

ESTIMANDO LIMIARES DE VEGETAÇÃO PARA ESTRESSE TÉRMICO COM RISCO DE VIDA A PARTIR DE COMPUTAÇÃO EM NUVEM

Estimating Vegetation Thresholds for Life-Threatening Heat Stress Using Cloud Computing

Luigi Paiva

Universidade Federal do Ceará, Brasil

luigipaiva@protonmail.com

Recebido: 08/06/2026

Aceito: 25/08/2026

Resumo

As mudanças climáticas ganham destaque no debate público, e a mudança na cobertura vegetal se destaca entre seus vetores por seu impacto no microclima regional e, consequentemente, na habitabilidade humana em áreas tropicais e semiáridas. Pensando nisso, o objetivo deste trabalho foi analisar a dinâmica térmica da região do Nordeste do Brasil (NB) em função da perda de vegetação e estimar os limites de perda da cobertura vegetal que representam risco à vida humana. Foi utilizada a plataforma Google Earth Engine (GEE) para integrar dados das coleções ERA5-Land e Mapbiomas no intervalo de 1985 a 2024, calculando o Índice de Bulbo Úmido e Termômetro de Globo (WBGT) a partir de variáveis climáticas, os quais foram submetidos aos testes de Mann-Kendall e de inclinação de Sen e à correlação de Pearson. Os resultados indicaram que a cobertura vegetal caiu de 85321.54 ha para 70484.83 ha ao longo do período de estudo, representando uma perda de 17.38%, com tendência de perda de 44.277 ha/ano, acompanhada de um aquecimento de 0.013°C/ano. Cenários obtidos por extrapolação linear sugerem que, mantida a atual taxa de degradação, a região do NB deixaria a classificação atual de “sem estresse térmico” para “leve” em 2218 (-12.124% de cobertura vegetal), “moderado” em 2383 (-22.551%), “alto” em 2511 (-30.592%), “forte” em 2631 (-38.13%) e “extremo” em 2714 (-43.344%). O limiar fisiológico crítico à vida humana seria alcançado com a perda de 61,31% da cobertura vegetal regional. Os resultados quantificaram o impacto da supressão vegetal no WBGT do NB e fornecem subsídio técnico para políticas de mitigação.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, mudanças climáticas, Habitabilidade humana.

Abstract

Climate change is gaining prominence in public discourse, and changes in vegetation cover stand out as a key driver because they affect regional microclimates and, consequently, human habitability in tropical and semi-arid regions. With this in mind, this study aimed to analyse the thermal dynamics of Northeast Brazil (NB) in relation to vegetation loss and to estimate the vegetation-loss thresholds that pose a risk to human life. We used the Google Earth Engine (GEE) platform to integrate data from the ERA5-Land and MapBiomas collections spanning 1985 to 2024. The Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) index was

calculated from climatic variables, and the data were subjected to Mann-Kendall tests, Sen's slope estimation, and Pearson correlation analysis. Results showed that vegetation cover declined from 85,321.54 ha to 70,484.83 ha over the study period, a loss of 17.38%, with a loss rate of 44.277 ha/year and a warming trend of 0.013°C/year. Scenarios derived from linear extrapolation suggest that, if current degradation rates persist, the NB region would shift from its current "no thermal stress" classification to "mild" stress in the year 2218 (-12.124% vegetation cover), "moderate" in 2383 (-22.551%), "high" in 2511 (-30.592%), "severe" in 2631 (-38.13%), and "extreme" in 2714 (-43.344%). The critical physiological threshold for human life would be reached upon the loss of 61.31% of regional vegetation cover. These findings quantify the impact of vegetation loss on WBGT in the NB region and provide a technical basis for mitigation policies.

Keywords: Remote sensing, climate change, human habitability.

1. INTRODUÇÃO

Mudanças na cobertura vegetal são parte chave na compreensão das mudanças climáticas, haja vista seu papel tanto no albedo quanto na evapotranspiração (ET) (Prevedello *et al.*, 2019). Apesar do seu papel, nas últimas décadas foram observadas rápidas mudanças na cobertura vegetal e no solo, especialmente em regiões tropicais por conta do desmatamento em larga escala (Wan Mohd Jaafar *et al.*, 2020).

Dentre as consequências para o desmatamento, o aquecimento local é talvez uma das mais preocupantes, que em regiões tropicais, se traduz na estabilização do aumento da temperatura regional (Li *et al.*, 2016). Dentre as regiões incluídas nesse contexto, o Brasil se destaca pelo seu complexo ecossistema e dinâmica geográfica, o que possibilita observar os impactos da mudança do uso e ocupação do solo na alteração do ciclo da água, da energia, do carbono e do clima (Franco *et al.*, 2025).

