



METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE RISCO CLIMÁTICO NO SUDESTE DO BRASIL

Pâmella Ferreira da Silva¹
Ricardo Guimarães Andrade²
Marcos Cicarini Hott³
Inácio de Barros⁴
Glaucio Rodrigues Carvalho⁵
Roziani Maria Gomes⁶
Walter Coelho Pereira de Magalhaes Junior⁷
Thiago Paiva Donato⁸
Pérsio Sandir D'Oliveira⁹

RESUMO

O aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos tem imposto novos desafios à sustentabilidade da agropecuária no Sudeste do Brasil. Este estudo analisa o risco climático agropecuário em uma perspectiva integrada, combinando o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) — representativo do estresse térmico — e o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI-12) — indicador da severidade de secas meteorológicas. Foram utilizadas séries mensais históricas de 2003 a 2023 para identificar os meses atípicos de maior risco climático, com base nos valores máximos do SPEI e percentis críticos do ITU (P95). A análise resultou em painéis de anomalias mensais e em um índice composto de risco climático extremo, ponderando os efeitos de seca e calor sobre o território do Sudeste. Os resultados evidenciam que as regiões mais afetadas incluem o Noroeste Paulista, o Centro-Norte de Minas Gerais, a Zona da Mata, o Vale do Rio Doce e o Norte do Espírito Santo. A metodologia aplicada foi satisfatória para identificar os extremos climáticos regionais e representa uma valiosa ferramenta de apoio a formulação de políticas públicas, oferecendo subsídios técnicos à resiliência produtiva e territorial frente às mudanças climáticas globais.

Objetivo: O objetivo deste estudo é propor uma análise integrada dos índices ITU e SPEI aplicada à região Sudeste do Brasil, no período de 2003 a 2023, identificando padrões espaciais e mensais de risco climático agropecuário associados a eventos extremos de calor e seca.

Referencial Teórico: As mudanças climáticas tem resultado em uma nova configuração de riscos, caracterizada pela maior frequência e severidade de secas, ondas de calor e eventos compostos de estresse hídrico e térmico. Assim, reforça a urgência de estratégias de adaptação climática no setor agropecuário. O Sudeste apresenta significativa diversidade climática e fisiográfica, sendo que a variabilidade interanual e decadal das chuvas e das temperaturas tem se intensificado, resultando em anomalias simultâneas de seca e calor, com impactos sobre cultivos e rebanhos.

¹ Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

E-mail: pamellaferreira34@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-1057-4782>

² Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

E-mail: ricardo.andrade@embrapa.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8595-5038>

³ Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil. E-mail: marcos.hott@embrapa.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0653-5877>

⁴ Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil. E-mail: inacio.barros@embrapa.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0185-7984>

⁵ Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil. E-mail: glaucio.carvalho@embrapa.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7468-2874>

⁶ Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, Brasil. E-mail: roziani.gomes@ufv.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-4138-0320>

⁷ Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil. E-mail: walter.magalhaes@embrapa.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2765-2706>

⁸ Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

E-mail: thpaivadonato@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-1305-5130>

⁹ Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil. E-mail: persio.oliveira@embrapa.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4007-4536>



Método: A metodologia se fundamenta na aplicação do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI-12) e do Índice de Temperatura e Umidade (ITU). Os dados dos índices foram padronizados e normalizados espacialmente para gerar uma métrica composta de análise do risco climático.

Resultados e Discussão: Os resultados contribuem para políticas públicas voltadas para estratégias de adaptação agropecuária frente ao cenário de aquecimento global, fornecendo subsídios técnicos para a gestão territorial, o planejamento agrícola e a mitigação de perdas produtivas em um contexto de crescente incerteza climática.

Implicações da Pesquisa: Essa abordagem visa compreender a variabilidade intra-anual e destacar os períodos de sobreposição de calor e seca, fundamentais para o planejamento de estratégias adaptativas no setor agropecuário do Sudeste do Brasil.

Originalidade/Valor: A relevância desta pesquisa reside na contribuição metodológica e prática para a avaliação dos riscos compostos de calor e seca sob uma perspectiva histórica e espacialmente detalhada.

Palavras-chave: Índice Climático, Eventos Extremos, Resiliência Produtiva, Estratégias Adaptativas, Políticas Públicas.

METHODOLOGY FOR IDENTIFICATION AND ANALYSIS OF CLIMATE RISK IN SOUTHEASTERN BRAZIL

ABSTRACT

The increasing frequency and intensity of extreme weather events have posed new challenges to the sustainability of agriculture in Southeastern Brazil. This study analyzes agricultural climate risk from an integrated perspective, combining the Temperature and Humidity Index (THI) — representative of thermal stress — and the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI-12) — an indicator of the severity of meteorological droughts. Historical monthly series from 2003 to 2023 were used to identify atypical months with the highest climate risk, based on the maximum values of the SPEI and critical percentiles of the THI (P95). The analysis resulted in panels of monthly anomalies and a composite index of extreme climate risk, weighting the effects of drought and heat on the territory of the Southeast. The results show that the most affected regions include Northwest São Paulo, part of the Triângulo Mineiro, North-Central Minas Gerais, Zona da Mata, the Rio Doce Valley, and Northern Espírito Santo. The methodology applied was satisfactory for identifying regional climate extremes and represents a valuable tool to support the formulation of public policies, offering technical subsidies for productive and territorial resilience in the face of global climate change.

Objective: The objective of this study is to propose an integrated analysis of the ITU and SPEI indices applied to the Southeast region of Brazil, from 2003 to 2023, identifying spatial and monthly patterns of agricultural climate risk associated with extreme heat and drought events.

Theoretical Framework: Climate change has resulted in a new risk configuration, characterized by the increased frequency and severity of droughts, heat waves, and compound events of water and heat stress. This reinforces the urgency of climate adaptation strategies in the agricultural sector. The Southeast region of Brazil presents significant climatic and physiographic diversity, with interannual and decadal variability in rainfall and temperatures intensifying, resulting in simultaneous drought and heat anomalies, impacting crops and livestock.

