



Novos Cadernos NAEA

v. 27, n. 3 • set-dez 2024 • ISSN 1516-6481/2179-7536



AQUECIMENTO GLOBAL E LIMITES PARA A REVERSÃO DE PADRÕES DELETÉRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO URBANO NA AMAZÔNIA: O CASO DA CIDADE DE MARABÁ

GLOBAL WARMING AND LIMITS TO REVERSING DELETERIOUS PATTERNS OF URBAN LAND USE AND OCCUPATION IN THE AMAZON: THE CASE OF MARABÁ

Maurílio de Abreu Monteiro  

Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), Marabá, PA, Brasil

Lucas França Rolim  

Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), Marabá, PA, Brasil

Abraão Levi dos Santos Mascarenhas  

Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), Marabá, PA, Brasil

RESUMO

O trabalho analisa os impactos do aquecimento global sobre áreas urbanas no bioma Amazônia, com foco nas dinâmicas de urbanização e formação de ilhas de calor em Marabá e região de Carajás. A partir de cenários climáticos projetados pelo IPCC e técnicas de sensoriamento remoto, avalia-se como a expansão urbana desordenada intensifica as vulnerabilidades socioambientais, agravando a elevação das temperaturas locais. O estudo destaca o papel das instituições, normas sociais e comportamentos coletivos na conformação de padrões urbanos que dificultam a mitigação desses efeitos. Os resultados reforçam a urgência de integrar políticas de planejamento urbano sustentáveis, priorizando infraestrutura verde e regulação eficaz do uso do solo. A pesquisa contribui para o debate sobre adaptações necessárias frente às mudanças climáticas em biomas sensíveis como a Amazônia.

Palavras-chave: aquecimento global; ilhas de calor urbano; urbanização; Amazônia; sustentabilidade.

ABSTRACT

This study analyzes the impacts of global warming on urban areas within the Amazon biome, focusing on urbanization dynamics and the formation of urban heat islands in Marabá and the Carajás region. Based on climate scenarios projected by the IPCC and remote sensing techniques, the research evaluates how unregulated urban expansion intensifies socio-environmental vulnerabilities, exacerbating local temperature increases. The study highlights the role of institutions, social norms, and collective behaviors in shaping urban patterns that hinder the mitigation of these effects. The findings underscore the urgency of integrating sustainable urban planning policies, prioritizing green infrastructure and effective land-use regulation. This research contributes to the debate on necessary adaptations to climate change in sensitive biomes such as the Amazon.

Keywords: global warming; urban heat islands; urbanization; Amazon; sustainability.

1 INTRODUÇÃO

No primeiro quarto do século XXI, multiplicam-se as evidências empíricas de que a mudança climática global está ocorrendo e acarretando impactos na economia e, sobretudo, na condição de vida das pessoas. A Sexta Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) apresentou conclusões de que áreas urbanas têm uma tendência a serem mais afetadas por tais condições extremas, sobretudo no que diz respeito ao aumento da temperatura e ao impacto no ciclo hídrico, estabelecendo uma relação direta entre o processo de urbanização e a intensificação dos efeitos do aquecimento global na escala local.

Muitos estudos apontam que aglomerados urbanos têm uma inclinação a concentrar, sobre a superfície, temperaturas mais elevadas que aquelas de seus entornos vegetados, florestais ou até de uso agropecuário, estabelecendo microclimas próprios com uma tendência a dispor de temperaturas mais quentes à medida que se aproximam de seus centros morfológicos. Este efeito climático é denominado de ilhas de calor urbano (do inglês *urban heat islands* – UHI) e já foi descrito e mapeado em diversas regiões do planeta (Gartland, 2010; Guilherme et al., 2020; IPCC, 2021; Mitchell, 1961; Waleed et al., 2023; Zhang et al., 2012).

O aparecimento e a intensificação das ilhas de calor urbano têm sido visualizados com mais voracidade em regiões que passam por processos de urbanização acelerada, em geral marcados pelo espraiamento urbano – processo caracterizado pela incorporação de novas áreas, anteriormente de uso rural, no entorno das cidades, em geral com baixa densidade populacional, e permeadas de vazios urbanos—devido ao impacto que tem sobre as dinâmicas de uso e ocupação do solo e pela intensificação do uso de recursos naturais (Chen, 2019; Waleed et al., 2023; Waleed, Sajjad, Shazil, 2024).

Mudanças na paisagem e no padrão de uso e ocupação do solo ocorrem especialmente em países em desenvolvimento (Preston, 1979) e impactam mais o ambiente pela intensa e acelerada degradação do solo, de rios e da vegetação existente, em situações em que o aparato estatal tem menos capacidade de regulação territorial e otimização de uso do solo urbano (Faisal et al., 2021; Waleed et al., 2023). Apesar de o enfoque deste trabalho ser na relação de que o espraiamento das cidades tem impactos diretos no comprometimento ambiental pelo aumento da temperatura num contexto de criação de ilhas de calor urbano (UHI). O exame da literatura sobre mudanças

climáticas nos propõe que a avaliação e as projeções das condições do clima se organizem em escala regional, uma vez que as manifestações das mudanças climáticas se singularizam regionalmente. A análise em escala regional ganha importância também pelo fato de que a diversidade de realidades históricas, sociais e econômicas que caracterizam essas regiões molda preferências e identidades dos indivíduos ao longo do tempo, sedimentando normas e valores e conformando as instituições que definem o que os indivíduos consideram desejável ou possível (Hodgson, 2004).

Além disso, a análise dos comportamentos de agentes sociais é ancorada em categorias teóricas inscritas no campo do neoinstitucionalismo (Hodgson, 1998, 2006, 1993, 2001, 2004). Propõe-se aqui uma associação entre a ambiência institucional existente para a implementação de medidas que crescentemente estão associadas ao controle da ocupação urbana, mas que têm se mostrado pouco efetivas, haja vista evidências empíricas do aumento de temperaturas em cidades localizadas no bioma amazônico. Recorre-se a elementos empíricos derivados da avaliação de resultados da atuação de pesquisadores e da implementação em campo de ações voltadas à busca de solução para problemas de conversão de terra rural em urbana na porção oriental do bioma Amazônia.

Para efetuar a análise, inicialmente indica-se a alternativa a que se recorre, em termos abstratos, para compreender como regionalmente a sociedade incorpora as mudanças impostas pelo aquecimento global, com referência à regulação da conversão de terra rural em urbana nas duas cidades estudadas, tomadas como fontes de evidências empíricas em relação ao que, historicamente, tem se consolidado institucionalmente como desejável para agentes regionalmente relevantes em relação ao uso e ocupação do solo. Em seguida, são apresentadas as estratégias que fundamentaram a abordagem apresentada sobre o aquecimento global (os cenários socioeconômicos de referência, base temporal e as escalas utilizadas para comparações e a seleção do modelo climático) e as técnicas utilizadas para identificação de ilhas de calor urbano. Após esta etapa de esclarecimentos metodológicos, passa-se à apresentação dos resultados de avaliações em relação às diferenciadas manifestações do aquecimento planetário, particularidades dessas mudanças de temperatura no bioma, para em seguida demonstrar o aumento da formação de ilhas de calor na área urbana de Marabá. Por fim, são apresentadas breves conclusões.

2 METODOLOGIA E TÉCNICAS DE PESQUISA

2.1 COMO A SOCIEDADE E OS AGENTES INCORPORAM MUDANÇAS EM SEU COMPORTAMENTO

Diferentemente da visão de que as sinalizações advindas do mercado são o principal impulso capaz de alterar o comportamento de agentes plenamente racionais em direção à adoção de práticas capazes de mitigar os efeitos das mudanças climáticas sobre o espaço urbano, procura-se apreender as dinâmicas sociais de uso do solo urbano como sendo resultantes da vivência desses agentes que aprendem com experiências passadas, observando os outros e ajustando seus comportamentos às normas coletivas. Não se busca, portanto, diante das restrições oriundas do aquecimento global, a identificação de comportamentos racionais baseados em cálculos utilitários e em preferências exógenas e fixas, mas sim baseados em heurísticas e influências sociais e históricas, já que se parte de um suposto teórico de que a maneira como cada um percebe suas opções e toma decisões está profundamente influenciada pelas instituições, incluindo normas sociais, tradições culturais e crenças coletivas.

Sendo assim, instituições são “os sistemas de regras sociais estabelecidas e prevalentes que estruturam as interações sociais”. Convenções, que podem ser incluídas na lei, podem ser consideradas instituições também (Hodgson, 2006, p. 2). Esta interação entre normas informais e regras formais cria a complexidade nas sociedades contemporâneas, sendo a conformação regionalmente assumida pelas instituições fundamental para a formação dos comportamentos e das identidades dos indivíduos e de como eles reagem a essas restrições. Neste aspecto, há uma expressiva diferença na visão de outros neoinstitucionalistas, como Douglass North e Oliver Williamson (Hodgson, 2004; 2006), já que, para Hodgson (2004), as instituições não expressam apenas restrições externas, enfatizando que as instituições não só influenciam o comportamento social ao criar restrições externas, mas, sobretudo, ao constituírem componentes internos à formação das preferências e da identidade dos indivíduos. Ele indica que as instituições não são simplesmente mecanismos que restringem escolhas; elas moldam e definem o que os indivíduos consideram desejável ou possível. Justamente por isso, compreendê-las é fundamental para perceber como a sociedade regional se move para enfrentar o aquecimento global.