O aumento da temperatura ocorre com a queda da área vegetal, há o aumento da advecção horizontal de temperatura próxima a superfície, a qual é compensada pela maior variabilidade no fluxo de calor sensível na superfície (Ge *et al.*, 2022). Além disso, a perda da vegetação impacta diretamente no ciclo climático porque sua ausência ocasiona uma queda na capacidade de interceptação da água (Silva, Lopes, Santos, 2020). A diminuição dessa capacidade potencializa a perda da água para a atmosfera a medida que a incidência de radiação sobre o solo exposto.

Com isso, esse problema não se limita apenas a impactos ambientais, surge diante disso, a preocupação sobre a capacidade de habitabilidade humana em regiões de crescimento térmico (Jendritzky, Tinz, 2009). Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), o estresse térmico é uma das principais causas de mortes relacionadas ao clima,

além disso, segundo a literatura atual, limites de temperatura interna próximos a 40 °C e 35 °C para temperatura da pele, representam uma ameaça a (Ebi *et al.*, WHO, 2026).

Nesse contexto, apesar da ampla defesa da hipótese de que a mudança da cobertura vegetal impacta na temperatura do Brasil e do mundo, pouco se fala de até que ponto é possível abdicar regulação térmica promovida pela mudança na cobertura vegetal em prol da extração de recursos vegetais. Para auxiliar em estudos desse escopo, diversas regiões do globo utilizam de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) na coleta de dados em largas escala espaço-temporais. No nordeste brasileiro essa escassez se agrava, haja vista que existe uma carência de trabalhos que integrem séries temporais de longo prazo, técnicas avançadas de processamento digital e métodos estatísticos robustos para avaliação dessas transformações e de seus impactos (Silva *et al.*, 2025; Schrijver, Hoekstra, Kleijn, 2025).

Dentre as abordagens as quais as ferramentas SIG podem ser utilizadas, ferramentas em nuvem se destacam pela sua capacidade de processamento de largas quantidades de dados, possibilitando uma análise espaço-temporal holística regional (Waleed, Sajjad, 2023). Ainda nesse contexto, as coleções ERA-5 se destaca pela disponibilidade de dados climáticos que contemplam a partir de reanálise dados de 1950, permitindo uma análise integrada. Além dela, há dados de larga escala espaço-temporal, como os da iniciativa MapBiomas, que permitem a extração de dados desde o século passado, até o período atual (Souza *et al.*, 2020). Isso permite a captura de mudanças de padrões hidroclimático e de mudanças da cobertura do solo ao longo de largas escalas temporais (Kumar, Mutanga, 2018).

Com isso, esse trabalho parte da hipótese de que a temperatura do Nordeste Brasileiro (NB) está em crescimento em função da perda da cobertura vegetal. Porém, a pergunta que fundamenta a hipótese deste trabalho é qual o limite da retirada de cobertura regional do NB até que o aumento da temperatura em função disso se torne uma ameaça ao bem estar humano da região. Por isso, o objetivo desse trabalho será analisar a dinâmica térmica da região Nordeste do Brasil em função da perda de cobertura vegetal local.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende NB, que é constituído pelos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe. A região é caracterizada por possuir um clima majoritariamente semiárido quente (BSh), de acordo

com a classificação Koppen, sendo marcada por elevadas temperaturas e uma distribuição de chuvas heterogênea que se concentra no verão (Paula, Magnago, Tagliaferre, 2025).

A região possui uma variação anual de precipitação no intervalo de 600 a 2000 mm (Uvo *et al.*, 1998). Além disso, a temperatura média anual da região varia entre 22 a 26 °C e há um domínio fitogeográfico da Caatinga que se encontra entre as isoietas de 400 mm e 1800 mm, com alta sazonalidade, apresentando alta variedade espaço-temporal durante os períodos seco e chuvoso (Silva *et al.*, 2023). Abaixo na figura 1, se encontra um mapa representativo da região.