Method: The methodology is based on the application of the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI-12) and the Temperature and Humidity Index (THI). The index data were standardized and spatially normalized to generate a composite metric for climate risk analysis.

Results and Discussion: The results contribute to public policies aimed at agricultural adaptation strategies in the face of global warming, providing technical support for territorial management, agricultural planning, and mitigation of production losses in a context of increasing climate uncertainty.

Research Implications: This approach aims to understand intra-annual variability and highlight periods of overlapping heat and drought, which are fundamental for planning adaptive strategies in the agricultural sector of Southeastern Brazil.

Originality/Value: The relevance of this research lies in its methodological and practical contribution to the assessment of the combined risks of heat and drought from a historically and spatially detailed perspective.



Keywords: Climate Index, Extreme Events, Productive Resilience, Adaptive Strategies, Public Policies.

METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DEL RIESGO CLIMÁTICO EN EL SURESTE DE BRASIL

RESUMEN

La creciente frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos han planteado nuevos desafíos para la sostenibilidad de la agricultura en el sureste de Brasil. Este estudio analiza el riesgo climático agrícola desde una perspectiva integral, combinando el Índice de Temperatura y Humedad (ITH) —representativo del estrés térmico— y el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI-12) —indicador de la severidad de las sequías meteorológicas—. Se utilizaron series mensuales históricas de 2003 a 2023 para identificar los meses atípicos con mayor riesgo climático, con base en los valores máximos del SPEI y los percentiles críticos del ITH (P95). El análisis generó paneles de anomalías mensuales y un índice compuesto de riesgo climático extremo, ponderando los efectos de la sequía y el calor en el territorio del sureste. Los resultados muestran que las regiones más afectadas incluyen el noroeste de São Paulo, parte del Triângulo Mineiro, el centro norte de Minas Gerais, la Zona da Mata, el valle del Río Doce y el norte de Espírito Santo. La metodología aplicada resultó satisfactoria para identificar los extremos climáticos regionales y representa una valiosa herramienta para apoyar la formulación de políticas públicas, ofreciendo subvenciones técnicas para la resiliencia productiva y territorial frente al cambio climático global.

Objetivo: El objetivo de este estudio es proponer un análisis integrado de los índices ITU y SPEI aplicados a la región Sudeste de Brasil, desde 2003 hasta 2023, identificando patrones espaciales y mensuales de riesgo climático agrícola asociados con eventos de calor extremo y sequía.

Marco Teórico: El cambio climático ha generado una nueva configuración de riesgos, caracterizada por el aumento en la frecuencia e intensidad de sequías, olas de calor y eventos combinados de estrés hídrico y térmico. Esto refuerza la urgencia de implementar estrategias de adaptación climática en el sector agrícola. La región Sudeste de Brasil presenta una importante diversidad climática y fisiográfica, con una creciente variabilidad interanual y decenal en las precipitaciones y temperaturas, lo que provoca anomalías simultáneas de sequía y calor que afectan a los cultivos y la ganadería.

Método: La metodología se basa en la aplicación del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI-12) y el Índice de Temperatura y Humedad (THI). Los datos de los índices se estandarizaron y normalizaron espacialmente para generar una métrica compuesta para el análisis del riesgo climático.

Resultados y Discusión: Los resultados contribuyen a las políticas públicas dirigidas a estrategias de adaptación agrícola frente al calentamiento global, proporcionando apoyo técnico para la gestión territorial, la planificación agrícola y la mitigación de las pérdidas de producción en un contexto de creciente incertidumbre climática.

Implicaciones de la investigación: Este enfoque pretende comprender la variabilidad intraanual y resaltar los períodos de calor y sequía superpuestos, que son fundamentales para planificar estrategias de adaptación en el sector agrícola del sureste de Brasil.

Originalidad/Valor: La relevancia de esta investigación radica en su contribución metodológica y práctica a la evaluación de los riesgos combinados del calor y la sequía desde una perspectiva histórica y espacialmente detallada.

Palabras clave: Índice Climático, Eventos Extremos, Resiliencia Productiva, Estrategias de Adaptación, Políticas Públicas.

RGSA adota a Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).





1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais têm promovido transformações profundas nos sistemas atmosféricos regionais e locais, com repercussões diretas sobre a produção agropecuária e a segurança alimentar. O aumento da temperatura média global, associado à intensificação de extremos climáticos, tem resultado em uma nova configuração de riscos, caracterizada pela maior frequência e severidade de secas, ondas de calor e eventos compostos de estresse hídrico e térmico (Marengo et al., 2017; Marengo et al., 2022; IPCC, 2023; Silva et al., 2023).

No contexto brasileiro, o Sudeste destaca-se como uma das regiões mais vulneráveis a essas alterações, tanto pela importância estratégica de sua produção agrícola e pecuária quanto pela elevada concentração populacional e pressão sobre os recursos hídricos (Cunha et al., 2019; Pinto et al., 2008). O Sudeste apresenta significativa diversidade climática e fisiográfica, marcada por contrastes entre zonas úmidas e áreas sujeitas à irregularidade pluviométrica. Essa heterogeneidade acentua a exposição de sistemas produtivos às flutuações climáticas e amplia a necessidade de monitoramento contínuo dos riscos (Angelotti et al., 2025).

Estudos recentes apontam que a variabilidade interanual e decadal das chuvas e das temperaturas na região tem se intensificado, resultando em anomalias simultâneas de seca e calor — fenômeno que potencializa os impactos sobre cultivos e rebanhos (Marengo et al., 2015; Silva et al., 2023). Esses eventos compostos têm efeitos sinérgicos que ultrapassam a soma dos impactos individuais de cada variável, comprometendo o rendimento agrícola, acelerando processos de degradação de pastagens e aumentando o consumo hídrico em sistemas de irrigação (Zscheischler et al., 2020).