A redução do comportamento humano a escolhas racionais e otimizadoras não é adequada para entender a complexidade das ações individuais e sociais frente às mudanças climáticas. Não serão apenas sinalizações econômicas que pautam a alteração ou a manutenção dos comportamentos, mas fatores culturais, morais e institucionais, que não podem ser simplificados a modelos de maximização de utilidade. Por isso, não se trata tão somente de identificar formas de maximizar ganhos ou de reduzir esforços, já que cada agente percebe opções e toma decisões profundamente influenciado pelas instituições, incluindo normas sociais, tradições culturais e crenças coletivas (Hodgson, 2004). Essas últimas, mesmo não sendo formais, não se apresentando como regras escritas ou leis, também são instituições, neste caso informais, pois essas convenções sociais e costumes regulam a interação social de maneira sutil e contínua (Hodgson, 2006).

Hodgson (2006) argumenta que instituições e organizações não devem ser confundidas. Enquanto estas últimas (como empresas ou governos) são atores sociais com objetivos específicos, as instituições são os sistemas de regras que moldam o comportamento dentro dessas organizações e no ambiente mais amplo. Ele alerta contra o risco de tratar organizações como se fossem instituições, pois isso pode simplificar excessivamente a complexidade das interações sociais.

Ao se considerar que as instituições são fortes e necessariamente vinculadas a uma construção histórica pretérita, não se pretende indicar que elas sejam estáticas; em vez disso, elas evoluem ao longo do tempo, adaptando-se às mudanças sociais e econômicas. Tendo por base essa visão de que há limites institucionais, mas que também há possibilidades de alteração de comportamentos sociais, este artigo se propõe a acumular conhecimentos que ampliem a reflexão e ajudem a fundamentar a elaboração de ações estratégicas voltadas à construção de processos de desenvolvimento com maior esperança de sustentabilidade nesta região da Amazônia.

2.2 ESTRATÉGIAS PARA INFERIR AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

2.2.1 A indicação de cenários de referência

As projeções relativas às mudanças realizadas no âmbito da Sexta Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) até 2100 foram organizadas tendo como referência nove diferentes

cenários socioeconômicos (SSP¹) (Chen et al., 2021, p. 233) e estão divididas em períodos: 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100. No âmbito do IPCC, um cenário é uma descrição de como o futuro pode se desenvolver, com base em um conjunto coerente e internamente consistente de suposições sobre os principais impulsionadores, incluindo demografia, processos econômicos, inovação tecnológica, governança, estilos de vida e relacionamentos entre essas forças motrizes (Chen et al., 2021, p. 227). Nesse contexto, Moss et al. (2010, p. 748) indicam que cenários “não são previsões ou predições, mas refletem julgamentos de especialistas sobre emissões futuras plausíveis com base em pesquisas sobre tendências socioeconômicas, ambientais e tecnológicas representadas em modelos de avaliação integrados”, fornecendo uma investigação das implicações de vários desenvolvimentos e ações.

No presente trabalho, são tomados três desses cenários para realizar comparações, quais sejam: SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

O cenário SSP1-2.6 representa uma trajetória alinhada aos objetivos do Acordo de Paris, marcado pela presença de baixas emissões e por uma transição acelerada para fontes de energia limpa. Neste cenário, são implementadas políticas climáticas rigorosas que garantem que a variação de temperatura global “permanença abaixo de 2,0 °C de aquecimento em relação a 1850-1900 (mediana), com emissões líquidas implícitas de dióxido de carbono (CO₂) zero na segunda metade do século, de forma que a concentração de CO₂ na atmosfera fica em torno de 500-550 ppm (partes por milhão) e o forçamento radiativo de 2.6 W/m² em 2100²(Chen et al., 2021, p. 233).

O cenário SSP2-4.5 apresenta uma trajetória intermediária, em que o crescimento econômico e os esforços de mitigação do aquecimento coexistem. As emissões globais de CO₂ continuam a crescer até meados do século, estabilizando-se posteriormente, equivalendo a um forçamento radiativo de 2,6 W/m² em 2100. Trata-se de um cenário que se desvia ligeiramente de um cenário de referência de “nenhuma política climática adicional”, resultando em uma melhor estimativa de aquecimento em torno de 2,7°C até o final do século XXI em relação a 1850-1900 (Chen et al., 2021, p. 233).

¹ Acrônimo de *Shared Socioeconomic Pathways*

² Trata-se de medida que indica a diferença entre a quantidade de energia solar que a Terra recebe e a quantidade de energia que é irradiada de volta para o espaço. É expressa em watts por metro quadrado (W/m²) e indica o quanto de energia está sendo retida na atmosfera, resultando em aquecimento global.

O cenário SSP5-8.5 é o mais extremo de emissões, de forma que a concentração de CO₂ na atmosfera pode ultrapassar 1000 ppm e alcançar até 1200 ppm ou mais até 2100. Existe um uso intensivo de combustíveis fósseis e crescimento econômico global impulsionado por energia não renovável. As emissões de CO₂ aumentam rapidamente devido à falta de políticas de mitigação e à expansão de economias que priorizam o crescimento sem considerar a sustentabilidade. Representaria um forçamento radiativo de 8,5 W/m² em 2100 (Chen et al., 2021, p. 233).

2.2.2 O estabelecimento de base temporal para comparação

Os estudos sobre mudanças climáticas também recorrem às “normais climatológicas” para realizar a comparação de variações e tendências climáticas. A Organização Meteorológica Mundial (OMM) recomenda a inferência dessas normais por meio do cálculo da média da variável climática de interesse que cubra 30 anos inteiros (1961 a 1990, 1991 a 2020, por exemplo). Diferentemente, o Relatório do Grupo de Trabalho I da Sexta Avaliação do IPCC (WGI AR6) toma como base temporal preferencial para comparações a época de 1850-1900, que representa o período pré-industrial. Há também a utilização de outras linhas temporais como base para comparações, dependendo da disponibilidade e da natureza dos dados, que incluem o período de 1995 a 2014 como referência para calcular as mudanças no clima futuro usando projeções de modelos e como um período de referência “moderno” ou “passado recente” para estimar o aquecimento observado no passado (Chen et al., 2021, p. 191). Em função das especificidades deste estudo, será esse o período utilizado para a realização e apresentação das comparações.

Para identificar mudanças de padrões climáticos, recorre-se, neste trabalho, à aferição das anomalias, ou seja, aos desvios da temperatura do ar em relação à sua média histórica, neste caso, o “passado recente” representado pelo período de 1995 a 2014. O valor da anomalia expressa a diferença entre o valor em um dado período e o valor médio no período de referência, ajudando a apreender as variações de temperatura de forma comparativa e detalhada ao longo do tempo entre diferentes recortes espaciais.

2.2.3 A seleção de modelos climáticos

O CMIP6 envolveu uma grande variabilidade de modelos climáticos, com mais de 40 grupos fornecendo uma nova e rica fonte de informações para entender melhor as mudanças climáticas passadas, presentes e futuras (Bock et al., 2020). Os incrementos experimentados na última geração de modelos climáticos, incluindo nova e melhor representação de processos físicos, químicos e biológicos, bem como maior resolução, melhoraram a simulação de muitos aspectos do sistema da Terra (Eyring et al., 2021, p. 519). Eles contam com a redução do tamanho das “células” no plano horizontal em relação aos modelos anteriores, permitindo a melhoria na acurácia dos Modelos de Sistema Terrestre (ESMs) (Haarsma et al., 2016; Hewitt et al., 2017; Peter et al., 2019), de maneira que esses modelos podem capturar detalhes que envolvem fenômenos climáticos e melhorar a compreensão e projeção das mudanças climáticas em escala regional. Por outro lado, Davini e D’Andrea (2020) argumentam que a resolução mais acurada por si só não explica ou sana todos os vieses do modelo. O desempenho do modelo depende da formulação e das parametrizações do modelo tanto quanto da resolução (Eyring et al., 2021; Douville et al., 2021; Doblas-Reyes et al., 2021). Portanto, apesar desses avanços e das melhorias registradas no âmbito do CMIP6, Bock et al. (2020) indicam que ainda há imensas lacunas em todas as escalas e que as melhorias permanecem modestas, sobretudo, na escala global.

Dentre os parâmetros de grande relevância nas interações entre o solo e a atmosfera, encontra-se a “Umidade Crítica do Solo” (CSM), que resulta da interligação entre a umidade do solo e a evaporação, o que envolve a troca de água e de energia entre a terra e a atmosfera. Relações que são afetadas e afetam diretamente as mudanças climáticas e que apresentam padrões regionais distintos, havendo diferenças substanciais nas projeções da CSM, resultando em uma variabilidade considerável entre os modelos climáticos em relação às respostas hidrológicas projetadas (Hsu e Dirmeyer, 2023, p. 2).

Hsu e Dirmeyer (2023, p. 10) ao avaliarem 15 modelos do CMIP6, indicam que o HadGEM3-GC31, assim como outros modelos, apresenta dificuldades em capturar consistentemente as respostas hidrológicas regionais ao aquecimento. Há, por conseguinte, variações nas respostas da CSM, refletindo limitações na representação precisa das interações hidrológicas no contexto de um clima em aquecimento.