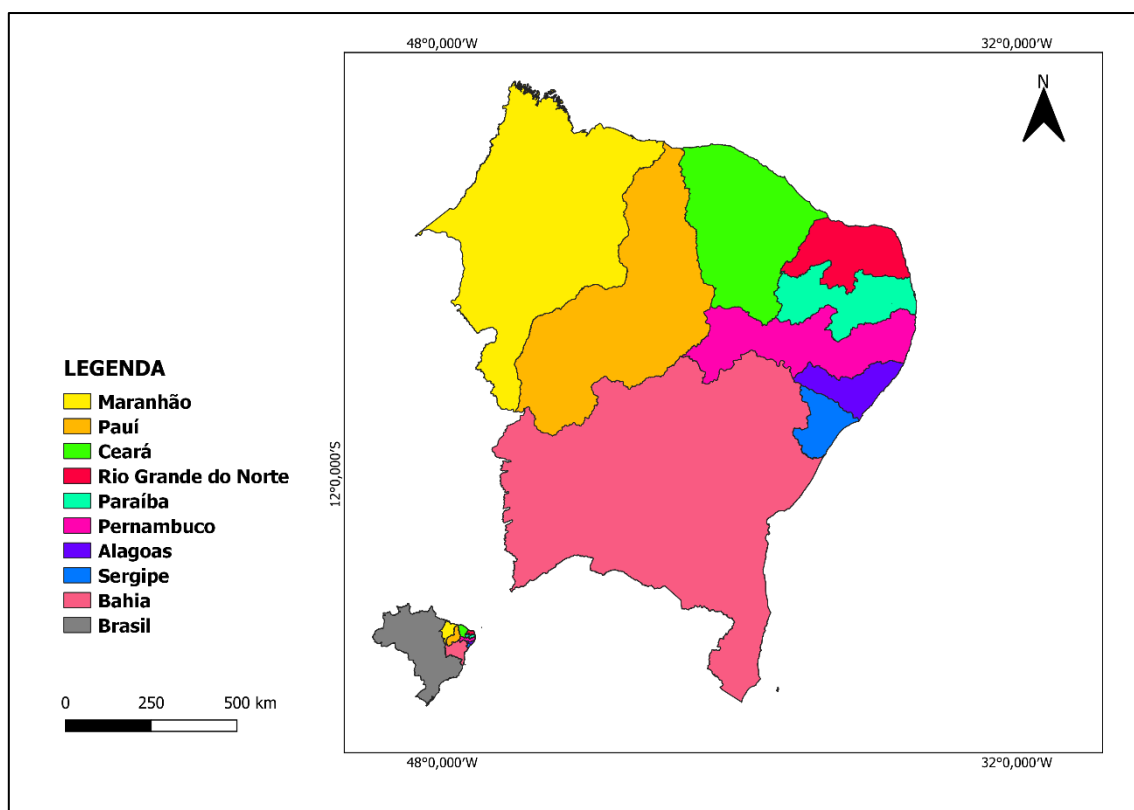


Figura 1 – Representação visual do Nordeste Brasileiro.

Fonte: Autor, 2026.

2.2. Processamento, preparação e aquisição de dados

O processamento dos dados ocorreu inteiramente na plataforma em nuvem Google Earth Engine (GEE), utilizando linguagem Javascript, sob o intervalo de tempo de 1985 a 2024, constituindo um total de 39 anos. A escolha do período ocorreu pela necessidade de alinhamento de dados entre diferentes coleções utilizadas. Além disso, foi utilizado a função redutora de camada media (.mean) pixel a pixel para estabelecer uma camada anual. As bases de dados utilizadas nesse estudo foram a ERA5-Land Monthly Aggregated (ERA5) e a MapBiomas Land Use and Land Cover, com resoluções espaciais de, respectivamente,

11.132 metros e 30 metros (Sabater, 2019; Souza *et al.*, 2020). Buscando uma uniformidade espacial dos dados, a coleção de dados da ERA5 foi reamostrada em uma grade de 30 metros.

As bandas de dados selecionada para este trabalho foi a temperatura (T_a) e umidade do ar até 2 m (temperatura do ponto de orvalho), velocidade do vento a 10 m (transferida ao nível de 2 m), pressão atmosférica, fluxo descendente e ascendente de radiação de ondas longas e curtas na superfície e radiação solar direta (SR). Esses dados foram selecionados com o intuito de calcular a temperatura de bulbo úmido normal (T_w), conforme a equação de Stull (2011) e a temperatura do Bulbo úmido e globo (WBGT), conforme Kong & Huber (2024). Além disso, também foram calculados a umidade relativa (UR%) a partir da equação de Magnus, aprimorada por Alduchov e Eskridge (1996) e a temperatura do globo (T_g) a partir do método de Hajizadeh *et al.* (2017). Abaixo, nas equações 1, 2, 3 e 4 se encontram os cálculos utilizados.

$$(1) UR\% = 100 * \left(\frac{\exp\left(\frac{(17.625 * T_d)}{(243.04 + T_d)}\right)}{\exp\left(\frac{(17.625 * T_a)}{(243.04 + T_a)}\right)} \right)$$

$$(2) T_w = T_a \operatorname{atan} \left[0.151977(RH\% + 8.313659)^{\frac{1}{2}} \right] + \operatorname{atan}(T_a + RH\%) \\ - \operatorname{atan}(RH\% - 1.676331) \\ + 0.00391838(RH\%)^{\frac{3}{2}} \operatorname{atan}(0.023101RH\%) - 4.686035$$

$$(3) T_g = 0.009624(SR) + 1.102(T_a) - 0.00404(SR) - 2.2776$$

$$(4) WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + T_a$$

A coleção de dados de uso e ocupação do solo foi feita mediante a seleção exclusiva das classes Floresta, Formação de reitor, Formação de savana, Mangue, Floresta alagável, Vegetação herbácea e arbustiva, Pântano, Vegetação de banco de areia arborizado e Vegetação herbácea de banco de areia. Todas as demais classes foram excluídas, haja vista que o objeto de estudo mira cobertura vegetal.