A mensuração desses riscos requer abordagens integradas e indicadores que capturem diferentes dimensões do estresse climático. Entre os índices disponíveis, o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) e o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) são amplamente reconhecidos por sua robustez e aplicabilidade em estudos agroclimáticos (Thom, 1959; Buffington et al., 1981; Beguería et al., 2014). O SPEI permite avaliar a intensidade e duração das secas meteorológicas a partir do balanço hídrico entre precipitação e evapotranspiração, enquanto o ITU quantifica o grau de desconforto térmico dos bovinos, sendo particularmente relevante para a pecuária em ambientes tropicais.

Pesquisas têm demonstrado a eficiência desses índices na caracterização de extremos climáticos e na identificação de períodos críticos para a agropecuária. Segundo Cunha et al. (2019), as secas ocorridas no Sudeste entre 2014 e 2015 constituem marcos na história recente do clima regional, refletindo a redução das chuvas e o aumento expressivo das temperaturas



médias e máximas. De forma semelhante, estudos de Marengo et al. (2017), Marengo et al. (2022) e Silva et al. (2023) evidenciam a intensificação das ondas de calor após 2010, com tendência de expansão para áreas tradicionalmente mais amenas, como o Sul de Minas e o Vale do Paraíba paulista.

Além dos impactos diretos sobre a produtividade agrícola, o estresse térmico e hídrico também compromete a eficiência fisiológica das plantas e o bem-estar animal, reduzindo a capacidade de conversão alimentar e aumentando a mortalidade em períodos críticos (Buffington et al., 1981; IPCC, 2023). A conjunção desses fatores reforça a urgência de estratégias de adaptação climática no setor agropecuário, que incluem desde o desenvolvimento de cultivares tolerantes à seca até o aprimoramento dos sistemas de manejo térmico e hídrico.

Neste estudo, propõe-se uma análise integrada dos índices ITU e SPEI aplicada à região Sudeste do Brasil, no período de 2003 a 2023, com o objetivo de identificar padrões espaciais e mensais de risco climático agropecuário associados a eventos extremos de calor e seca. A combinação dessas métricas permite mapear o comportamento climático regional ao longo de 21 anos, enfatizando meses atípicos e de maior potencial de estresse agroclimático.

2 METODOLOGIA

A região foco desta pesquisa é o Sudeste do Brasil — compreendendo os estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo — uma porção territorial estratégica para a agropecuária nacional, tanto em termos de área cultivada quanto de pecuária intensiva (IPEA, 2010; IBGE, 2024).

Esse recorte espacial se justifica por três razões principais: (i) alta participação produtiva no agronegócio brasileiro; (ii) considerável heterogeneidade fisiográfica e climática — desde planaltos costeiros até depressões interiores — que condiciona diferentes gradientes de temperatura e umidade; (iii) recorrência documentada de eventos extremos hidrotérmicos (secas prolongadas e ondas de calor) que afetam simultaneamente culturas e rebanhos (Marengo et al., 2017; Marengo et al., 2022; Silva et al., 2023).

Em termos agroclimáticos, o Sudeste apresenta relevo variado e regimes de precipitação influenciados tanto por frentes frias quanto por convecção tropical, o que, somado ao aquecimento global, favorece o surgimento de cenários de estresse térmico e hídrico.

A análise abrangeu o período de 2003 a 2023, com o objetivo de caracterizar o comportamento histórico dos extremos climáticos associados à seca e ao calor, bem como o risco agroclimático decorrente da sua interação. Para isso, foram utilizados dois índices



complementares: o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI-12) e o Índice de Temperatura e Umidade (ITU), amplamente empregados em estudos sobre estresse climático e impactos agropecuários (Thom, 1959; Buffington et al., 1981; Beguería et al., 2014; Marengo et al., 2017; Marengo et al., 2022; Silva et al., 2023; Andrade et al., 2023a,b).

O SPEI-12 foi obtido a partir da coleção “CSIC/SPEI/2_9” disponível no Google Earth Engine (GEE), que fornece dados mensais em resolução espacial de 0,5° (~50 km). O índice considera o balanço hídrico entre precipitação e evapotranspiração potencial, permitindo avaliar o grau e a persistência das secas meteorológicas. Para representar as condições mais críticas do período histórico, foram calculados os valores mínimos mensais (SPEI_min) entre 2003 e 2023. Essa opção metodológica deve-se ao caráter acumulativo do SPEI, cuja média tende a suavizar a intensidade dos eventos extremos, reduzindo a sensibilidade à detecção de secas severas (Beguería et al., 2014; Vicente-Serrano et al., 2010). Assim, a adoção do mínimo histórico permite preservar a representatividade dos episódios de maior déficit hídrico.

O Índice de Temperatura e Umidade (ITU) foi utilizado como indicador do conforto térmico animal, sendo calculado conforme a equação abaixo proposta por Buffington et al. (1977), também empregada em estudos recentes de espacialização agroclimática no Brasil (Soares et al., 2021; Andrade et al., 2023a,b):

$$ITU = 0,8 Tbs + UR(Tbs - 14,3)/100 + 46,3$$

Em que Tbs é a temperatura de bulbo seco (°C) e UR a umidade relativa do ar (%).

A aplicação dessa metodologia permite avaliar a influência combinada da temperatura e da umidade no conforto térmico de animais de produção, sendo amplamente adotada em pesquisas voltadas à pecuária leiteira em regiões tropicais.

