e espaço. Fatores como a variabilidade natural do clima, a interação entre a atmosfera, os oceanos e a superfície terrestre, e as limitações dos modelos climáticos contribuem para essa incerteza.

O Brasil possui uma vasta extensão territorial e rica diversidade climática, abrigando uma população de aproximadamente 203 milhões de habitantes, dos quais uma parcela significativa depende diretamente da agricultura para sua subsistência e para impulsionar a economia nacional (IBGE, 2022). A sensibilidade do setor agrícola às condições climáticas torna a previsão meteorológica precisa um fator crucial para o planejamento e a tomada de decisões nesse setor estratégico.

A climatologia brasileira é marcada por uma grande variabilidade espacial, com características distintas entre as regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul. O extremo norte, por exemplo, é caracterizado por um clima equatorial quente e úmido, com elevadas precipitações e alta umidade relativa do ar. Já o extremo sul apresenta um clima subtropical, com estações bem definidas, verões quentes e úmidos e invernos frios e secos. Essas diferenças climáticas regionais resultam em diferentes tipos de eventos extremos, como secas, inundações e ondas de calor, que podem causar impactos socioeconômicos significativos (Confalonieri, 2003).



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

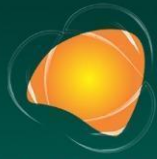
Neste contexto, o desenvolvimento de novas ferramentas e metodologias, como o North American Multi-Model Ensemble (NMME), representa um avanço significativo para a melhoria da precisão das previsões climáticas e para o suporte à tomada de decisões mais assertivas em um cenário de mudanças climáticas (Becker et al., 2022).

A aplicação do NMME em regiões específicas, como o Brasil, requer uma cuidadosa calibração e validação dos modelos. A calibração visa ajustar os parâmetros dos modelos para melhorar a concordância entre as previsões e as observações, enquanto a validação avalia a capacidade dos modelos em reproduzir padrões climáticos passados. A Regressão por Componentes Principais (RCP) é uma técnica estatística que pode ser utilizada para calibrar e validar os modelos do NMME, explorando as relações entre as variáveis climáticas e identificando os padrões de variabilidade mais importantes.

METODOLOGIA

Considerando a alta variabilidade espacial do clima brasileiro, este estudo utilizou dados de temperatura do NMME para analisar o comportamento e a capacidade preditiva dos modelos durante os trimestres de inverno, junho, julho e agosto (JJA) e verão, dezembro, janeiro e fevereiro (DJF).

O conjunto de dados do NMME, disponível no site (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/data.html>), é composto por seis modelos climáticos globais, sendo quatro dos Estados Unidos e dois do Canadá. São disponibilizados dados de hindcasts e previsões, desenvolvido pelo International Research Institute for Climate and Society (IRI), da Universidade de Columbia nos Estados Unidos, para pós processamento e calibração com dados observados.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

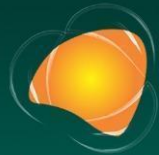
Com uma base homogênea de dados observados mensalmente a partir de estações meteorológicas, foi possível reprocessar e calibrar os dados do NMME no software Climate Predictability Tool (CPT), utilizando a técnica de RCP para 30 anos de treinamento (1991-2020). A partir disso, foram gerados no software R (versão 4.0.3) três produtos principais de avaliação e previsão, apresentados em formato de mapa: (1) correlações entre as previsões calibradas e observações para o período 1991-2020; (2) previsão da temperatura para o trimestre JJA de 2023 e DJF de 2024 e (3) anomalia da temperatura prevista em relação à climatologia coincidente com o período de hindcast (1991-2020) para o trimestre JJA de 2023 e DJF de 2024;

A RCP é uma ferramenta estatística usada para lidar com dados que apresentam um problema comum em análises: a forte correlação entre as variáveis. Quando isso ocorre, os resultados da análise podem se tornar menos confiáveis. Essa técnica transforma os dados de forma a reduzir essa correlação, permitindo obter estimativas mais precisas e confiáveis das relações entre as variáveis (Jolliffe, 2002).