Para habitabilidade humana (HH), este trabalho irá considerar como limite superior de tolerância fisiológica humana, na temperatura de Bulbo (T_w), o valor de 35 °C. Esse valor foi selecionado porque uma vez que esse valor é superado, o mecanismo de resfriamento do corpo humano tem uma perda de eficiência, o que torna o local uma ameaça real a vida

humana (Raymond, Matthews, Horton, 2020). Para o WBGT, as métricas assumidas por Alves de Oliveira *et al.* (2021) e Grundstein *et al.* (2015) para risco a saúde humana foram consideradas neste estudo.

2.3. Análise de dados e modelagem

Os valores obtidos através das bases de dados foram também submetidos, no GEE, a uma análise de dados. As métricas selecionadas nesse estudo foram o teste de Mann-Kendall (MK) em sua versão aprimorada e inclinação de Sen (Mann, 1945; Kendall, 1975; Sen, 1968). O método de MK e inclinação Sen são testes não paramétricos utilizados para análise de tendências monotônicas ascendentes ou descendentes em séries históricas ambientais (Nabizada, Köylü, 2025). Além disso, as variáveis climáticas medidas serão submetidas a uma análise descritiva, servindo de subsídio para estudos futuros.

As variáveis foram submetidas a análise MK e inclinação Sen, com o intuito de medir tendências ascendentes ou descendentes das variáveis estudadas. É importante mencionar que considerando que a população humana do NE foi considerada como “aclimatada ao calor”, conforme o valor de referência explicado na seção anterior para valor de letalidade (35 °C). Além disso, também foram considerados os valores estabelecidos da ISO 7243 (1989) para pessoas aclimatadas ao calor. Os dados obtidos do teste de MK e inclinação Sen também foram submetidos a uma correlação de Pearson, com o objetivo de medir a capacidade de explicação da vegetação ao WBGT.

Por fim, a modelagem futura foi produzida com base em extrapolação linear centralizada, com finalidade de produzir mapas representativos a partir da equação $Y = mX + b$, onde Y é o ano da previsão, m é o índice de tendência obtida através do teste de MK com inclinação Sen, X é o ano da previsão e b é o ano final. Os anos alvos da modelagem foram anos de transição de classificação de áreas, conforme Grundstein *et al.* (2015).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Dinâmica histórica e alteração das variáveis (1985–2024)

A análise da região nordeste brasileira (NB) ao longo de 39 anos demonstraram uma clara transformação hidroclimática relacionada a modificação no uso do solo. O valor médio histórico de cobertura vegetal computado foi de 77952.14 ±4062.75 ha, apresentando uma queda contínua desde 1985, indo de 85321.54 ha até o mínimo de 70484.83 ha em 2024.

Isso indica uma perda de área percentual de 17.38% de cobertura ao longo do período analisado.

Simultaneamente a cobertura vegetal, foram detectados um aumento do aquecimento e do ressecamento. Ta apresentou uma média de 25.55 ± 0.45 °C, apresentando entre 1985 e 2024 um aumento percentual de 7.85%. A Tg exibiu um ganho térmico de 9.04% e valor médio de 25.55 ± 0.45 °C. Tw (27.08 ± 0.55 °C), WBTG (20.53 ± 0.20 °C) e UR% ($63.83 \pm 2.29\%$) apresentaram respectivamente, alterações percentuais de 2.17%, 4.44% e -12.59. Considerando o objeto principal de estudo, abaixo, na figura 2, se encontra um mapa representativo do WBGT médio do NB para o ano de 2024, sendo o mapeamento mais atual disponível, com base nos dados coletados.