Os valores foram classificados conforme os limites de conforto térmico e as classes de interpretação foram definidas conforme Kemer et al. (2020) e Soares et al. (2021):



Tabela 1

Classificação do Índice de Temperatura e Umidade

Faixa de ITU	Classificação
$ITU < 72$	Conforto térmico
$72 \leq ITU < 78$	Alerta
$78 \leq ITU < 82$	Perigo
$ITU \geq 82$	Emergência

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os mapas de ITU foram espacializados com base na interpolação pela quarta potência da distância, método que apresentou melhor desempenho na redução de artefatos espaciais segundo Soares et al. (2021). O cálculo foi realizado diretamente no GEE, com os dados mensais de ERA5-Land, e os resultados foram exportados para o QGIS 3.30 para interpolação e mapeamento das zonas de risco térmico. Ademais, foi determinado o percentil 95 (ITU_P095), que representa os 5% de maior estresse térmico. Essa abordagem permite caracterizar as condições mais severas de calor em cada mês, refletindo o potencial de desconforto térmico extremo sobre organismos vivos e sistemas produtivos (Buffington et al., 1981; Silva et al., 2023).

Os dados de SPEI e ITU foram padronizados espacialmente quanto à resolução e extensão geográfica, assegurando comparabilidade entre os conjuntos. Em seguida, procedeu-se à normalização dos valores em escala de 0 a 1, a fim de integrar ambos os índices em uma métrica única de risco climático composto. A ponderação atribuída foi de 0,6 ao ITU, pela predominância do efeito térmico sobre a fisiologia animal, e de 0,4 ao SPEI, representando o componente de seca conforme a equação a seguir.

$$ICR = (0,6 \times ITU_{norm}) + (0,4 \times (1 - SPEI_{norm}))$$

Em que o SPEI foi invertido ($1 - SPEI_{norm}$) para que valores negativos — associados a condições de déficit hídrico — correspondessem ao índice de risco elevado.

Os produtos derivados incluíram painéis mensais do ITU P095, do SPEI mínimo e máximo histórico e do índice de risco climático composto, totalizando 48 mapas referentes ao período 2003–2023. A representação cartográfica foi realizada em ambiente R, utilizando o pacote ggplot2, com paletas cromáticas padronizadas: “YlOrRd” para o ITU (de amarelo a



vermelho, indicando aumento do estresse térmico) e “BrBG” invertida para o SPEI (de azul a marrom, indicando intensificação da seca).

Os resultados foram apresentados em painéis facetados mensais, que permitem visualizar a sazonalidade dos riscos climáticos e identificar meses atípicos de maior estresse agroclimático. Essa abordagem visa compreender a variabilidade intra-anual e destacar os períodos de sobreposição de calor e seca, fundamentais para o planejamento de estratégias adaptativas no setor agropecuário do Sudeste do Brasil.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

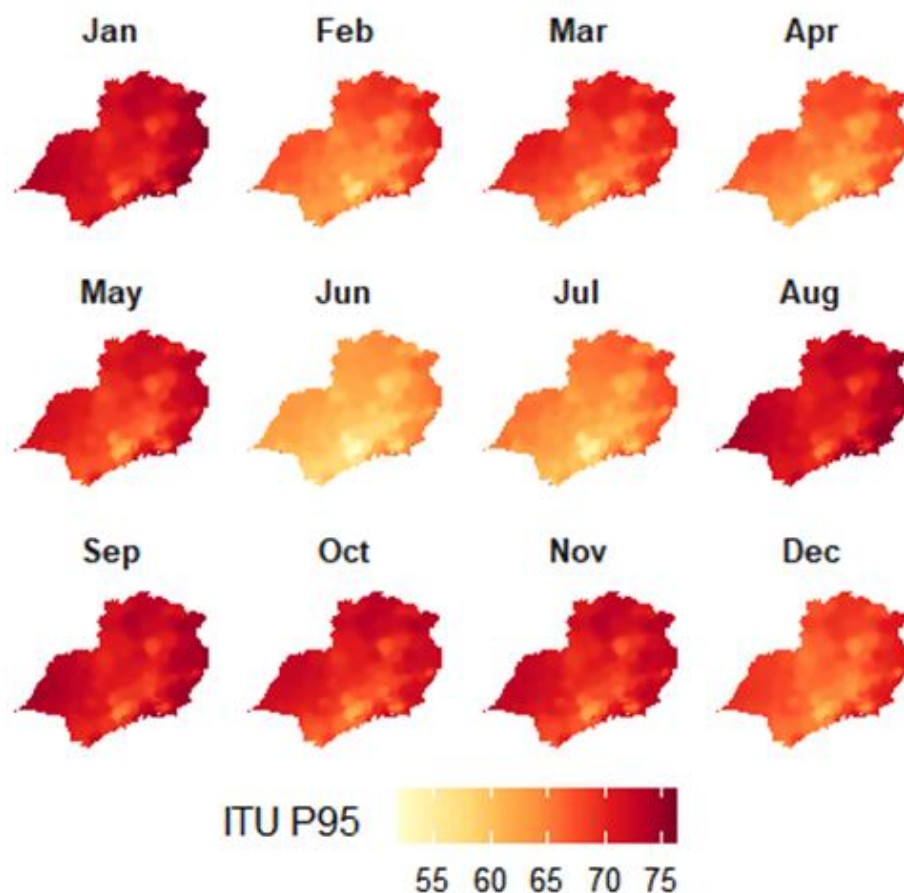
Os resultados obtidos a partir da integração dos índices ITU (P05) e SPEI mínimo histórico revelam uma configuração espacial e sazonal marcante dos riscos climáticos no Sudeste do Brasil ao longo do período de 2003 a 2023. A análise dos painéis mensais evidencia que os extremos de calor e seca ocorrem de forma recorrente em meses específicos, configurando padrões compostos de estresse agroclimático com implicações diretas sobre os sistemas produtivos da região.

A Figura 1 apresenta o Painel Mensal do ITU P095, que representa os 5% de maior estresse térmico registrados em cada mês do período histórico. O desconforto térmico é predominante entre os meses de setembro e março, contudo, eventos extremos também podem ocorrer nos meses de maio e agosto (Figura 1). De forma geral, os valores mais elevados de ITU foram observados sobre o norte de Minas Gerais, o Triângulo Mineiro, o Vale do Paraíba e a região Noroeste de São Paulo. Nessas áreas, o ITU frequentemente ultrapassa os limites críticos de perigo para os bovinos (Buffington et al., 1981; Silva et al., 2023). A persistência de ITU elevado durante a primavera e o verão coincide com o avanço das massas de ar quente e seco, que reduzem a umidade relativa e ampliam o estresse térmico, sobretudo em regiões de baixa altitude e forte continentalidade.



