ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DO ÍNDICE DE CALOR (HI) E SUA RELAÇÃO COM O USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO BRASIL (1961-2025)

Samuel Rodrigues de Lima. [1] ; Antônio Luigi Souza Carvalho [2]; Elis Ferreira Lopes [3]; José Micael Ferreira da Costa[4]; Cleiton da Silva Silveira [5]

Palavras-Chave – Uso e Ocupação do Solo[1], Índice de Calor[2], Desconforto Térmico[3].

INTRODUÇÃO

O uso e a ocupação configuram uma dinâmica humana que modifica a paisagem e, principalmente, a cobertura natural de um espaço. A substituição da vegetação nativa por áreas urbanas, agrícolas, pastagens ou terra nua reduz a regulação térmica do ambiente, altera a partição entre calor latente e sensível e favorece o aquecimento local (Fausto et al., 2016). Dessa forma, essas transformações impactam diretamente o microclima das regiões afetadas (Justino et al., 2025).

As mudanças climáticas e as alterações no uso do solo atuam de forma conjunta sobre o balanço energético da superfície. O aquecimento global, impulsionado sobretudo pela queima de combustíveis fósseis e liberação de gases de efeito estufa (GEE), associado à degradação territorial potencializa eventos extremos, como ondas de calor, secas e enchentes (Ebi et al., 2021). Essa elevação de temperatura coloca em risco a dinâmica dos ecossistemas, as espécies e a estabilidade climática.

Nesse contexto, a sensação térmica humana e os índices de calor tornam-se variáveis cruciais de análise devido ao forte impacto na saúde pública, uma vez que níveis elevados de desconforto disparam doenças dos sistemas circulatório e respiratório (Requia et al., 2024). Portanto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o Índice de Calor (Heat Index - HI) no Brasil, na série histórica entre 1961 e 2025, investigando sua relação com as modificações na cobertura terrestre.

METODOLOGIA

ÁREA DE ESTUDO

A área analisada é o perímetro territorial do Brasil, um país tropical, dividido em 5 regiões, cujos biomas e suas respectivas variáveis meteorológicas variam e se relacionam de forma diferente entre si. As regiões observadas de maior foco da ocorrência dos índices se referem ao Norte e Nordeste do Brasil. Em tais regiões predominam os biomas amazônico, caatinga e cerrado. A escolha das regiões foi feita com base nas suas características que entra em concordância com os limites do índice HI

MÉTODO

O índice Heat Index (HI) é desenvolvido pela análise da regressão múltipla das equações de Steadman (Steadman 1979a; Steadman 1979b; Steadman 1984) afim de utilizar, de forma simples, a temperatura ambiente e a umidade relativa. O índice é desenvolvido pela NOAA's National Weather Service (NWS) e implementa diversos parâmetros implicitamente como radiação solar, vento,

1) Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal do Ceará (UFC), samuellima2206@gmail.com
2) Engenheiro Civil, Universidade Federal do Ceará (UFC), luigicarvalho.eng@gmail.com.br
3) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), elis_f.lopes@hotmail.com
4) Doutorando em Engenharia Civil, Recursos Hídricos (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), jmicaelcosta@gmail.com
5) Doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará (UFC), cleitonsilveira@ufc.br

vestuário, fisiologia humana e carga de trabalho (Rothfusz, 1990). A fórmula geral do HI (em ºC) para temperaturas acima de 26ªC e umidade acima de 40% é dada pela equação a seguir.

$$HI = 5/9\ [(C1 + C2T + C3UR + C4TUR + C5T^2 + C6UR^2 + C7T^2UR + C8TUR^2 + C9T^2UR^2) - 32] \quad (1)$$

onde:

Tabela 1: Coeficientes da fórmula de Heat Index (HI).

Tabela 1: Coeficientes da fórmula do Heat Index (HI).

C1	-42,379	C2	2,04901523	C3	10,14333127
C4	-0,22475541	C5	- 6,83783x10^-3	C6	- 5,481717x10^-2
C5	1,22874x10^-3	C8	8,5282x10-4	C9	- 1,99x10^-6

Fonte:

A sensação térmica experienciada pelos humanos pode ser representada pelo HI sendo um resultado da temperatura do ar, umidade relativa e velocidade dos ventos. A tabela 1 relaciona as faixas de temperatura, a percepção e risco associados aos valores de HI.

Tabela 2: Faixas de temperaturas e riscos associados ao HI.