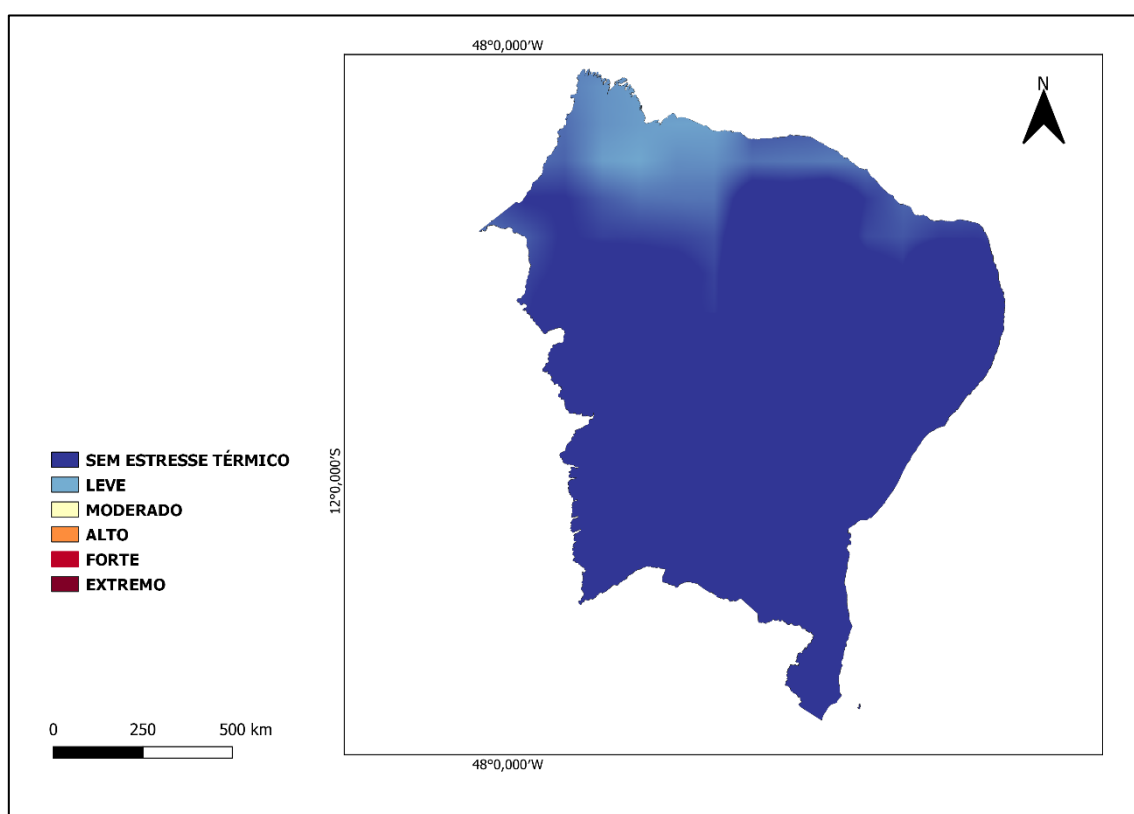


Figura 2 – Mapa representativo do WBGT médio para o ano de 2024.

Fonte: Autor, 2026.

3.2. Tendências estatísticas do estresse térmico e projeções futuras

A análise MK com inclinação Sen confirmou significância estatística da elevação do aquecimento regional em função da perda de vegetação. A tendência apresentada pela perda de cobertura foi de 44.277 ha/ano para um aumento de Ta e Tg, respectivamente de 0.025 °C/ano ($p < 0.05$, $R^2 = 0.29$) e 0.029 °C/ano ($p < 0.05$, $R^2 = 0.28$). A umidade relativa apresentou uma tendência de queda de 0.104%/ano, apesar da significância marginal de

p-valor = 0.08. O WGBT, que é a métrica central deste trabalho, apresentou uma tendência de ganho de $0.01\text{ }^{\circ}\text{C/ano}$ ($p < 0.005$, $R^2 = 0.26$). O Tw apresentou insignificância estatística, medindo 0.1 de p-valor e por isso, foi descartado da discussão.

Com base nas constantes de tendência de perda de cobertura vegetal, aplicadas a extrapolação linear das tendências, cenários futuros da região do NB foram estimadas. Atualmente, a região do NB se encontra, segundo Grundstein *et al.* (2015), classificada em sua totalidade como “Sem estresse térmico”, valor atribuído a regiões com WGBT médio inferior a $25.6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

No NB, com base nos resultados do teste de MK com inclinação Sen, os resultados sugerem que caso a tendência de perda de cobertura vegetal se mantiver, em 2218 haverá uma transição para a classe “leve”, haja vista que haverá se perdido 12.124% da cobertura regional. As classes seguintes ocorreriam nos anos de 2383 (-22.551%) para moderada, 2511 (-30.592%) para alta, 2631 (-38.130%) para forte e 2714 (-43.344%) para extremo. As estimativas apontam também que nesse mesmo contexto, no ano 3000, o valor de WGBT atingiria a marca média anual de $36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Abaixo na figura 3 se encontram os mapas das projeções.