Figura 1

Painel mensal do Índice de Temperatura e Umidade (ITU, percentil 95) no Sudeste do Brasil (2003–2023).



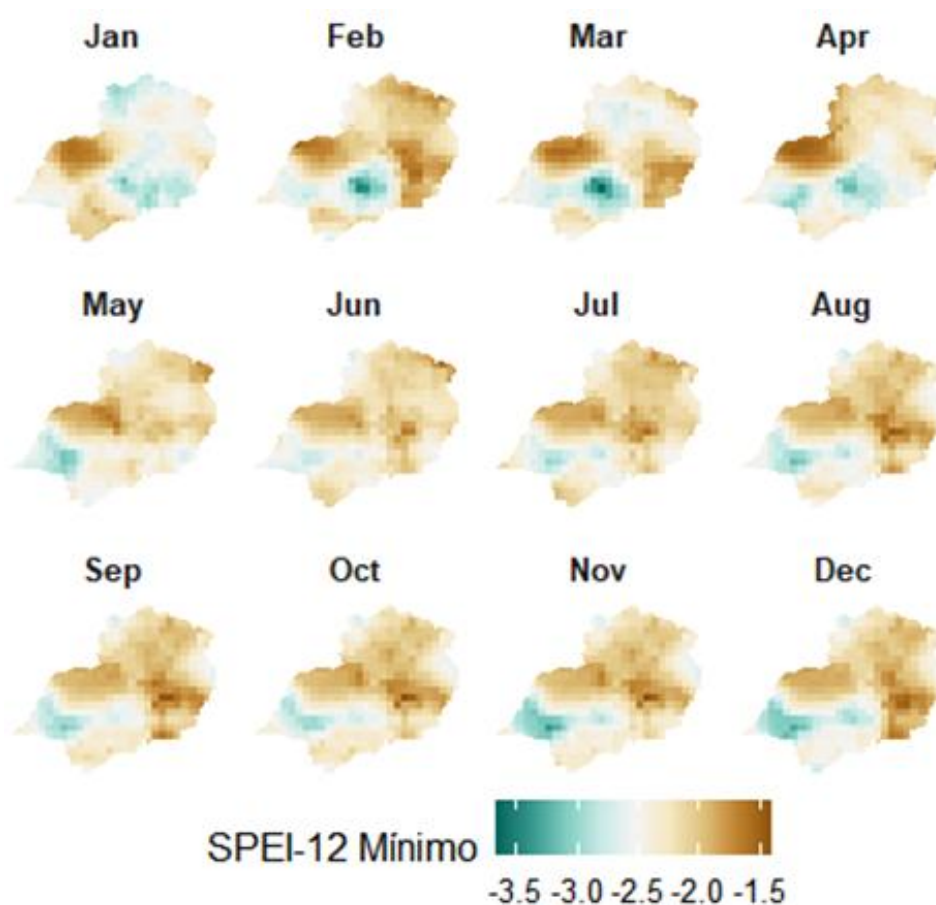
Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados do INMET.

A Figura 2 mostra o Painel Mensal do SPEI mínimo histórico (SPEI_min), o qual indica os episódios mais severos de déficit hídrico no período analisado. O SPEI-12 mínimo apresenta valores inferiores a -1,5 em amplas áreas do interior paulista, Centro-Norte de Minas Gerais e região do Vale do Rio Doce, refletindo condições de seca extrema persistente. Esses resultados são coerentes com os registros de seca regional entre 2014 e 2015, amplamente documentados por Marengo et al. (2015) e Cunha et al. (2019), e reforçam a ocorrência de períodos críticos em que as anomalias de precipitação e evapotranspiração se combinam para reduzir significativamente a disponibilidade hídrica no solo.



Figura 2

Painel mensal do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI-12) mínimo histórico no Sudeste do Brasil (2003–2023).



Fonte: Elaborado pelos autores a partir da coleção CSIC/SPEI/2_9 (2003–2023).

Durante setembro e outubro, observa-se a sobreposição de altos valores de ITU e mínimos de SPEI (Figuras 1 e 2), caracterizando o fim da estação seca e o início do aquecimento atmosférico. Nesses meses, há uma redução drástica da umidade relativa e da cobertura de nuvens, o que intensifica o estresse térmico sobre pastagens e lavouras de sequeiro, especialmente no Oeste Paulista e Norte Mineiro (Silva et al., 2023).

Nos meses de dezembro a fevereiro, embora as chuvas aumentem, o acúmulo de calor e a manutenção de temperaturas elevadas, associadas à alta umidade, produzem condições de calor úmido extremo, agravando o desconforto térmico dos bovinos. Essa configuração é especialmente problemática para a pecuária leiteira e de corte, pois reduz a ingestão alimentar, comprometendo a produtividade (Buffington et al., 1981; Silva et al., 2023).