Negron-Juarez et al. (2024), em trabalho pioneiro sobre padrões de precipitação extrema na Amazônia usando modelos de alta resolução (HighResMIP), fizeram uma comparação entre 17 integrantes do CMIP6 em relação à frequência de eventos extremos de precipitação e a precipitação total observada na Amazônia. Concluíram que o HadGEM3-CG31-HM e o GFDL-CM4C192 foram os modelos que melhor identificaram fenômenos climáticos no bioma Amazônia e reafirmaram a importância do papel de modelos de alta resolução na análise climática. Neste contexto, no presente estudo, utiliza-se o modelo HadGEM3-GC31.

O modelo HadGEM3-GC31A trata e organiza os dados climáticos com diferentes níveis de resolução. Este aspecto do modelo climático refere-se ao nível de detalhe espacial com o qual são combinadas longitude e latitude, formando células retangulares ou quadradas ajustadas conforme a geometria do planeta. Esse ajuste garante que a resolução seja uniforme globalmente. No âmbito do CMIP6, o modelo HadGEM3-GC31 trabalha com pelo menos três níveis de resolução:

Alta resolução (HM – High-resolution Model): Trata os dados em uma grade altamente detalhada com 432 pontos longitudinais dispostos segundo a distribuição de Gauss-Legendre, cada um representando aproximadamente $0,833^\circ$ ($360^\circ/432$). O eixo de latitude está dividido em 324 segmentos, com um espaçamento médio de $\sim 0,556^\circ$ ($180^\circ/324$).

Média resolução (MM – Medium-resolution Model): Trabalha com uma grade intermediária que combina 288 pontos longitudinais, espaçados em $\sim 1,25^\circ$ ($360^\circ/288$), e 216 pontos latitudinais, espaçados em $\sim 0,833^\circ$ ($180^\circ/216$).

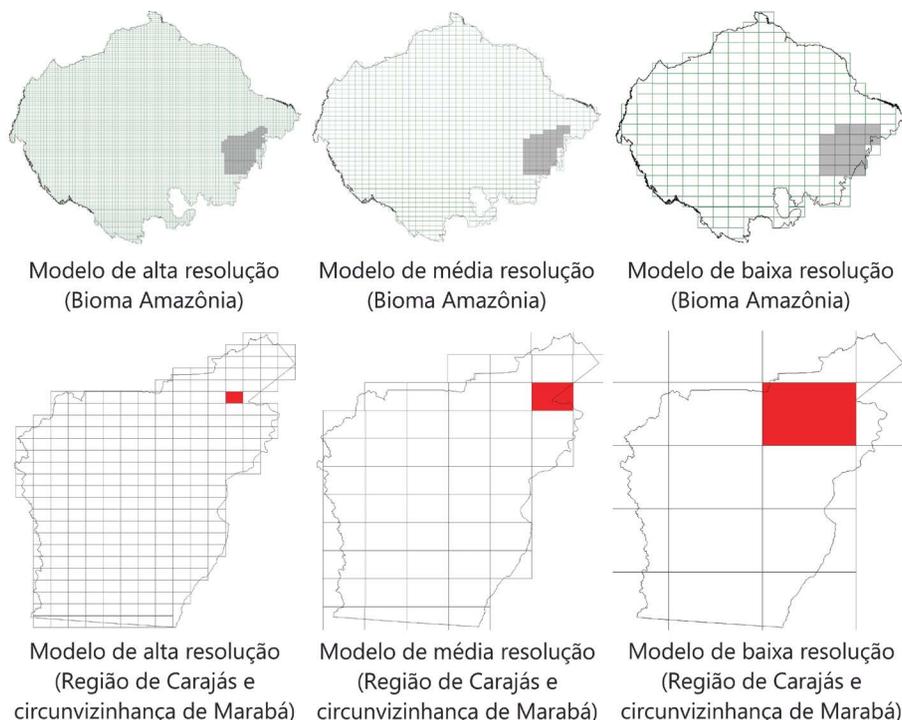
Baixa resolução (LL – Low-resolution Model): Utiliza uma grade menos densa, com 192 pontos longitudinais (cada um representando $\sim 1,875^\circ$) e 144 pontos latitudinais (com espaçamento de $\sim 1,25^\circ$). Este nível de resolução é comumente usado em simulações de longo prazo ou estudos de cenários climáticos amplos.

Para avaliar, em termos históricos e nos três cenários socioeconômicos, as variações de temperatura à altura da superfície no planeta, no bioma Amazônia, na região de Carajás (correspondendo às Regiões Intermediárias de Redenção e de Marabá, excluindo a Região Imediata de Tucuruí) (Monteiro e Silva, 2021), e nas circunvizinhanças de Marabá, este trabalho utiliza dados gerados e organizados em todos estes três níveis de resolução (Figura 1).

Mais especificamente, para a escala planetária utilizou-se Ridley et al. (2019) para dados históricos e para os cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-

8.5, recorreu-se, respectivamente, a Good (2020a), Good (2019) e Good (2020b). Para o bioma Amazônia, a região de Carajás e a circunvizinhanças de Marabá, utiliza-se Williams, et al. (2017) para valores históricos; Jackson (2020a) para o cenário SSP1-2.6; Good, (2019) para o cenário SSP2-4.5 e Jackson (2020b) para o cenário SSP5-8.5.

Figura 1 – Formato das células do modelo climático HadGEM3-GC31 utilizadas para mensurar variações de temperatura no bioma Amazônia, na região de Carajás e na circunvizinhança da cidade de Marabá



Fonte: Elaborada pelos autores.

2.3 ESTRATÉGIAS PARA IDENTIFICAÇÃO DE ILHAS DE CALOR URBANO

Como indicado, uma das importantes diferenciações espaciais do aquecimento global é o surgimento de ilhas de calor, sobretudo em áreas urbanizadas. Para identificar e aferir ilhas de calor urbano, os estudos mais recentes têm recorrido ao uso de ferramentas de sensoriamento remoto baseadas em imagens de satélite, uma vez que possibilitam a organização de uma grande quantidade de dados com acurácia espacial e temporal, viabilizando análises multifatoriais integradas relativas às mudanças de uso e ocupação do solo. Estas incluem níveis de temperatura, umidade,

vegetação, edificação e iluminância, em diferentes escalas, que vão desde grandes conurbações metropolitanas até recortes de quadras e bairros, permitindo o acompanhamento gradativo de degradações ocasionadas pelas alterações de uso e ocupação do solo inerentes ao processo de urbanização (Chen et al., 2006; Faisal et al., 2021; Waleed et al., 2023; Waleed, Sajjad, Shazil, 2024).

Para identificar e quantificar a intensidade do fenômeno das ilhas de calor urbano na cidade de Marabá, utilizamos os passos metodológicos organizados por Faisal et al. (2021) e Waleed e Sajjad (2022) para delimitar as médias anuais de temperatura de superfície (LST³) e calcular o índice de variação do campo térmico urbano (UTFVI⁴) para os anos de 1996, 2009 e 2023. Para realização dos cálculos e representações cartográficas foi utilizado o software Google Earth Engine (GEE) com dados obtidos pelos satélites Landsat-5 Thematic Mapper (TM) tier-1 Surface Reflectance (SR) para as amostras de 1996 e 2009 e Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) para a amostra de 2023, disponibilizados pelo US. Geological Survey (USGS) no data catalog do GEE (ver Quadro 1), com códigos organizados em Rolim (2024a e Rolim 2024b).

Quadro 1 – Configurações das leituras satelitais

Satélite	Resol.	Captura	Bandas	Fonte e datasets
Landsat-5	30m	1996, 2009	Óticas: SR_B1, SR_B2(RED) e SR_B3 (NIR) Termal: ST_B6	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LT05_C02_T1_L2
Landsat-8	30m	2023	Óticas: SR_B2, SR_B3(Red) e SR_B4(NIR) Termal: ST_B10	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C02_T1_L2

Fonte: Elaborado pelos autores.

Primeiramente foi calculado o índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) que será utilizado para calcular a proporção de vegetação e emissividade espectral da superfície, uma vez que o comportamento da luz na composição química da vegetação nos fornece parâmetros para a análise da superfície (Faisal et al, 2021). Para o cálculo do NDVI usa-se a equação 1, para o cálculo da proporção de vegetação (P_V), a Equação 2 e para a emissividade (ε), a equação 3 (Walled; Sajjad, 2022).

³ Acrônimo de *Land surface temperature*.

⁴ Acrônimo de *Urban Thermal Field Variation Index*.

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad (1)$$

Onde: *NIR* = Banda do Infravermelho próximo; *Red* = Banda do vermelho,

$$Pv = \left(\frac{NDVI-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}} \right)^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon = 0,004Pv + 0,986 \quad (3)$$

Tendo esses parâmetros estabelecidos calcula-se a temperatura da superfície para cada ponto do recorte a partir da Equação 4.

$$T_s = \frac{T_B}{1 + \left(\frac{\lambda \times T_B}{\rho} \right) \times \log \varepsilon} - 273,15 \quad (4)$$

Onde: T_s = Temperatura da superfície (°C); T_B = Temperatura de brilho satelital (K); λ = Comprimento de onda da radiação emitida (definido no dataset do satélite); $\rho = 1,438 \times 10^{-2} mK$

2.3.1 Cálculo do índice de variação do campo térmico urbano (UTFVI)

O UTFVI é um indicador utilizado para avaliar quantitativamente as UHI no que diz respeito à distribuição das condições de conforto térmico na cidade e a concentração das UHI em relação ao seu entorno. Para tanto é calculado para cada ponto de análise uma razão entre a temperatura delimitada no pixel pela temperatura do raster, conforme descrito na equação 5. Uma vez calculado, entende-se a intensidade da UHI e estabelece-se a análise da qualidade ambiental urbana com base em seis níveis de avaliação ecológica (Liguori; Monteiro, 2024, Walled et al 2022), conforme descrito no quadro 2.

$$UTFVI = \frac{T_s - T_m}{T_{std}} \quad (5)$$

Quadro 2 – Escala de UTFVI, Intensidade da UHI e avaliação ecológica

UTFVI	Intensidade da UHI	Avaliação ecológica
<0	Inexistente	Excelente
0-0,05	Fraca	Boa
0,05-0,10	Média	Normal
0,10-0,15	Forte	Ruim
0,15-0,20	Muito Forte	Muito Ruim
>0,20	Mais Forte	Péssima

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Liguori e Monteiro (2024).