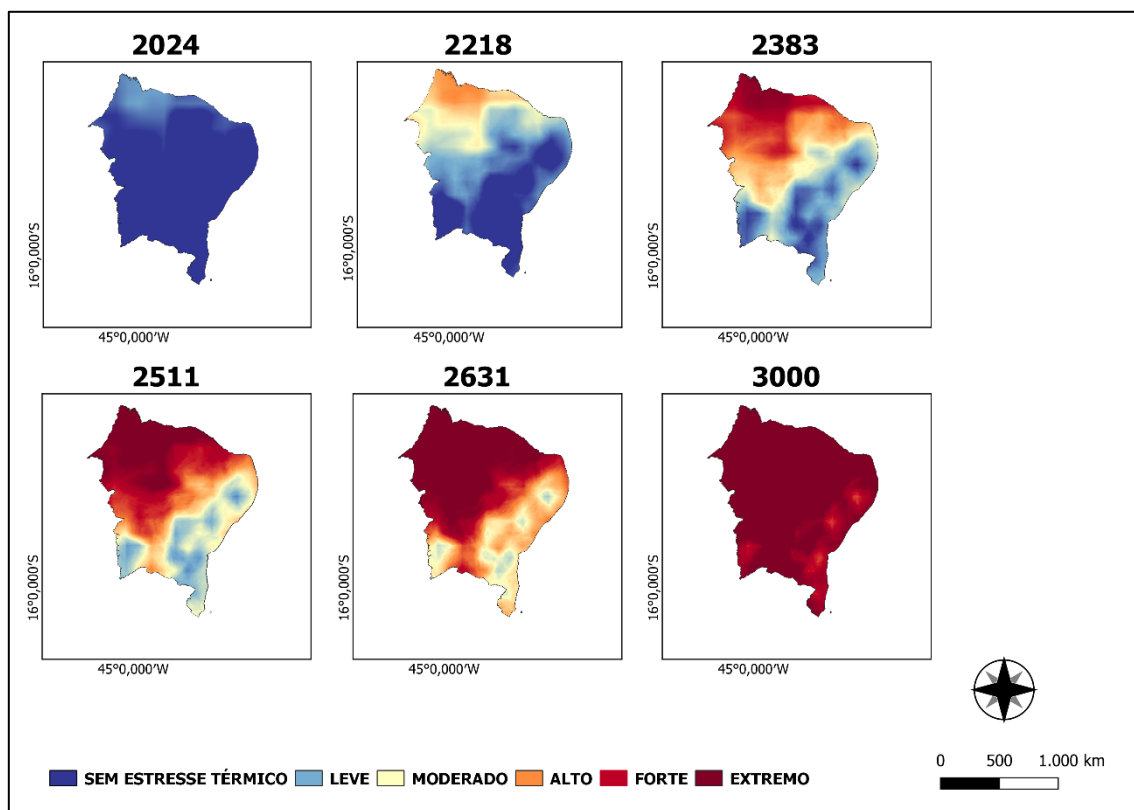


Figura 3 – Mapas de transição de classificação do WGBT do Nordeste brasileiro.

Fonte: Autor, 2026.

Os achados sugerem que com base na ISO7243 e em Alves de Oliveira *et al.* (2021), o limite fisiológico humano pode ser comprometido mediante a perda de 61.311% da cobertura vegetal. Isso sugere que no cenário atual, a longo prazo, a supressão vegetal, conforme praticada ao longo dos últimos 39 anos, representam um risco a longo prazo para a saúde humana.

3.3. Limitações de modelo

Apesar das projeções apresentadas neste trabalho sugerirem a existência de um risco crítico para as próximas décadas, é importante destacar que o modelo presente é baseado em extrapolação linear ($Y = mx + b$). Além disso, se baseia na taxa de supressão vegetal de -44.244 ha/ano e no aquecimento histórico obtido através da fonte de dados. A realidade climática não é linear e os valores obtidos podem ser potencializados por eventos adversos, como o El niño e o aumento exponencial da emissão de carbono a partir do solo degradado, por exemplo. Estudos considerando a heterogeneidade do padrão climático do nordeste brasileiro poderiam complementar este trabalho.

Além disso, os dados utilizados nesse estudo foram produtos de reanálise, o que segundo Sales *et al.* (2024), em cenários de ausência de dados observados, eles podem ser utilizados de forma segura, o que se alinha com a área de estudo desse trabalho. Entretanto, estudos direcionados ao mesmo tema se utilizando de dados de campo poderão possibilitar a captura de padrões específicos locais, permitindo a estruturação de estratégias direcionadas a áreas de menor escala.

Outra limitação presente se encontra na escala temporal. Este estudo considerou médias anuais devido a utilização da base de dados MapBiomas, que disponibiliza dados de uso e ocupação anuais sobre a extensão do território brasileiro. Estudos com menor escala temporal permitiriam observar que tipo de alterações a região passa ao longo do ano, haja vista que a região do nordeste brasileiro possui um regime hidrológico anual heterogêneo, com o período chuvoso se concentrando em quatro meses (fev-maio) (Uvo *et al.* 1998).