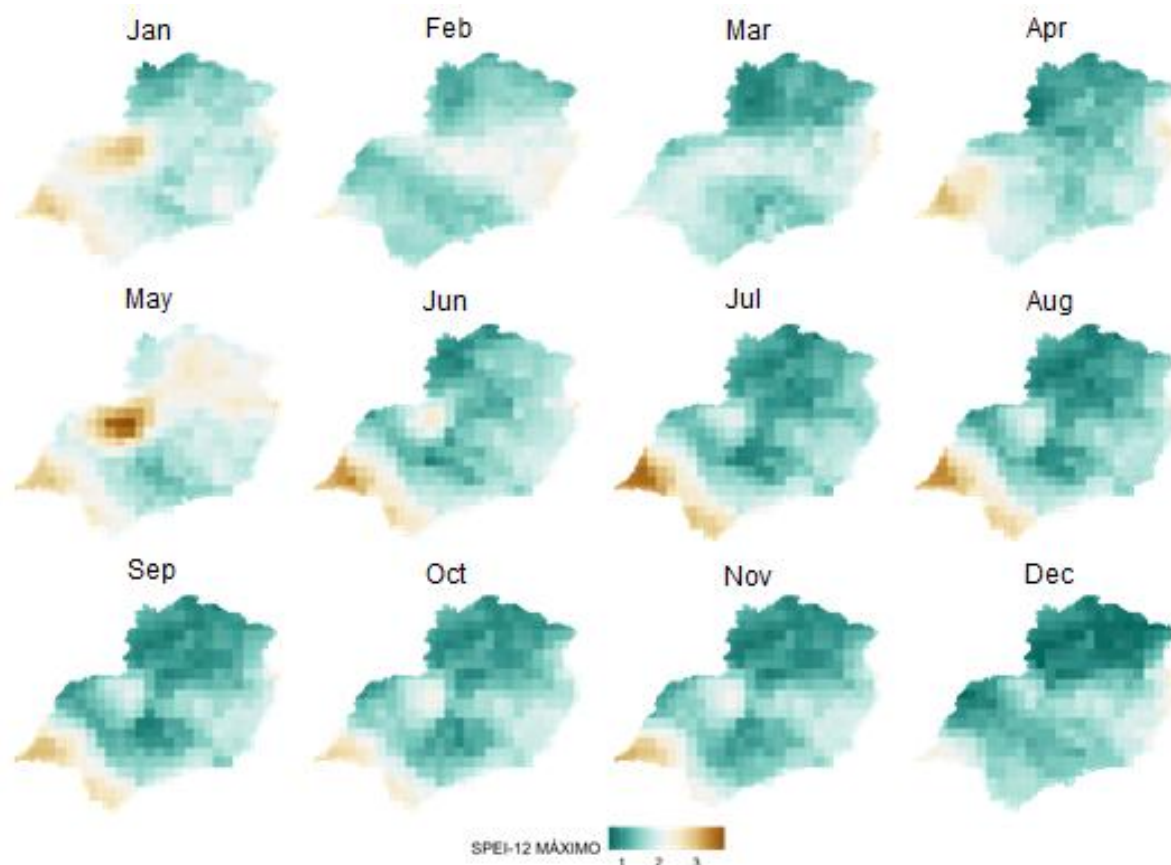
A análise dos máximos históricos do SPEI-12 (Figura 3) revelou que, embora o Sudeste do Brasil seja caracterizado por uma sazonalidade bem definida, com chuvas concentradas entre



novembro e março, eventos de excedente hídrico tornaram-se mais frequentes e intensos em determinados meses ao longo do período de 2003 a 2023. Esses eventos refletem anomalias positivas de precipitação e evapotranspiração reduzida, o que resulta em altos valores do SPEI, sobretudo em áreas de relevo acidentado e nas proximidades da Serra da Mantiqueira e da Zona da Mata Mineira. Esses resultados corroboram as tendências observadas por Marengo et al. (2017), Marengo et al. (2022) e Silva et al. (2023), que apontam para um aumento da variabilidade intra-anual das chuvas, com alternância de períodos de seca e excesso hídrico em um mesmo ciclo agrícola.

Figura 3

Máximos históricos mensais do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI-12) para o Sudeste do Brasil (2003–2023).



Fonte: Elaborado pelos autores a partir da coleção CSIC/SPEI/2_9 (2003–2023).

Tais condições de excesso de precipitação trazem desafios para o setor agropecuário, como alagamentos, compactação do solo e aumento da incidência de patógenos fúngicos, especialmente em áreas de pastagens e cultivo de grãos. Conforme discutido por Beguería et al. (2014) e IPCC (2023), o SPEI máximo complementa a interpretação do risco climático por



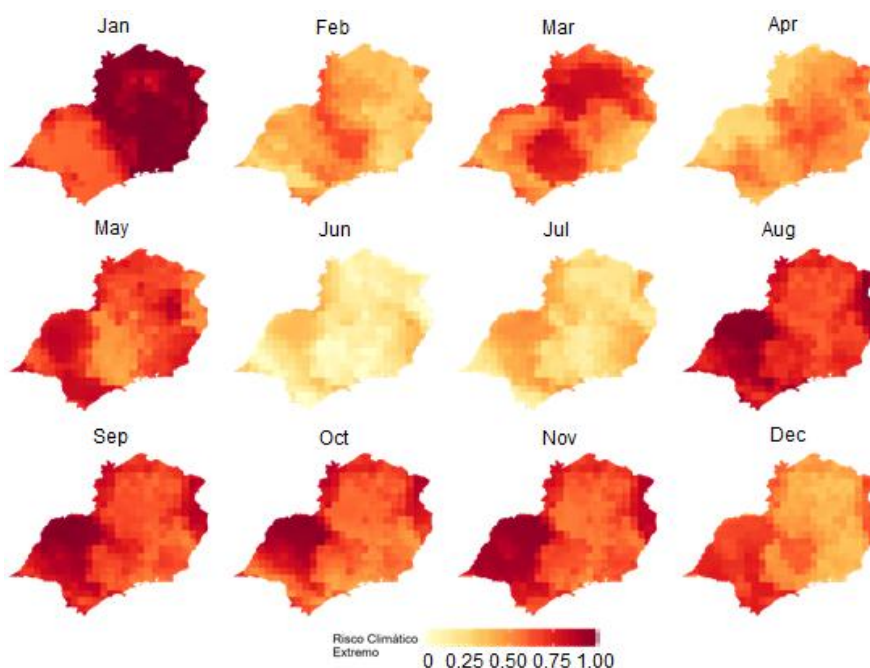
evidenciar eventos opostos aos de seca extrema, mas igualmente críticos à produção agrícola, principalmente em sistemas não adaptados à drenagem ou manejo de umidade.