HI (ºC)	Observações
18-26	Conforto climático
27-32	Cuidado: possibilidade de fadiga
32-41	Cuidado extremo: hipertermia
41-54	Perigo: hipertermia
Acima de 54	Perigo extremo: hipertermia (a insolação é iminente)

Fonte:

Na análise do HI, foram utilizados os dados meteorológicos oriundo da base de dados produzida por Xavier (Xavier et al., 2022), em formato NetCDF (Network Common Data Form), para uma análise temporal e espacial dos dados meteorológicos na série histórica disponível entre 1961 e 2025. O banco de dados meteorológicos diários em formato de grade do Brasil (BR-DWGD) é uma base nacional utilizada para estudos de clima (fonte), sendo suas variáveis disponíveis a precipitação (em mm), temperatura máxima e mínima (em ºC), radiação solar (MJ/m²), umidade relativa (%), velocidade dos ventos (m/s) e evapotranspiração (mm). A resolução temporal é diária e sua resolução espacial é de 0,1 x 0,1 ou aproximadamente 11km por 11km se restringindo apenas ao território do Brasil. A Tabela 2 faz uma síntese dos dados de entrada empregados na realização do presente artigo.

Tabela 3 – Dados necessários para realização do estudo.

Variável	Fonte	Formato	Período de análise
Umidade relativa (RH)	XAVIER	NetCDF	1961 - 2025
Temperatura máxima (Tmax)	XAVIER	NetCDF	1961 - 2025
Temperatura mínima (Tmin)	XAVIER	NetCDF	1961 - 2025

Fonte: Autoral

A análise foi realizada na linguagem de programação *Python* e relacionou os dados de umidade relativa (RH) e temperatura média (Tmed) para a região de estudo. Inicialmente, foi feito uma manipulação cujo produto foi a média aritmética entre as duas variáveis (Temperatura máxima e mínima) afim de encontrar a temperatura média para cada pixel dos dados. Dessa forma, com a caracterização da área estudada e a produção automática da temperatura média, foram gerados os mapas para cada ano relacionando os valores de umidade (UR) e temperatura média (T) para a fórmula (1). Foram estudados o ano de 1961 e posteriormente do ano de 2024 e 2025 (Figura 01).

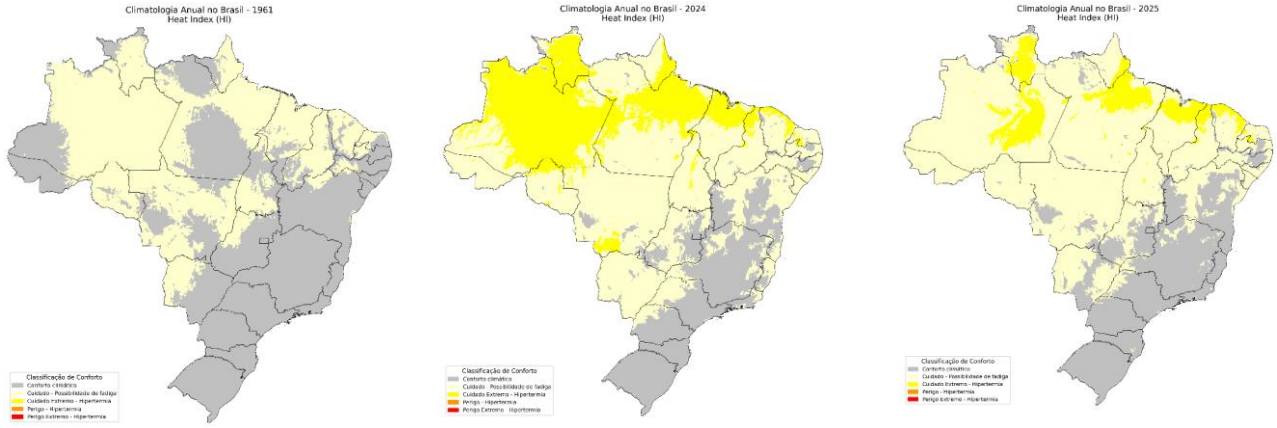


Figura 01: Distribuição espacial e evolução temporal da classificação do conforto (HI) no território brasileiro 1961(a), 2024(b) e 2025(c)
Fonte: Autor

A escala de cores identifica o comportamento das áreas mapeadas em relação ao conforto térmico, onde as áreas em cinza indicam conforto climático e as em creme apontam situação de cuidado", com possibilidade de fadiga. A progressão do risco à saúde é representada pelas cores mais quentes: o amarelo indica cuidado extremo com risco de hipertermia, o laranja sinaliza perigo de hipertermia e, por fim, o vermelho alerta para o perigo extremo de hipertermia.

RESULTADOS

Ao analisar o HI para o ano de 1961 observa-se que predominavam as áreas classificadas em "cuidado" na região nordeste e, principalmente, norte enquanto em 2024 e 2025 as mesmas regiões apresentaram progressão do risco indicando cuidado extremo nas regiões da Amazônia legal e nordeste mais próximo ao litoral ao norte. Além disso a faixa de desconforto por fadiga que já era presente na faixa norte do país em 1961 se expandiu para área mais ao centro oeste e sudeste do país. O estudo do uso e ocupação do solo, a depender dos seus usos, pode nos explicar, em uma perspectiva, o aumento desse índice.