Neste estudo, são avaliadas, articuladamente à formação de ilhas de calor nas áreas urbanas de Marabá, as variações de temperatura do ar à altura da superfície na circunvizinhança desta cidade. Em termos históricos, essas variações de temperatura foram analisadas utilizando-se um modelo climático de alta resolução (Williams et al., 2017); de média resolução para o cenário SSP1-2.6 (Jackson, 2020a); de baixa resolução para o cenário SSP2-4.5 (Good, 2019); e de média resolução para o cenário SSP5-8.5 (Jackson, 2020b) (Figura 1).

3 DIFERENCIADAS MANIFESTAÇÕES DO AQUECIMENTO GLOBAL

Neste item, analisa-se a diferenciação do aquecimento global a partir de cinco referências espaciais: a planetária, a do bioma Amazônia, a da região de Carajás e a circunvizinhança da cidade de Marabá, todas considerando as variações de temperatura a partir dos dados climáticos históricos e projeções vinculadas a três cenários socioeconômicos.

3.1 O AQUECIMENTO EM TERMOS PLANETÁRIOS

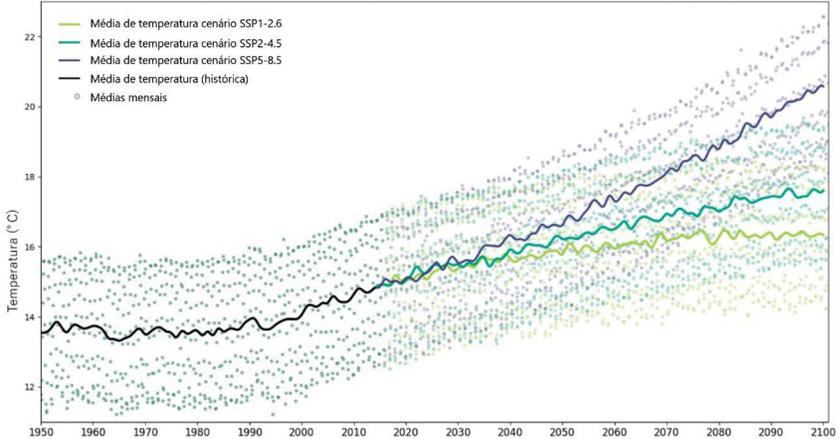
Em termos planetários, ao considerar o período de referência 1995-2014, quando a temperatura média global foi estimada em aproximadamente 14,34°C, e comparando-o com períodos futuros (2021-2100), observa-se, na Figura 2a, um aumento contínuo, mas muito diferenciado em relação aos cenários climáticos analisados (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

No cenário de baixas emissões (SSP1-2.6), a anomalia térmica — calculada como a diferença entre o período futuro mais quente e a referência histórica — aumenta em aproximadamente 1,99°C, o que representa uma elevação proporcional de 13,9% em relação ao valor de referência. Em contrapartida, o cenário intermediário (SSP2-4.5) revela um aumento mais acentuado, com uma anomalia de 3,08°C, correspondente a uma elevação proporcional de 21,5%. O cenário de altas emissões (SSP5-8.5), no entanto, demonstra uma ampliação extrema na anomalia térmica, atingindo 5,47°C, o que representa uma elevação proporcional de 38,1%.

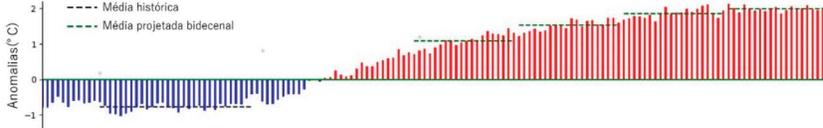
Esses resultados destacam que, além de um aumento absoluto nas temperaturas globais, a anomalia térmica se ampliará de forma significativa à medida que os cenários de emissões variam de controle rigoroso para ausência de mitigação. Essa ampliação não apenas reflete mudanças nas médias, mas também possíveis impactos em eventos extremos e em padrões climáticos locais, influenciando ecossistemas, agricultura e segurança hídrica.

Figura 2 – Variações anuais globais de temperatura do ar a altura da superfície, de 1950 a 2100, considerando os cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e as anomalias tendo em conta a média histórica de 1995-2014

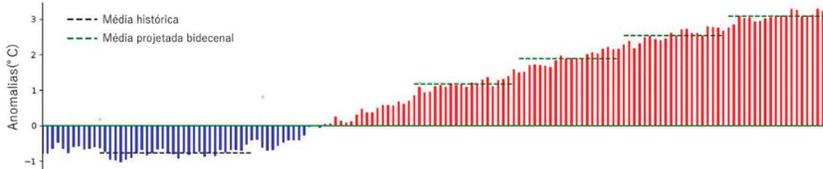
a) Variações anuais globais de temperatura considerando os cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5



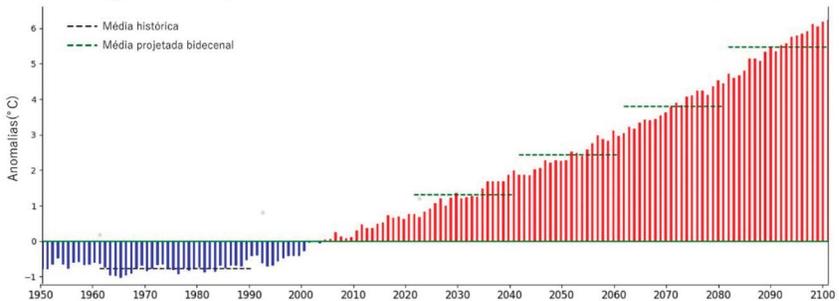
b) Anomalias anuais globais de temperatura considerando à média de 1995-2014 no cenário SSP1-2.6



c) Anomalias anuais globais de temperatura considerando à média de 1995-2014 no cenário SSP2-4.5



d) Anomalias anuais globais de temperatura considerando à média de 1995-2014 no cenário SSP5-8.5



Fonte: Elaborada pelos autores com base em Ridley et al. (2019), Good (2019, 2020a e 2020b).

As anomalias anuais globais de temperatura, calculadas em relação à média histórica de 1995-2014, apresentam variações significativas nos cenários projetados (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), destacando os impactos diferenciados das emissões de gases de efeito estufa no aquecimento global.

Para o cenário de baixas emissões (SSP1-2.6), ilustrado na Figura 2b, as anomalias globais indicam um aquecimento moderado ao longo do século. No período de 2021-2040, a anomalia média é de 1,08°C, aumentando para 1,52°C entre 2041-2060, 1,86°C de 2061-2080, e alcançando 1,99°C em 2081-2100. Esse cenário reflete a efetividade de ações climáticas rigorosas, limitando o aquecimento global a níveis mais próximos do limite estipulado pelo Acordo de Paris.

Já no cenário intermediário (SSP2-4.5), apresentado na Figura 2c, as anomalias mostram uma trajetória de aquecimento mais acentuada, mesmo com a aplicação de políticas climáticas moderadas. Para o período de 2021-2040, a anomalia é de 1,16°C, subindo para 1,88°C entre 2041-2060, 2,53°C de 2061-2080, e atingindo 3,07°C em 2081-2100. Esse aumento expressivo evidencia o impacto de medidas insuficientes para conter as emissões, resultando em maior aquecimento e consequentes alterações nos sistemas climáticos globais.

No cenário de altas emissões (SSP5-8.5), representado na Figura 2d, as anomalias apresentam os valores mais elevados, revelando um aquecimento extremo. Durante o período de 2021-2040, a anomalia média é de 1,30°C, aumentando rapidamente para 2,42°C em 2041-2060, 3,79°C de 2061-2080, e alcançando 5,46°C em 2081-2100. Esse cenário alerta para os impactos severos de uma trajetória sem mitigação, com implicações significativas para ecossistemas, populações humanas e eventos climáticos extremos.

As projeções dos cenários de emissões destacam as diferenças substanciais nas anomalias de temperatura global ao longo do tempo. Enquanto o cenário SSP1-2.6 mantém um aquecimento mais controlado, os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 ilustram o risco crescente associado à insuficiência de políticas climáticas. As tendências observadas reforçam a urgência de ações globais para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, minimizando o aumento das anomalias e seus impactos nos sistemas naturais e sociais.