Ao integrar os resultados do SPEI máximo e mínimo, observa-se um gradiente espacial de vulnerabilidade dupla: áreas do norte de Minas Gerais e do oeste paulista apresentam maiores extremos de seca (SPEI mínimo), enquanto o leste paulista, sul de Minas e faixa litorânea tendem a registrar maiores valores de SPEI máximo, denotando eventos compostos de seca e umidade em distintas escalas temporais. Essa dualidade reforça a importância de adotar estratégias agroclimáticas regionais que contemplem tanto a escassez quanto o excesso hídrico, uma vez que ambos afetam a resiliência produtiva e a segurança alimentar. Conforme ressaltam Marengo et al. (2017), Cunha et al. (2019) e Marengo et al. (2022), a coexistência desses extremos evidencia o avanço das mudanças climáticas regionais e a necessidade de aprimorar os sistemas de alerta precoce e manejo adaptativo no Sudeste brasileiro.

A Figura 4 sintetiza o Painel do Risco Climático Integrado, derivado da combinação ponderada dos índices ITU (0,6) e SPEI (0,4). O mapa evidencia a expressiva coincidência espacial entre o estresse térmico e o déficit hídrico, sobretudo nos meses de setembro a novembro, quando a vulnerabilidade agroclimática atinge seu ápice.

Figura 4

Índice de risco climático agropecuário integrado (ITU P95 + SPEI mínimo) para o Sudeste do Brasil (2003–2023).



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).



Os maiores valores de risco são observados no Noroeste Paulista, parte do Triângulo Mineiro, Centro-Norte Mineiro, Zona da Mata, Vale do Rio Doce e Norte do Espírito Santo (Figura 4). Essas áreas apresentam sazonalidade marcada, com longos períodos secos intercalados por curtos episódios de chuva convectiva, o que dificulta o manejo hídrico e aumenta o risco de perda de produtividade agrícola (Marengo et al., 2015).

Os padrões observados reforçam o papel das ondas de calor e das secas compostas como vetores de vulnerabilidade climática no Sudeste. O aumento da frequência e da persistência desses eventos, identificado em diferentes estudos (Marengo et al., 2017; Marengo et al., 2022; Silva et al., 2023; IPCC, 2023), evidencia uma tendência de intensificação das anomalias simultâneas de temperatura e umidade, coerente com o avanço do aquecimento global.

Do ponto de vista agropecuário, a ocorrência desses eventos compostos de calor e seca exige adaptações tecnológicas e de manejo, como o uso de cultivares tolerantes ao estresse hídrico, sombreamento em sistemas pecuários, plantio direto e monitoramento climático em tempo real. A implementação de estratégias de gestão adaptativa do risco climático é fundamental para reduzir as perdas econômicas e preservar a sustentabilidade produtiva no contexto das mudanças climáticas (Pinto et al., 2008; IPCC, 2023).

Por fim, os resultados aqui apresentados evidenciam a importância de utilizar índices climáticos integrados na análise de risco agropecuário. O uso do SPEI mínimo, em vez da média, mostrou-se mais eficaz para captar a variabilidade dos extremos de seca, evitando a suavização dos eventos mais severos — uma limitação comum a índices acumulativos. De forma análoga, o ITU P05 destacou os episódios de calor extremo com elevada representatividade espacial, permitindo uma leitura mais precisa das condições de desconforto térmico.

Assim, a integração entre SPEI mínimo e ITU P05 se mostrou uma abordagem metodológica robusta para a caracterização do risco climático composto no Sudeste brasileiro, especialmente em análises históricas onde os eventos críticos não se limitam a anos isolados, mas se distribuem de forma irregular ao longo das décadas.

5 CONCLUSÃO

A análise integrada dos índices ITU (percentil 95) e SPEI-12 mínimo histórico permitiu caracterizar de forma abrangente os padrões sazonais e espaciais de risco climático agropecuário no Sudeste do Brasil entre 2003 e 2023. Os resultados indicam que a combinação de calor e seca constitui o principal fator de vulnerabilidade climática da região, com impacto direto sobre a produção agrícola e pecuária. As áreas mais afetadas incluem o Noroeste Paulista,



parte do Triângulo Mineiro, o Centro-Norte de Minas Gerais, a Zona da Mata, o Vale do Rio Doce e o Norte do Espírito Santo, que apresentaram os maiores valores do índice composto de risco climático.

A metodologia adotada demonstrou elevada eficiência para representar os extremos climáticos regionais. O uso do percentil 95 do ITU possibilitou identificar os episódios de calor mais severos, enquanto o mínimo histórico do SPEI preservou a detecção das secas extremas, evitando a suavização decorrente do caráter acumulativo do índice. Essa abordagem, associada à normalização e integração ponderada dos indicadores, resultou em um diagnóstico robusto dos riscos compostos, adequado para estudos de vulnerabilidade e adaptação.

A consolidação de estratégias de adaptação climática deve considerar a incorporação de cultivares e raças adaptadas, práticas de manejo conservacionista, sombreamento e ventilação em sistemas pecuários, irrigação eficiente, além do uso contínuo de ferramentas de monitoramento climático e geotecnologias. Nesse contexto, a integração entre indicadores climáticos e geoprocessamento, como a aplicada neste estudo, representa uma ferramenta valiosa para a formulação de políticas públicas e o planejamento agroclimático sustentável em nível regional. Portanto, este trabalho reforça a relevância de abordagens integradas e multiescalares na análise de riscos climáticos compostos, contribuindo para a compreensão da dinâmica de extremos climáticos no Sudeste do Brasil e oferecendo subsídios técnicos à resiliência produtiva e territorial frente às mudanças climáticas globais.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida a primeira autora e à Embrapa Gado de Leite, no âmbito dos projeto ZOPEC-LEITE (SEG: 10.19.03.064.00.00).