4. CONCLUSÃO

Inicialmente, este trabalho buscou validar a hipótese de que a cobertura vegetal possuía relação direta com a perda da cobertura vegetal para o nordeste brasileiro. Com base nos dados obtidos por meio tanto da correlação de Pearson, quanto na análise de Mann-Kendall, a hipótese foi corroborada. Além disso, a pergunta principal sobre o quanto

de dessa cobertura poderia ser suprimida antes que mudanças térmicas regionais representassem uma ameaça a saúde humana foi respondida. Com base nos valores obtidos a partir da extrapolação linear, para que a mudança térmica na região mude de uma zona sem problemas quanto ao valor médio de WBGT e passe a superar o limiar máximo da zona de conforto. Ainda nesse contexto, embora a modelagem sugira um cenário pessimista, sob um ponto de vista contraditório, é possível identificar zonas que embora agora não possuam dificuldades relativas ao WBGT médio, no futuro possivelmente terão, a exemplo do Maranhão, que segundo as projeções, é o primeiro e principal afetado por essas mudanças. Haja vista que todas as propostas deste estudo tenham sido provadas, espera-se com os resultados desse estudo fornecer, com base em um modelo reprodutível e escalável, subsídio técnico para formulação de políticas públicas e promover a disseminação de estudos sobre os impactos da supressão vegetal no impulsionamento das mudanças climáticas e nos seus impactos potenciais a saúde humana.

REFERÊNCIAS

- ALDUCHOV, O. A.; ESKRIDGE, R. E. Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure. **Journal of Applied Meteorology**, v. 35, p. 601-609, 1996.
- ALVES DE OLIVEIRA, B. F.; BOTTINO, M. J.; NOBRE, P.; NOBRE, C. A. Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. **Communications Earth & Environment**, v. 2, n. 1, p. 207, 2021.
<https://doi.org/10.1038/s43247-021-00275-8>
- EBI, K. L.; CAPON, A.; BERRY, P.; BRODERICK, C.; DE DEAR, R.; HAVENITH, G.; HONDA, Y.; KOVATS, R. S.; MA, W.; MALIK, A.; BORRIS, N. B.; NYBO, L.; SENEVIRATNE, S.; VANOS, J.; JAY, O. Hot weather and heat extremes: health risks. **The Lancet**, v. 398, n. 10301, p. 698-708, 2021.
- FRANCO, M. A.; RIZZO, L. V.; TEIXEIRA, M. J.; ARTAXO, P.; AZEVEDO, T.; LELIEVELD, J.; NOBRE, A. C.; POHLKER, C.; POSCHL, U.; SIMBO, J.; XU, X.; MACHADO, L. A. How climate change and deforestation interact in the transformation of the Amazon rainforest. **Nature Communications**, v. 16, n. 1, p. 7944, 2025.
<https://doi.org/10.1038/s41467-025-63156-0>
- GE, J.; LIU, Q.; ZAN, B.; LIN, Z.; LU, S.; QIU, B.; GUO, W. Deforestation intensifies daily temperature variability in the northern extratropics. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 5955, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33622-0>
- GRUNDSTEIN, A.; WILLIAMS, C.; PHAN, M.; COOPER, E. Regional heat safety thresholds for athletics in the contiguous United States. **Applied Geography**, v. 56, p. 55-60, 2015. [10.1016/j.apgeog.2014.10.014](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.10.014)

HAJIZADEH, R.; FARHANG DEHGHAN, S.; GOLBABAEI, F.; JAFARI, S. M.; KARAJIZADEH, M. Offering a model for estimating black globe temperature according to meteorological measurements. **Meteorological Applications**, v. 24, n. 2, p. 303-307, 2017. <https://doi.org/10.1002/met.1631>

ISO. ISO 11399: **Ergonomics of the thermal environment**: principles and application of international standards. Geneva: ISO, 1995.

JENDRITZKY, G.; TINZ, B. The thermal environment of the human being on the global scale. **Global Health Action**, v. 2, n. 1, p. 2005, 2009. <https://doi.org/10.3402/gha.v2i0.2005@zgha20.2009.2.issue-s3>

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. 4. ed. London: Charles Griffin, 1975. 202p.

KONG, Q.; HUBER, M. A new, zero-iteration analytic implementation of wet-bulb globe temperature: Development, validation, and comparison with other methods. **GeoHealth**, v. 8, n. 10, p. e2024GH001068, 2024. <https://doi.org/10.1029/2024GH001068>

KUMAR, L.; MUTANGA, O. Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1509, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10101509>

LI, Y.; DE NOBLET-DUCOUDRÉ, N.; DAVIN, E. L.; MOTESHARREI, S.; ZENG, N.; LI, S.; KALNAY, E. The role of spatial scale and background climate in the latitudinal temperature response to deforestation. **Earth System Dynamics**, v. 7, n. 1, p. 167-181, 2016. <https://doi.org/10.5194/esd-7-167-2016>

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, p. 245-259, 1945.