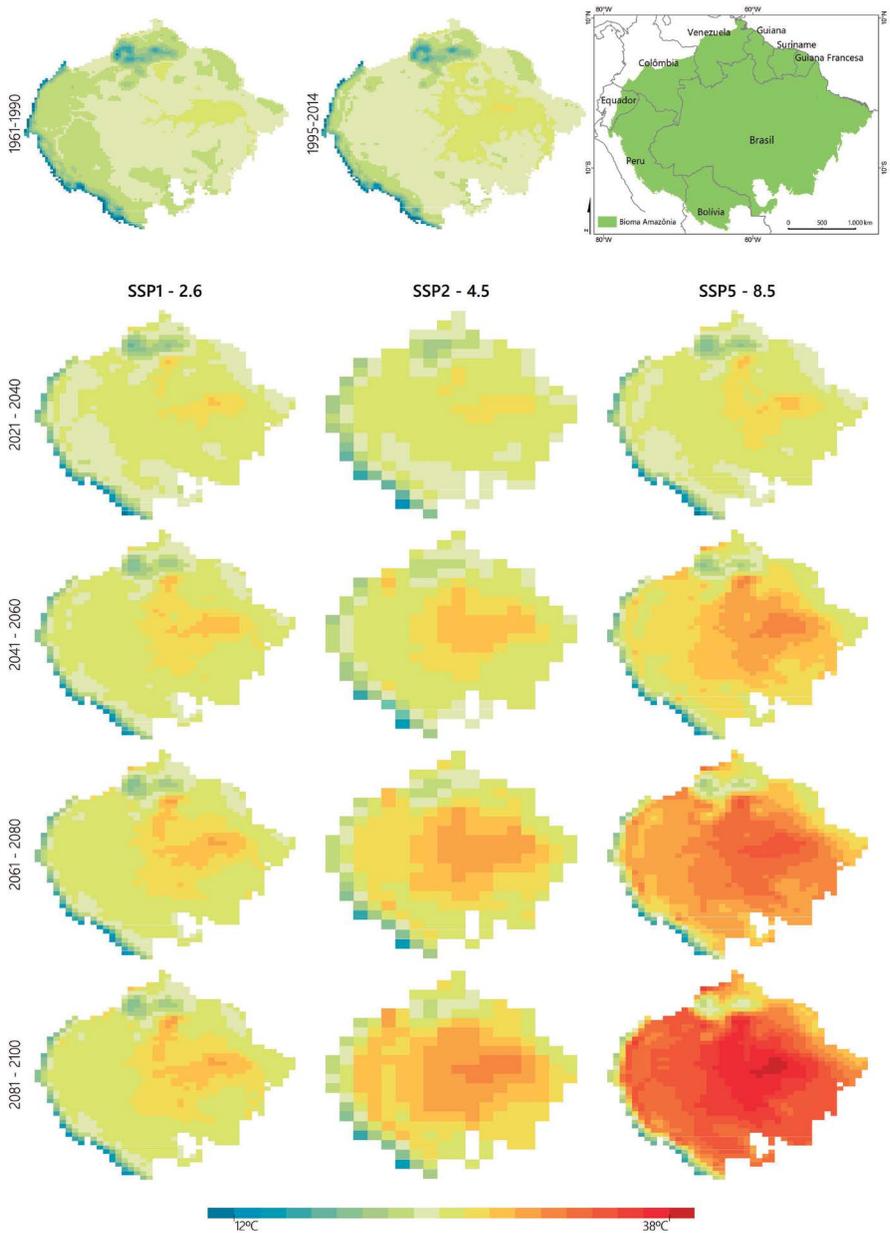
3.2 PARTICULARIDADES DAS MUDANÇAS DE TEMPERATURA NO BIOMA AMAZÔNIA

No que se refere às mudanças na temperatura no bioma Amazônia, considerando os dados históricos (1961-1990 e 1995-2014) e as projeções futuras, evidencia-se tanto um aumento consistente nas temperaturas médias ao longo do tempo quanto diferenças regionais relevantes (Figura 3). Durante 1995-2014, a temperatura média foi estimada em 26,47°C. Uma diferenciação abarcava temperaturas médias nas circunvizinhanças de Santarém (PA) de 30,66°C e nas circunvizinhanças da capital boliviana, La Paz, médias de temperatura de 8,86°C, chegando ao registro de temperaturas médias mais baixas em áreas de maior altitude nas circunvizinhanças de Satipo, no Peru, com uma média de 3,64°C. Quando se considera a temperatura média no período de 1995 a 2014, os 10% da extensão do bioma menos quentes apresentaram uma média de 24,44°C, enquanto os 10% com temperaturas mais quentes registravam temperatura média de 28,52°C, destacando a heterogeneidade térmica do bioma (Figura 3).

Quando o olhar se desloca para as projeções na temperatura no bioma Amazônia e se considera o cenário SSP1-2.6, as projeções indicam médias crescentes de 27,70°C em 2021-2040, 28,41°C em 2041-2060, 28,73°C em 2061-2080 e 28,82°C em 2081-2100.

No cenário SSP1-2.6, essas diferenças ganham novas gradações resultantes de incrementos graduais mais acentuados. Para o período de 2021-2040, 10% do bioma que abriga as áreas menos quentes possuem uma média de 25,70°C, enquanto as mais quentes chegam a 29,75°C. Nos períodos seguintes, as médias dos 10% menos quentes aumentam para 26,35°C (2041-2060), 26,62°C (2061-2080) e 26,74°C (2081-2100), enquanto os 10% mais quentes alcançam 30,50°C, 30,90°C e 30,91°C, respectivamente (Figura 3).

Figura 3 - Médias bidecenais de temperatura do ar a altura da superfície no bioma Amazônia de 1995 a 2100, considerando os cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5



Fonte: Elaborada pelos autores com base em Williams, et al. (2017), Good, (2019) e Jackson (2020a e 2020b).

As variações de temperatura evidenciam diferenças regionais nas dinâmicas de aquecimento, tanto que as circunvizinhanças de Santarém (PA), no cenário SSP1-2.6, apresentarão médias de 31,20°C em 2021-2040, e alcançarão 32,27°C em 2081-2100, uma anomalia de 1,61°C. Já nas circunvizinhanças de La Paz, neste mesmo cenário, as médias chegarão a 11,79°C, no biênio decenal 2021-2040, e a 12,96°C no final do século, sendo a anomalia de 4,10°C, valores alarmantes para um cenário otimista e de emissões controladas. Nas circunvizinhanças de Marabá (PA), a média de temperatura de 1995-2014 foi estimada em 29,02°C. Para o cenário SSP1-2.6, as projeções indicam um aumento gradual, com temperaturas médias de 29,42°C em 2021-2040, 29,42°C em 2041-2060, 30,28°C em 2061-2080 e 30,59°C em 2081-2100 (Figura 4).

Quando se considera o cenário SSP2-4.5, evidencia-se um aumento consistente das temperaturas médias ao longo do tempo, acompanhado por diferenciações internas. Para esse cenário, as médias projetadas são de 27,72°C no período 2021-2040, aumentando para 28,71°C em 2041-2060, 29,68°C em 2061-2080 e alcançando 30,28°C em 2081-2100 (Figura 3). Esses valores refletem um aquecimento acentuado em comparação ao período histórico.

Durante o período 2021-2040, os 10% da extensão do bioma menos quentes apresentaram uma média de 24,98°C, enquanto os 10% mais quentes alcançaram 29,83°C. Nos períodos seguintes, as médias dos 10% menos quentes aumentam para 25,88°C (2041-2060), 26,78°C (2061-2080) e 27,31°C (2081-2100). Por outro lado, os 10% mais quentes atingem 31,07°C em 2041-2060, 32,03°C em 2061-2080 e 32,67°C em 2081-2100, indicando um aumento contínuo tanto nas áreas mais frias quanto nas mais quentes do bioma.

Neste segundo cenário, a temperatura do ar nas circunvizinhanças de Santarém (PA) será em média de 30,42°C em 2021-2040 e 33,46°C em 2081-2100, uma anomalia de 2,80°C. Uma dilatação das médias de temperatura que ganha força na área central do bioma e alcança as circunvizinhanças de Boa Vista (RO) (Figura 3). Para localidades em áreas de maior altitude, como La Paz, projetam-se anomalias muito significativas em 2081-2100, alcançando 6,69°C.

Se são muito expressivas as elevações da temperatura projetadas para estes dois cenários, o cenário SSP5-8.5 evidencia um aumento ainda mais expressivo da média de temperatura no bioma. Para este cenário, as médias projetadas são de 28,06°C no período 2021-2040, aumentando para 30,05°C

em 2041-2060, 31,99°C em 2061-2080 e alcançando 34,36°C em 2081-2100, refletindo um aquecimento acentuado e consistente, associado ao cenário de emissões elevadas.

Durante o período 2021-2040, os 10% da extensão do bioma menos quentes apresentaram uma média de 25,99°C, enquanto os 10% mais quentes alcançaram 30,15°C. Nos períodos seguintes, as médias dos 10% menos quentes aumentam para 27,67°C (2041-2060), 29,32°C (2061-2080) e 30,96°C (2081-2100). Por outro lado, os 10% mais quentes atingem 32,41°C em 2041-2060, 34,48°C em 2061-2080 e alarmantes 37,13°C em 2081-2100, indicando uma intensificação significativa do aquecimento, com consequências muito variadas (Figura 3).