REFERÊNCIAS

- Angelotti, f., Giongo, v., Lima, c. E. P., Flumignan, d. L., Gondim, r. S., Pezzopane, j. R. M., Oliveira, p. P. A., bettiol, w., pellegrino, g. Q., Pereira, F. de M. (2025). *Monitoramento de risco, adaptação e sustentabilidade da agricultura nacional*. In: Pellegrino, G. Q., Mozzer, G. B., Angelotti, F., Macario, C. G. do N., Zanatta, J. A., Martin NETO, L., Madari, B. E., Silva, M. A. S. Da, Matsuura, M. I. da S. F., Duarte, J. A. M. (ed.). *Ciência para o clima e soluções da agricultura brasileira: estratégias, tecnologias e indicadores de adaptação à mudança climática e de controle de emissões de gases de efeito-estufa na agricultura tropical*. Brasília, DF: Embrapa, Cap. 2, p. 49-80. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1181243>>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- Andrade, r. G., Garcia, l. C. S., hott, M. C., Magalhães Junior, w. C. P., Peixoto, M. G. C. D., costa, C. N., pires, M. F. Á., Santana Júnior, m. L., Bruneli, f. A. T., Carvalho, g. R. (2023a). Zoneamento dos efeitos do estresse térmico em vacas leiteiras no Sudeste do Brasil. *Contemporânea – Revista de Ética e Filosofia Política*, 3, 29977-29991.
- Andrade, r. G., garcia, l. C. S., hott, m. C., magalhaes junior, w. C. P., peixoto, m. G. C. D., pires, m. F. A., facco, a. G. (2023b). Análise e disponibilização de mapas mensais do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) para o Sudeste do Brasil. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6, 560-568.
- Beguería, s., Vicente-Serrano, s. M., Reig, f., Latorre, b. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34 (10), 3001-3023. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Buffington, d. E., Colazzo-Arocho, a., Canton, g. H., pitt, d., Thatcher, w. W., Collier, r. J. (1981). Black globe-humidity index (BGHI) as a comfort equation for dairy cows. *Transactions of the ASAE*, 24 (3), 711-714. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.34325>
- Bunffington, d. E.; Collazo-Arocho, a.; CANTON, g. H.; Pit, d.; Thatcher t, w. W.; Collier, r. J. (1977). Black globe-humidity confort index for dairy cows. *St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers*, 19p. (paper 77-4517).
- Cunha, a. P. M. A., Zeri, m., Deusdará leal, k., Costa, l., Cuartas, l. A., Marengo, j. A., Tomasella, j., Vieira, r. M., Barbosa, a. A., Cunningham, c., Garcia, j. V., Brodelet, e., Alvalá, r., Ribeiro-neto, G. (2019). Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, 10(11), 642. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção Agrícola Municipal e Pesquisa da Pecuária Municipal*. (2024). Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- IPCC. Climate Change (2023). *Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>. Acesso em: 11 nov. 2025.



- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2010). *Base de dados regionais e setoriais: indicadores socioeconômicos e agropecuários*. Brasília: IPEA. Disponível em: <<https://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- Kemer, a., Glienke, c. L., Bosco, l. C. (2020). Índices de conforto térmico para bovinos de leite em Santa Catarina Sul do Brasil. Brazil. *Brazilian Journal of Development*, 6(5), 29655–29672. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-426>.
- Marengo, j. A., Galdos, M. V., Challinor, a., Cunha, a. P., Marin, f. R., Vianna, m. D. S., Alvala, r. C. S., Alves, l. M., Moraes, o. L., Bender, f. (2022) Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. *Climate Resilience and Sustainability*, 1, e17. <https://doi.org/10.1002/cli2.17>
- Marengo, j. A., Nobre, c. A., Seluchi, m. E., Cuartas, a., Alves, l. M., Mendiondo, e. M., Obregón, g., Sampaio, g. (2015). A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP*, São Paulo, Brasil, 106, 31-44. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44.
- Marengo, j. a., Torres, r. r., Alves, l. m. (2017). Drought in Northeast Brazil - past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129, 1189-1200. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>
- Pinto, h. S., Assad, e. D., Zullo Junior, j., Evangelista, s. R. M., Otaviano, a. F., Ávila, a. M. H. De, Evangelista, b. A., Marin, f. R., Macedo Junior, C., Pellegrino, g. q., Coltri, p. P., Coral, g. (2008). *Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil*. Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária: Unicamp. (pp. 18-23). Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/9673>>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- Silva, w. C., Printes, o. V. N., Lima, d. O., Silva, é. B. R., Santos, m. R. P., Camargo Júnior, r. N. C., Barbosa, a. V. C., Silva, j. A. R., Silva, a. G. M., Silva, l. K. X., Araújo, c. V., Britto, e. N., Lourenço-júnior, j. B. (2023). Evaluation of the temperature and humidity index to support the implementation of a rearing system for ruminants in the Western Amazon. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1198678. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1198678>
- Soares, l. C., Andrade, r. G., Hott, m. C., Magalhães Júnior, w. C. P. (2021). *estimativa e espacialização do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) na Região Sudeste do Brasil*. In: PASSOS, L. P. (ed.). *Coletânea de Iniciação Científica da Embrapa Gado de Leite- PIBIC CNPq 2020-2021*. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1134689>>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- Thom, e. C. (1959). The discomfort index. *Weatherwise*, 12 (2), 57-61. DOI: <https://doi.org/10.1080/00431672.1959.9926960>
- Vicente-Serrano, s. M., Beguería, s., López-Moreno, j. I. (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Journal of Climate*, 23 (7), 1696-1718. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>



Zscheischler, j., Martius, o., Westra, s., Bevacqua, e., Raymond, c., Horton, r. M., Van DEN hurk, b., aghakouchak, a., Jézéquel, a., Mahecha, m. D., Maraun, d., Ramos, a. M., ridder, n., thiery, w., vignotto, e. (2020). A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(7), 333-347. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z>