NABIZADA, M. J.; KÖYLÜ, Ü. Integrated remote sensing and machine learning approach for LST trend analysis and SUHI detection in the semi-arid climate of Kabul province using Google Earth Engine. **Sustainable Cities and Society**, p. 107087, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.107087>

PAULA, A.; MAGNAGO, L. F. S.; TAGLIAFERRE, C. Dinâmica do uso e ocupação da terra e seu efeito na temperatura e na precipitação no bioma Caatinga (Floresta Tropical Sazonalmente Seca)-Brasil. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 11, n. 1, p. 12-27, 2025. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID36618>

PREVEDELLO, J. A.; WINCK, G. R.; WEBER, M. M.; NICHOLS, E.; SINERVO, B. Impacts of forestation and deforestation on local temperature across the globe. **PLoS ONE**, v. 14, n. 3, p. e0213368, 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213368>

RAYMOND, C.; MATTHEWS, T.; HORTON, R. M. The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. **Science Advances**, v. 6, n. 19, p. eaaw1838, 2020.

SABATER, M. ERA5-land monthly averaged data from 1981 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). **Earth System Science Data**, v. 55, p. 5679, 2019.

SALES, E. G.; MATSUNAGA, W. K.; BRAGA, C. C.; SAKAMOTO, M. S.; LUCENA, D. B.; DE BRITO, J. B. Climate classification for Northeast Brazil using reanalysis data and the Absolute Aridity Index. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, p. 1478-1500, 2024.

SCHRIJVER, I.; BEHRENS, P.; HOEKSTRA, R.; KLEIJN, R. Inclusion of wellbeing impacts of climate change: a review of literature and integrated environment–society–economy models. **The Lancet Planetary Health**, 2025.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379-1389, 1968.

<https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

SILVA, J. L. B. D.; SILVA, M. V. D.; LOPES, P. M. O.; SANTOS, R. C.; CARVALHO, A. A. D.; MOURA, G. B. D. A.; SILVA, T. G. F.; BEZERRA, A. C.; JARDIM, A. M. R. F.; FERREIRA, M. B.; SILVA, P. C.; SILVA, J. A. O. S.; MESQUITA, M.; BATISTA, P. H. D.; JORDAN, R. A.; OLIVEIRA, H. F. E. D. Land Use and Land Cover Change Patterns from Orbital Remote Sensing Products: Spatial Dynamics and Trend Analysis in Northeastern Brazil. **Land**, v. 14, n. 10, p. 1954, 2025. <https://doi.org/10.3390/land14101954>

SILVA, J. L. B.; DE ALBUQUERQUE MOURA, G. B.; DA SILVA, M. V.; DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; JARDIM, A. M. D. R. F.; REFATI, D. C.; LIMA, R. C. C.; CARVALHO, A. A.; FERREIRA, M. B.; BRITO, J. I. B.; GUEDES, R. V. S.; LOPES, P. M. O.; NÓBREGA, R. S.; PANDORFI, H.; BEZERRA, A. C.; BATISTA, P. H. D.; JESUS, F. L. F.; SANCHES, A. C.; SANTOS, R. C. Environmental degradation of vegetation cover and water bodies in the semiarid region of the Brazilian Northeast via cloud geoprocessing techniques applied to orbital data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 121, p. 104164, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104164>

SILVA, R. M.; LOPES, A. G.; SANTOS, C. A. G. Deforestation and fires in the Brazilian Amazon from 2001 to 2020: Impacts on rainfall variability and land surface temperature. **Journal of Environmental Management**, v. 326, p. 116664, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116664>

SOUZA, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W.; OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIEIRA, J. L.; NETO, L. C.; SARAIVA, M. M.; VENDAS, M. H.; SALGADO, M. P.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>

STULL, R. Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 50, n. 11, p. 2267-2269, 2011.

<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0143.1>

UVO, C. B.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation. **Journal of**

Climate, v. 11, n. 4, p. 551-562, 1998. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<0551:TRBTPA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<0551:TRBTPA>2.0.CO;2)

WALEED, M.; SAJJAD, M. On the emergence of geospatial cloud-based platforms for disaster risk management: A global scientometric review of Google Earth Engine applications. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 97, p. 104056, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104056>

WAN MOHD JAAFAR, W. S.; ABDUL MAULUD, K. N.; MUHMAD KAMARULZAMAN, A. M.; RAIHAN, A.; MD SAH, S.; AHMAD, A.; SAAD, S. N. M.; AZMI, A. T. M.; SYUKRI, N. K. A. J.; RAZZAQ KHAN, W. The influence of deforestation on land surface temperature—A case study of Perak and Kedah, Malaysia. **Forests**, v. 11, n. 6, p. 670, 2020. <https://doi.org/10.3390/f11060670>

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Climate change, heat and health**. Geneva: World Health Organization, 2026. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health>. Acesso em: 31 jul. 2026.

Recebido: 08/06/2026

Aceito: 25/08/2026