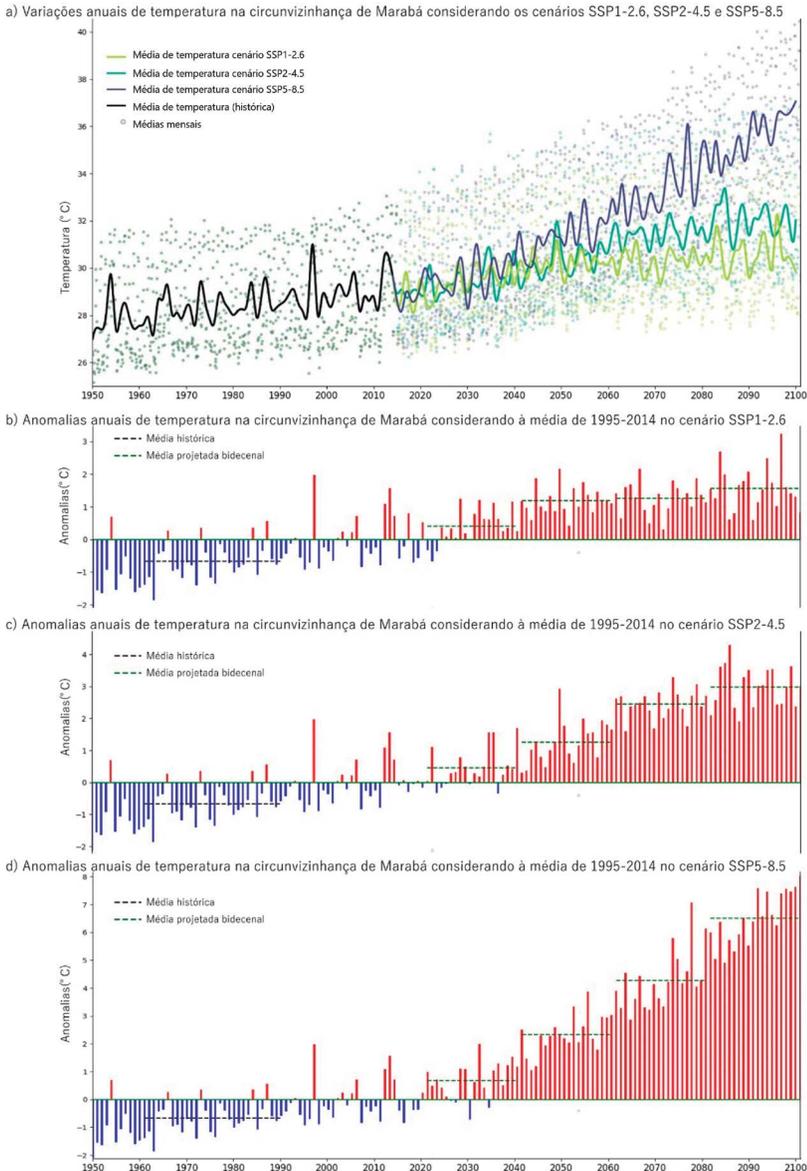
Nas circunvizinhanças de Santarém (PA), as médias projetadas para o período 2021-2040 são de 31,46°C e de 31,38°C para Boa Vista (RO), tanto que no mapa do bioma para este cenário é possível reconhecer estes pontos. Uma ampliação de temperatura que se amplia regionalmente e de intensidade alcançando nas últimas duas décadas do século, respectivamente, 37,63°C e 37,01°C. Valores que representam uma anomalia de 6,97°C para a primeira cidade e de 7,47°C para a segunda.

Nas circunvizinhanças de Marabá, no cenário SSP5-8.5, as temperaturas projetadas são mais elevadas, alcançando 29,70°C em 2021-2040, 33,30°C em 2061-2080 e 35,54°C em 2081-2100 (Figura 4a). Neste cenário, as anomalias de temperatura, calculadas em relação à média histórica de 1995-2014, são de 0,68°C para o período de 2021-2040, aumentando para 4,3°C em 2061-2080 e 6,5°C em 2081-2100.

Nas cidades localizadas em áreas de maior altitude, como a região nas coordenadas -15.625, -68.4375, apresentam médias de 13,63°C em 2021-2040 e 15,55°C em 2081-2100, com uma anomalia de 1,92°C e uma proporção de aumento de 14,1%. Regiões montanhosas como esta mostram aumentos proporcionais mais significativos, evidenciando o impacto do aquecimento global em gradientes térmicos locais.

Essas projeções para o cenário SSP5-8.5 destacam o impacto severo das emissões descontroladas sobre o bioma Amazônia, com consequências que incluem a intensificação de extremos climáticos, alterações na biodiversidade e nos regimes climáticos.

Figura 4 - Variações anuais de temperatura do ar a altura da superfície nas circunvizinhas de Marabá, de 1950 a 2100, considerando os cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e as anomalias tendo em conta a média histórica de 1995-2014



Fonte: Elaborada pelos autores com base em Williams, et al. (2017), Good, (2019) e Jackson (2020a e 2020b).

As manifestações do aquecimento global não ocorrem de forma linear; os diferentes cenários trazem variações nessas manifestações. Observam-se diferenciações ao comparar as anomalias de temperatura do ar em relação à média histórica de 1995–2014 para diferentes escalas geográficas. A análise permite compreender as tendências de aquecimento em contextos espaciais específicos.

No cenário de emissões reduzidas, SSP1-2.6, há um aumento controlado das anomalias em todas as escalas analisadas. No bioma Amazônia, as anomalias começam em 1,23°C (2021–2040), subindo gradualmente para 1,95°C (2041–2060), 2,27°C (2061–2080) e atingindo 2,36°C (2081–2100).

O planeta como um todo segue uma trajetória de crescimento mais suave, com anomalias variando de 1,08°C (2021–2040) para 1,99°C (2081–2100). Esse cenário reflete a eficácia de políticas climáticas globais voltadas para a mitigação de emissões.

No cenário intermediário SSP2-4.5, as anomalias aumentam de forma mais acelerada. No bioma Amazônia, as projeções mostram uma elevação de +1,24°C (2021–2040) para 3,81°C (2081–2100). De forma similar, a circunvizinhança de Marabá experimenta um aumento mais intenso, com anomalias que passam de 0,45°C (2021–2040) para +2,98°C (2081–2100).

A região de Carajás apresenta elevações de 0,74°C (2021–2040) para 3,44°C (2081–2100). No âmbito global, as anomalias atingem +3,07°C (2081–2100).

O cenário de emissões elevadas, SSP5-8.5, projeta aumentos dramáticos nas anomalias, com implicações severas para todas as escalas analisadas. O bioma Amazônia apresenta os maiores aumentos, partindo de +1,59°C (2021–2040) para alarmantes +7,90°C (2081–2100). Na circunvizinhança de Marabá, as anomalias variam de 0,68°C (2021–2040) para 6,51°C (2081–2100), indicando um futuro de altas temperaturas médias que comprometeriam significativamente ecossistemas e economias. Nos itens seguintes, se lança luz sobre a dinâmica do comportamento das temperaturas em áreas urbanas que já está sendo e será drasticamente impactado pelas perspectivas de aumento de temperaturas nos termos aqui apresentados.

3.3 O AUMENTO DAS ILHAS DE CALOR NA CIRCUNVIZINHANÇA DE MARABÁ

3.3.1 A formação de ilhas de calor

As ilhas de calor urbano ocorrem a partir de uma diversidade de fatores que se concatenam sobre o solo urbano, a começar pelas próprias características típicas de seu uso e de sua ocupação. A primeira característica pode ser entendida a partir dos materiais que compõem a paisagem urbana. As superfícies pavimentadas e as construções têm maior capacidade de absorção de calor do que áreas vegetadas, sobretudo, superfícies executadas em materiais escuros como o concreto e o asfalto. Ademais, a maioria dos materiais utilizados para a edificação do espaço urbano é pouco porosa, o que gera uma maior resistência para a dissipação do calor por meio da evaporação das chuvas (Gartland, 2010).

A segunda característica reside nas formas e na disposição das edificações; a verticalização das construções prolonga o período de exposição direta ao sol, o que aumenta a incidência direta de energia, principalmente em horários próximos do pôr do sol. Outrossim, dificultam o processo de arrefecimento do ar no espaço urbano no período noturno, pelo aumento da carga energética a ser dissipada e pela redução da velocidade dos ventos e, conseqüentemente, da troca de energia térmica pela convecção do ar (Landsberg, 1981; Oke, 1981).

A terceira característica do espaço urbano que estrutura a ilha de calor sobre seu microclima é a escala e a concentração populacional sobre o território, o que amplia a intensidade do calor induzido pelo ser humano, ou calor antropogênico. Este ocorre através de diversos usos e atividades cotidianas que demandam a dispersão de energia térmica no ambiente, tais como o uso de automóveis, o uso de equipamentos de resfriamento, a execução de processos produtivos manufaturados e industriais, e até o calor emanado pelas pessoas em si (Gartland, 2010; Waleed et al., 2023).

Por fim, a retirada da cobertura vegetal contribui fortemente para o aumento da temperatura nos centros urbanos, tanto pelo aumento de incidência solar direta sobre materiais de alta absorção térmica, mas, sobretudo, pela mudança no padrão de distribuição energética nos processos de aquecimento do solo e da atmosfera. Ao incidir sobre as superfícies, o calor gerado pela energia solar cumpre dois papéis fundamentais: o de aquecimento do solo e do ar (calor sensível) e de viabilizar a evaporação

(calor latente) (Biudes et al., 2015). Áreas com maior concentração vegetal conseguem direcionar parte da energia térmica despejada sobre a superfície e utilizá-la como energia necessária para viabilizar a evapotranspiração, atuando como um agente termohidrorregulador no ambiente (Guilherme et al., 2020; Waleed; Sajjad, 2022).