A RCP inicia transformando as variáveis independentes originais em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas, chamadas de componentes principais. Esses componentes são combinações lineares das variáveis originais e capturam a maior parte da variabilidade dos dados. É como criar novas variáveis que resumem a informação das variáveis originais de forma mais eficiente. Os componentes principais são ordenados por ordem de importância: o primeiro componente explica a maior parte da variância dos dados, o segundo a segunda maior parte, e sucessivamente. Em seguida, é realizada uma regressão linear entre a variável dependente e os componentes principais selecionados. Ou seja, em vez de usar todas as variáveis originais na regressão, utilizamos esses novos componentes que resumem a informação de forma mais eficiente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validar os resultados, foram gerados mapas de correlação entre as previsões do modelo e as observações em estações meteorológicas (Figura 1). Os coeficientes de correlação indicaram uma boa concordância entre os dois conjuntos de dados, especialmente nas regiões Norte e Nordeste. Além



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

disso, comparamos as previsões com as normais climatológicas apresentadas por Novais & Machado (2023) e Cavalcanti & Ferreira (2021). A boa concordância entre os resultados sugere que o NMME captura de forma realista a variabilidade climática do Brasil, corroborando com padrões descritos na literatura.

O verão de 2024 foi marcado por um padrão de anomalias de temperatura positiva generalizado, com destaque para as regiões Norte e Nordeste. Nesses locais, as temperaturas superaram em até 2°C os valores climatológicos médios, indicando um aquecimento significativo e acima da média histórica. Durante o inverno, embora o padrão de anomalias positivas persista, este se concentra nas regiões Norte e extremo norte do Nordeste, com um aumento de temperatura de 1,5°C a 2°C em relação às normais climatológicas. As anomalias de temperatura observada, potencialmente associadas ao fenômeno El Niño, acarretam impactos significativos para os ecossistemas locais, a agricultura e a saúde pública.

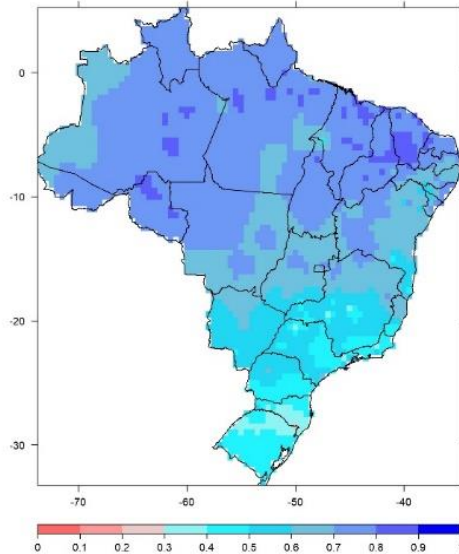
A análise dos mapas de correlação revelou uma excelente concordância entre os dados modelados e observados, com coeficientes superiores a 0,8 nas regiões Norte e Nordeste durante todas as estações. Esses resultados robustos atestam a alta capacidade do modelo em capturar a variabilidade climática, especialmente nessas regiões de clima tropical. Na região Sul, embora os coeficientes de correlação tenham sido ligeiramente inferiores (em torno de 0,5 a 0,6), a qualidade das simulações ainda foi considerada satisfatória, demonstrando a versatilidade do modelo em representar diferentes regimes climáticos.

A análise dos mapas de temperatura média prevista (Figura 2), evidenciou um padrão espacial caracterizado por um gradiente térmico positivo do Sul para o Norte, tanto no inverno quanto no verão. A previsão para a região Sul foi de temperaturas médias com valores mínimos de 10°C no inverno de 2023, enquanto o Norte e Nordeste, normalmente com maior insolação, a previsão foi de temperaturas médias com valores superiores a 24°C no verão de 2024. Essa variação sazonal e espacial está em conformidade com os padrões climáticos presentes na literatura para o território brasileiro. Por fim, a previsão da temperatura para JJA/2023 e DJF/2024 em relação a uma normal climatológica 1991-2020, foi de desvios positivos generalizados em todas as regiões brasileiras, como mostra a Figura 3, condizentes com os desvios observados pelo INMET nesses períodos, mostrados na Figura 4.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

Correlação entre Previsões e Observações (1991-2020)
Trimestre: JUNHO-JULHO-AGOSTO - ENSEMBLE
Realização: MAIO/2023



Correlação entre Previsões e Observações (1991-2020)
Trimestre: DEZEMBRO-JANEIRO-FEVEREIRO - ENSEMBLE
Realização: NOVEMBRO/2023