O uso e ocupação do solo principalmente, na categoria da agropecuária, se expandiu durante os anos de 1985 a 2024 mais ao norte do país nas regiões de vegetação e de formação florestal (Figura 02). O uso extensível e em grande escala do solo pode aumentar a temperatura da superfície pela ausência da cobertura vegetal (Fausto et al., 2016) e dessa forma colaborar com o aumento da faixa de HI.



Figura 02 – uso e ocupação do solo 1965(a), 2024 (b)
Fonte: Autoral

CONCLUSÃO

Com base nos resultados, pode-se concluir:

- O avanço da ocupação do solo e a supressão da vegetação estão diretamente ligados ao aumento dos extremos de temperatura. O estudo constata uma expansão do risco de hipertermia do Norte/Nordeste para o Sudeste/Centro-Oeste e aumento do seu risco, evidenciando a necessidade de dinâmicas de adaptação diferenciadas no país.
- A piora na sensação térmica reflete no aumento expressivo do consumo de água e energia elétrica. Os resultados obtidos são aplicáveis na fundamentação de intervenções públicas e medidas mitigadoras para evitar o esgotamento futuro de recursos naturais.
- Embora a relação macrorregional esteja mapeada, a principal perspectiva para estudos futuros é o aprofundamento da análise de sensação térmica em áreas urbanas.

REFERÊNCIAS

EBI, K. L.; VANOS, J.; BALDWIN, J. W.; BELL, J. E.; HONDULA, D. M.; ERRETT, N. A.; HAYES, K.; REID, C. E.; SAHA, S.; SPECTOR, J.; BERRY, P. (2021). Extreme Weather and Climate Change: Population Health and Health System Implications. Annual Review of Public Health, 42, 293-315.

FAUSTO, M. A.; ANGELINI, L. P.; MARQUES, H. O.; SILVA FILHO, A.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. (2016). Impacto da alteração do uso do solo no saldo de radiação no Cerrado do sul de Mato Grosso. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 11(2), 350-361.

JUSTINO, S. T. P.; SILVA, R. B. G.; SILVA, R. B.; SIMÕES, D. (2025). Land Use Change and Its Climatic and Vegetation Impacts in the Brazilian Amazon. Sustainability, 17, 7099.

LIMA JÚNIOR, A. F.; GOMES, F. I. B. P.; ZANELLA, M. E. (2025). O Índice de Calor (HI) na cidade de Fortaleza, Ceará. Sociedade & Natureza, 37, e73091.

REQUIA, W. J.; SILVA, R. M. D.; HOINASKI, L.; AMINI, H. (2024). Thermal Comfort Conditions and Mortality in Brazil. International Journal of Environmental Research and Public Health, 21, 1248.

ROTHFUSZ, L. P. (1990). The Heat Index ‘‘Equation” (or, More Than You Ever Wanted to Know About Heat Index). U.S. National Weather Service, Technical Attachment SR 90-23.

STEADMAN, R. G. (1979a). “The assessment of sultriness. Part I: a temperature-humidity index based on human physiology and clothing science”. Journal of Applied Meteorology, v.18, p.861–873.

STEADMAN, R. G. (1979b). “The assessment of sultriness. Part II: effects of wind, extra radiation and barometric pressure on apparent temperature”. Journal of Applied Meteorology, v.18, p.874–885.

STEADMAN, R. G. (1984). “A universal scale of apparent temperature”. Journal of Applied Meteorology and Climatology, v.23, p.1674–1687.

FANGER, P. O. Thermal Comfort - Analysis and Applications in Environmental Engineering. Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.

O trabalho teve como objetivo analisar a dinâmica espaço-temporal do Índice de Calor (*Heat Index* - HI) no território brasileiro ao longo da série histórica de 1961 a 2025, correlacionando-a com as alterações de uso e ocupação do solo. A supressão da vegetação nativa altera o balanço energético da superfície, intensificando o aquecimento local e impactando a saúde pública devido ao agravamento do desconforto térmico. A pesquisa utilizou dados meteorológicos diários em formato NetCDF da base de Xavier. Através da produção de códigos em linguagem de programação Python, calculou-se o HI empregando as equações de regressão de Steadman, relacionando a temperatura média e a umidade relativa. Os resultados evidenciam que, em 1961, as áreas sob condição de "cuidado" concentravam-se majoritariamente nas regiões Norte e Nordeste. Nas análises de 2024 e 2025, constatou-se uma evolução climática para o nível de "cuidado extremo" na Amazônia Legal e no litoral nordestino, além de uma significativa expansão da zona de fadiga térmica em direção ao Centro-Oeste e Sudeste do país. Tal progressão espacial coincide com o avanço das atividades agropecuárias sobre as formações florestais, documentado entre 1985 e 2024. Os resultados sugerem que o avanço da supressão da vegetação e uso do solo está ligado ao aumento do HI no solo brasileiro. A expansão territorial do risco de hipertermia ressalta a urgência de novas dinâmicas regionais de adaptação e formulação de políticas públicas mitigadoras.