Em suma, a forma como as cidades são estruturadas e organizadas favorece o surgimento das ilhas de calor, que é intensificado pela incapacidade de mitigar os impactos da urbanização sobre o microclima local pela aplicação de políticas de controle e regulação ambiental.

Waleed et al. (2023) apontam que o fenômeno das ilhas de calor urbano tem sido visualizado com mais voracidade em regiões que passam por processos de urbanizações aceleradas, em geral marcado pelo espraiamento urbano – um processo caracterizado pela incorporação de novas áreas urbanas no entorno das cidades, a partir da anexação de áreas produtivas, em geral com baixa densidade populacional, e permeadas de vazios urbanos.

Essas mudanças na paisagem e no padrão de uso e ocupação do solo têm ocorrido especialmente em países em desenvolvimento e impactam mais o ambiente, tendendo a degradar mais intensamente o solo, rios e a vegetação existentes (Waleed et al., 2023).

Para Chen (2019), o espraiamento urbano é uma questão central nas discussões relativas às mudanças climáticas devido ao impacto que tem sobre as dinâmicas de uso e ocupação do solo e pela intensificação do uso de recursos naturais. Contudo, as estratégias e políticas públicas voltadas à redução desses impactos no ecossistema têm sido constantemente negligenciadas nos processos de planejamento do espaço urbano, especialmente em cidades do sul global, em geral para o atendimento de interesses econômicos.

3.3.2 A conformação do espaço urbano na região de Carajás

A região Amazônica tem sido alvo de uma série de alterações nas dinâmicas intraurbanas, resultantes do modo de urbanização que se instaurou na região, principalmente a partir da década de 1960. Em Carajás, tais configurações resultaram na conformação de uma região com intensa concentração fundiária (Monteiro, Mazutti, Silva, 2023) e que se articula em torno de disputas políticas e econômicas voltadas a dinâmicas rentistas, fundamentalmente às atividades que giram em torno da mineração e da

pecuária bovina (Monteiro e Silva, 2023) e, mais recentemente, à produção privada e continuada de espaços urbanos dedicados ao interesse especulativo (Rolim, 2024). Nas duas primeiras décadas do século XXI, essas dinâmicas rentistas culminaram na constituição de uma rede de cidades que articulam seus agentes e, por conseguinte, suas instituições – formais e informais – de planejamento, ordenamento, financiamento e uso do espaço urbano e do direito de construir, para viabilizar e incentivar as mudanças dos limites das cidades mediante

[...]processo de expansão da oferta de novos lotes urbanos ao entorno da mancha urbana consolidada através da incorporação de extensos projetos de loteamentos por parte de empresas de capital regional e nacional [...] em uma perspectiva de transformação do solo rural em solo urbano como processo de ordenamento e expansão da acumulação do capital[...] (Lima e Rolim, 2022).

As aceleradas expansões das manchas urbanas impactam substancialmente as dinâmicas intraurbanas das cidades da Amazônia Oriental, onde está Marabá, criando novos padrões morfológicos e de organização socioespacial, que, por sua vez, dão origem a novas centralidades intraurbanas (Lima e Rolim, 2022) e, portanto, a novas relações e distribuições socioambientais devido às diversas mudanças nos padrões de uso e ocupação do solo, sem uma estratégia adequada de mitigação do processo de degradação ambiental que é típico do processo de urbanização (Chen, 2019).

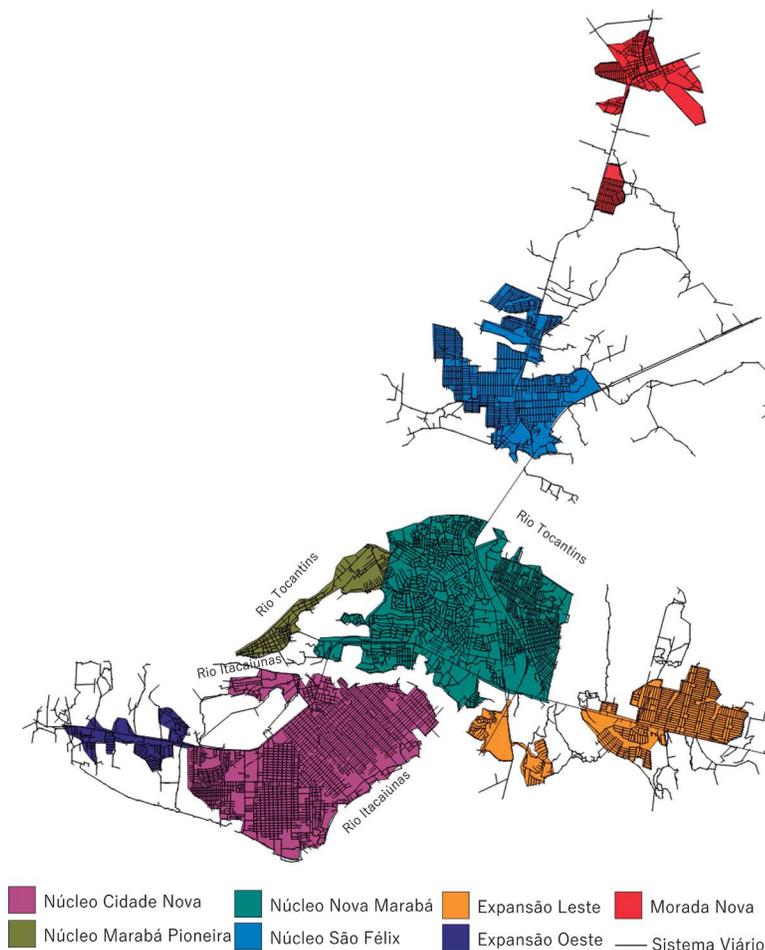
3.4 A EXPANSÃO URBANA E A FORMAÇÃO DE ILHAS DE CALOR EM MARABÁ

O espaço intraurbano de Marabá possui uma configuração morfológica polinucleada e bastante esparsa no território (Figura 5). Apresenta um padrão de grande desigualdade social, visível na desigualdade entre os distintos padrões de urbanização existentes nos núcleos que formam a cidade (Redón e Lima, 2021), e que são cortados pela Rodovia Transamazônica (BR-230), da qual há grande dependência para a estruturação do sistema viário, e pela interseção dos rios Tocantins e Itacaiúnas.

O processo de expansão urbana com baixa capacidade institucional de regulação territorial que tem ocorrido nas duas primeiras décadas do século XXI em Marabá tem proporcionado o agravamento dessas desigualdades socioespaciais, definindo morfologias que ampliam os limites da cidade de

maneira descontinuada, forçando o perímetro urbano sobre a terra rural e resguardando grandes áreas vazias dedicadas à especulação do solo. Na Figura 6 é possível verificar a expansão urbana de Marabá na década de 2010, que representou um aumento de 72% na extensão das faces de logradouro, e como as estratégias de produção resultaram na disposição de vazios urbanos dedicados à especulação, esgarçando a malha viária e espraiando sobremaneira o espaço urbanizado, com baixa densidade. Dinâmicas que consolidaram novas centralidades, intensificaram seus usos e ampliaram a dependência das rodovias federais como sistema viário estrutural (Lima e Rolim, 2022).

Figura 5 - Organização de núcleos urbanos de Marabá (2020)



Fonte: Elaborado pelos autores.

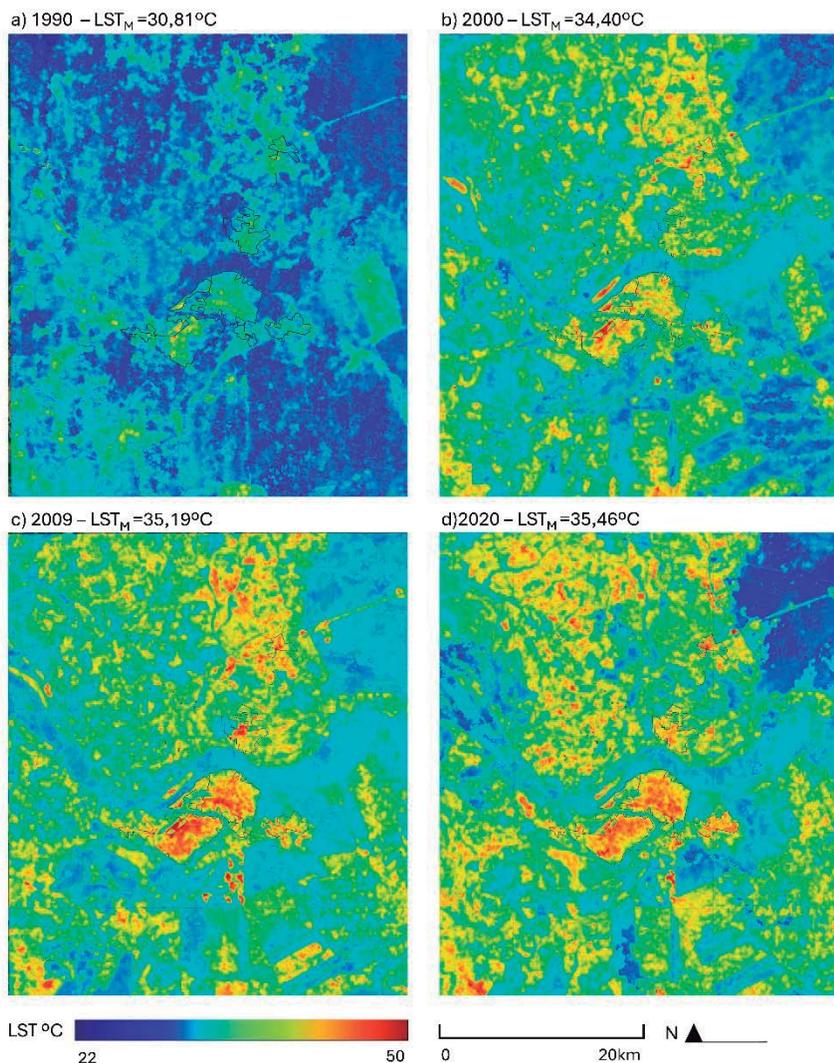
Figura 6 - Diagrama de faces de logradouro de Marabá nos anos de 2010, 2020 e comparativo



Fonte: Rolim (2024).