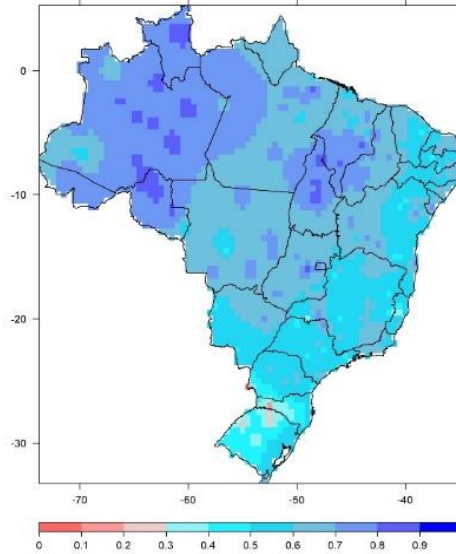
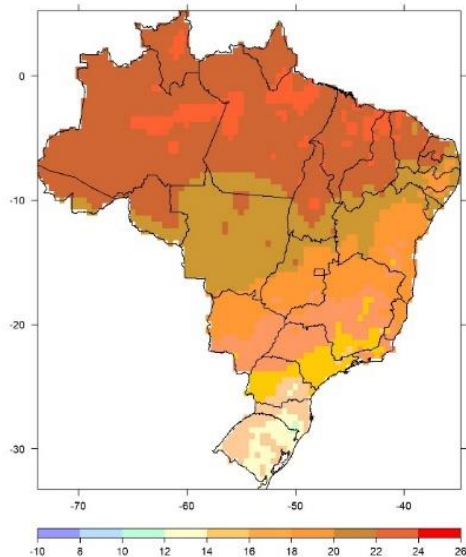


Figura 1: Mapa de correlação entre as previsões calibradas e observações para o período 1991-2020.

Temperatura Média Prevista (°C)
Trimestre: JUNHO-JULHO-AGOSTO de 2023 - ENSEMBLE
Realização: MAIO/2023



Temperatura Média Prevista (°C)
Trimestre: DEZEMBRO-JANEIRO-FEVEREIRO de 2024 - ENSEMBLE
Realização: NOVEMBRO/2023

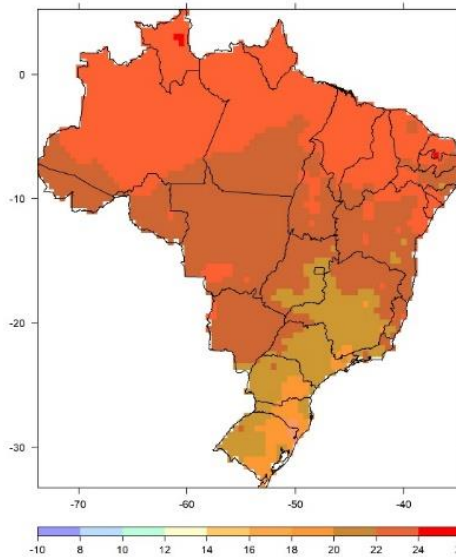


Figura 2: Mapa de previsão da temperatura média prevista para os trimestres JJA de 2023 e DJF de 2024.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

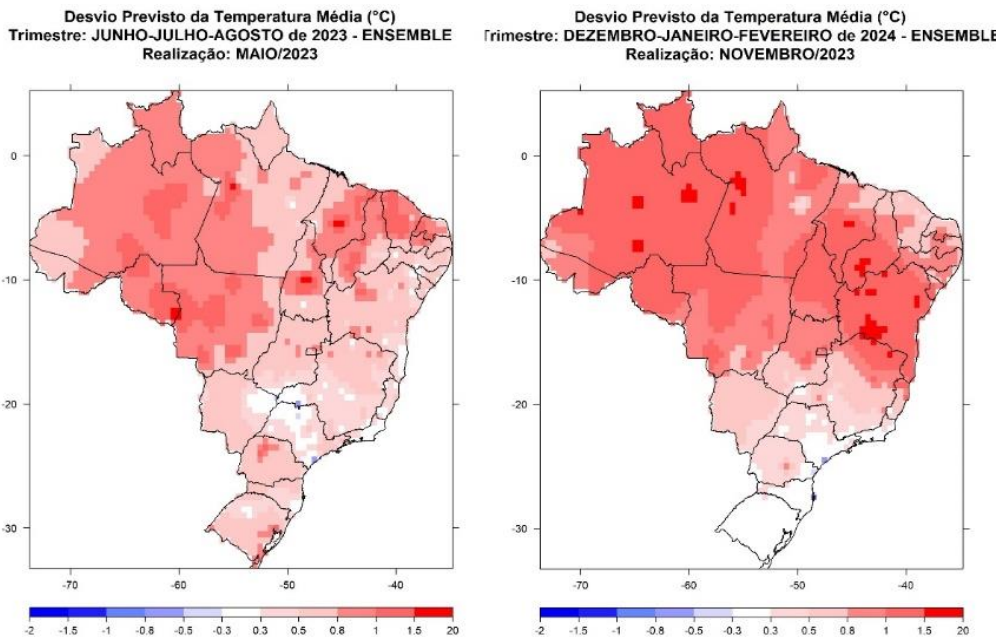


Figura 3: Mapa de anomalia de temperatura prevista para os trimestres de JJA de 2023 e DJF de 2024.

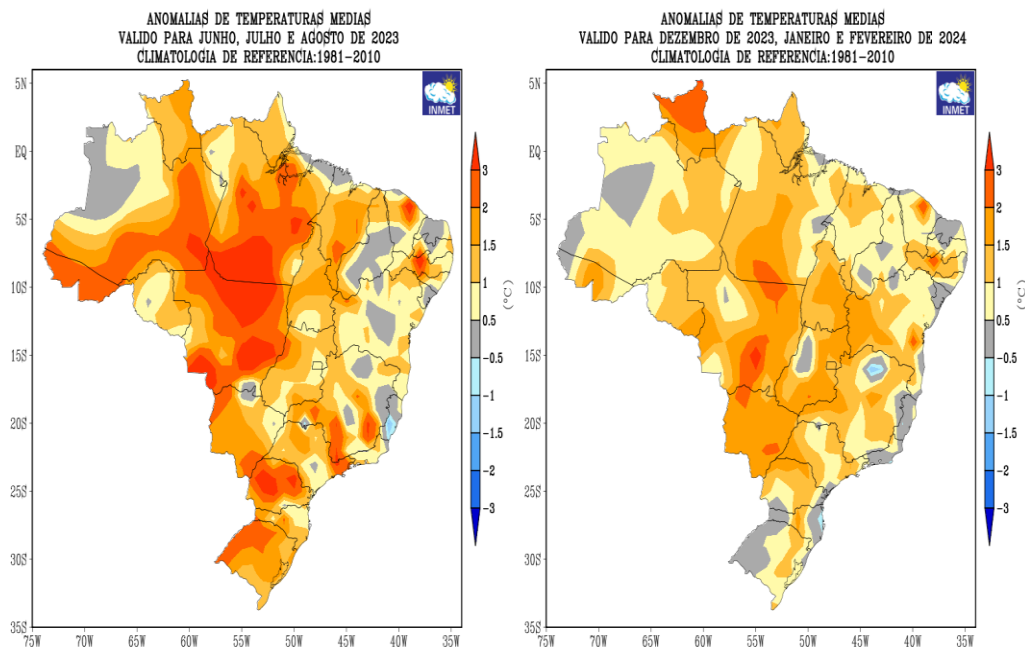
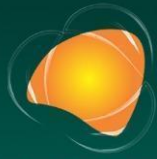


Figura 4: Anomalias de temperatura observadas para os trimestres de JJA de 2023 e DJF de 2024.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

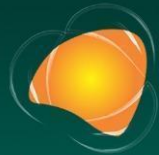
As anomalias de temperatura observadas neste estudo possuem implicações socioeconômicas significativas, afetando diversos setores da sociedade:

- **Agricultura:** Aumentos nas temperaturas mínimas e máximas podem alterar os ciclos de cultivo, reduzir a produtividade agrícola, aumentar a incidência de pragas e doenças, e intensificar a competição por água. Regiões dependentes da agricultura, como o Cerrado e o Pantanal, podem ser particularmente vulneráveis.
- **Energia:** A demanda por energia elétrica tende a aumentar em períodos de altas temperaturas, o que pode sobrecarregar o sistema energético e exigir investimentos em novas fontes de energia.
- **Meio ambiente:** As mudanças climáticas podem alterar os ecossistemas, afetar a biodiversidade e aumentar o risco de incêndios florestais.
- **Recursos hídricos:** Aumento da evapotranspiração, redução das precipitações e alteração dos regimes hidrológicos podem levar à diminuição dos recursos hídricos disponíveis para consumo humano, irrigação e geração de energia.
- **Saúde pública:** Ondas de calor podem aumentar o risco de doenças relacionadas ao calor, como desidratação, doenças respiratórias e doenças cardiovasculares. Além disso, a proliferação de vetores de doenças, como mosquitos transmissores da dengue e da zika, pode ser favorecida por condições climáticas mais quentes e úmidas.

Os resultados reforçam a necessidade de implementar medidas de adaptação e mitigação para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas. É fundamental investir em pesquisas científicas, desenvolver tecnologias limpas e promover políticas públicas que incentivem a sustentabilidade e a resiliência.

CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

A intensificação da variabilidade climática e o aumento da frequência de eventos extremos tem exigido cada vez mais o desenvolvimento de ferramentas precisas para a previsão climática.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

Neste estudo, exploramos o potencial do NMME em conjunto com o CPT para gerar previsões climáticas de longo prazo para o Brasil.

Os resultados obtidos demonstram que o NMME, quando devidamente calibrado e validado, apresenta um excelente desempenho na previsão da temperatura em diferentes regiões do Brasil. A capacidade do modelo em capturar a variabilidade espacial e temporal da temperatura, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, é notável. Entretanto, a precisão das previsões varia entre as regiões, sendo mais elevada nas regiões Norte e Nordeste e ligeiramente menor na região Sul.

A análise das previsões probabilísticas em tercis revelou um padrão de maior probabilidade de ocorrência de temperaturas acima da média climatológica em grande parte do território brasileiro, especialmente no verão. Essa tendência é consistente com as projeções de aumento da temperatura média global em decorrência das mudanças climáticas.

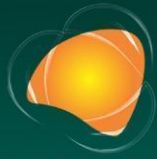
Os resultados deste estudo contribuem para o avanço da pesquisa em previsão climática no Brasil, podendo assim, auxiliar na tomada de decisões em diversos setores, como agricultura, gestão de recursos hídricos, etc. No entanto, é importante ressaltar que a previsão climática é um campo em constante evolução e que novas pesquisas se fazem necessárias para o aprimoramento da precisão e confiabilidade das previsões.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro da FAPEAL, relativo aos projetos: “Implementação de um sistema de previsão climática mensal e sazonal para o Nordeste do Brasil a partir de modelos dinâmicos internacionais” aprovado no Edital FAPEAL N° 002/2022, e ao projeto “Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação (PDPG/CAPES/FAPEAL)”, aprovado no Edital n°18/2020.

REFERÊNCIAS

Barnston, A.G.; Tippett, M.K.; L’Heureux, M.L.; Li, S.; DeWitt, D.G. “Skill of Real-Time Seasonal ENSO Model Predictions During 2002–11: Is Our Capability Increasing”. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, p. 631–651, 2012.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

Becker, E. J., B. P. Kirtman, M. L'Heureux, Á. G. Muñoz, and K. Pegion. "2022: A Decade of the North American Multimodel Ensemble (NMME): Research, Application, and Future Directions". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 103, E973–E995, 2022.

Cavalcanti, I. F. A ; Ferreira, N. J . "Climas do Brasil". *Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática*. 1ed.São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, p. 9-82, 2021.

Confalonieri, Ulisses. "Variabilidade climática, vulnerabilidade social e saúde no Brasil". *Terra Livre*. 1, 2003.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). "Censo Demográfico 2022: população e domicílios : primeiros resultados / IBGE, Coordenação Técnica do Censo Demográfico". Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

Jolliffe, I. "Principal Component Analysis". 2nd Edition, Springer, New York, 2002.

Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou. "IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis". Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.

Novais, G. T., & Machado, L. A. "Os climas do Brasil: segundo a classificação climática de Novais". *Revista Brasileira De Climatologia*, 32(19), 1–39, 2023.