Tendo observado, por meio de dados do IBGE, o crescimento urbano de Marabá, na Figura 7 é possível visualizar as alterações de temperatura de superfície no decorrer de 30 anos de urbanização na circunvizinhança da cidade. Chama-se a atenção que, no ano de 1990 (Figura 7a), foram detectados pontos de elevado calor de superfície apenas no Núcleo Cidade Nova, de maneira mais específica na área do aeroporto. No ano 2000 (Figura 7b), já se nota a consolidação dos núcleos urbanos e, conseqüentemente, o aquecimento da superfície. A imagem nos apresenta também o avanço do desmatamento no entorno da cidade. Em 2009 (Figura 7c), os núcleos mais consolidados apresentam uma elevada concentração de altas temperaturas de superfície. Percebe-se ainda que o Núcleo São Félix já apresenta uma concentração de alta temperatura em seu centro local. Outro ponto importante em 2009 é a ampliação do distrito industrial, ao sul da mancha urbana, que também apresenta elevadas temperaturas sobre a superfície. Em 2020 (Figura 7d), percebe-se que as novas áreas urbanizadas se consolidam como frentes de ampliação de focos de elevadas temperaturas sobre a superfície, em especial na área de expansão leste. Ao todo, nos 30 anos analisados, em média, a superfície da circunvizinhança de Marabá aumentou 5,28°C, no mesmo polígono de análise.

Figura 7 - Medidas de LST para a circunvizinhança de Marabá



Fonte: Elaborado pelos autores.

Outro processo, adjacente à expansão da mancha urbana, que é visualizado nessa análise em Marabá, é a ampliação das ofertas de chacreamentos, subdivisão de uma propriedade rural em parcelas menores do que o permitido pela legislação, geralmente sem a devida autorização (INCRA) e sem atender aos requisitos legais para o parcelamento do solo, ocorrendo especialmente próximos à saída norte da cidade, no entorno do Núcleo São Félix e Morada Nova. Tal dinâmica constitui outra frente

de mudanças de uso e ocupação do solo, na circunvizinhança de Marabá, incorporando usos e densidades híbridas entre espaço urbano e espaço rural. No comparativo entre as Figuras 7c e 7d, percebemos o avanço dessas áreas de degradação sobre a porção noroeste do polígono, área que está se consolidando como nova frente de oferta de pequenos sítios e chácaras.

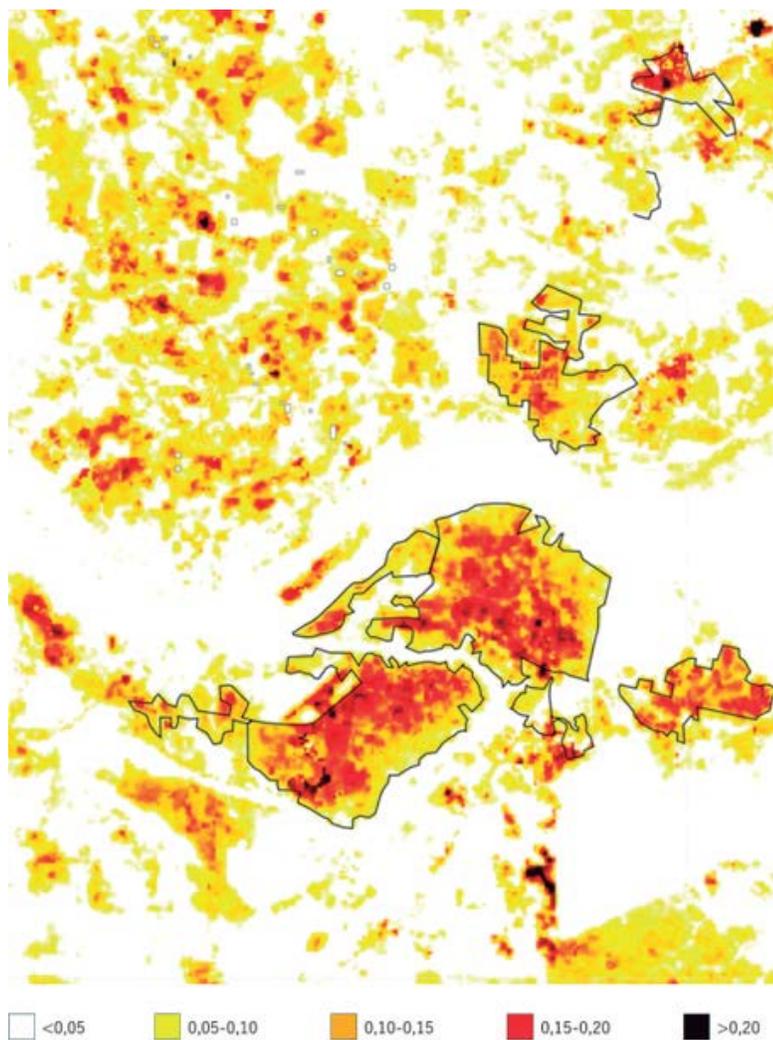
3.4.1 Aferição das ilhas de calor e avaliação ecológica

Ao calcularmos o UFTVI e especializarmos os resultados (Figura 8), identificamos que Marabá apresenta pontos muito críticos, com ilhas de calor de intensidade mais forte ($UFTVI > 0,20$ - em preto), garantindo, sobre esses pontos, uma avaliação ecológica péssima (ver Quadro 2). Destaca-se o distrito industrial (a sul do Núcleo Nova Marabá e área de expansão leste), o entorno do entroncamento entre a BR-230 e a PA-150, no ponto de maior integração morfológica da cidade (Lima e Rolim, 2022), o centro de Morada Nova e centros consolidados no Núcleo Cidade Nova. Além dos pontos péssimos, percebe-se que há formação de ilhas de calor muito fortes ($0,15 < UFTVI < 0,20$ - em vermelho) com condições ecológicas muito ruins, em todos os núcleos, de maneira muito intensa e homogênea sobre o Núcleo Cidade Nova. Destaca-se também que as áreas de expansão apresentam condições ecológicas muito ruins mesmo com uma ocupação de baixa densidade, replicando o padrão de degradação e reforçando as ilhas de calor mais centrais.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise apresentada evidencia a complexidade dos desafios relacionados ao aquecimento global e suas multifacetadas manifestações no bioma Amazônia. Nas áreas urbanas, as ampliações de temperatura têm interconexões relevantes com as ilhas de calor. No caso de Marabá (PA) e das demais cidades da região de Carajás, a expansão urbana desordenada amplia e reforça esta interconexão. A conformação espacial observada reflete não apenas escolhas históricas e institucionais, mas também conformações institucionais que ampliam padrões deletérios de uso e ocupação do solo, aumentando a degradação ambiental e social.

Figura 8 - Medidas de UFTVI para a circunvizinhança de Marabá



Fonte: elaborado pelos autores.

Trata-se de uma realidade social que requer mudanças muito significativas, capazes de impulsionar a incorporação das alterações comportamentais de múltiplos agentes sociais, já que estes, mesmo que influenciados por normas formais, tendem a manter seus comportamentos e experiências institucionais, o que é claramente insuficiente para mitigar os efeitos amplificados pelo modelo atual de ocupação do solo, cujos

aspectos negativos tendem a se agravar em decorrência do aquecimento significativo em todos os três cenários apresentados. Fica evidente que neste contexto de aumento constante das temperaturas globais e no bioma, as dinâmicas urbanas analisadas demonstram que a urbanização acelerada, aliada à falta de políticas de planejamento eficazes, reforça padrões de uso do solo que intensificam o fenômeno das ilhas de calor e ampliam vulnerabilidades socioambientais.

Dessa forma, a dinâmica do comportamento das temperaturas em áreas urbanas já está sendo e será drasticamente impactada pelas perspectivas de ampliação de temperaturas projetadas, especialmente sob os cenários de altas emissões. A expansão urbana e a intensificação do uso do solo reforçam a necessidade urgente de integrar estratégias que promovam a sustentabilidade urbana, incluindo a recuperação de áreas degradadas, a redução da impermeabilização do solo e a priorização de infraestrutura verde.

Conclui-se que a efetiva adaptação e mitigação dos efeitos deste aquecimento global requerem uma abordagem integrada, que não apenas reconheça as limitações institucionais e históricas, mas também projete um futuro em que o planejamento social e a gestão democrática da vida urbana sejam centrais para a construção de cidades resilientes, inclusivas e ambientalmente sustentáveis, capazes de equilibrar as demandas do crescimento urbano com a preservação dos recursos naturais e o bem-estar coletivo. A experiência de Marabá e da região de Carajás é um alerta e um convite para ações concretas que articulem ciência, política e sociedade na busca por soluções que revertam a atual trajetória e promovam a resiliência ambiental e social. As ilhas de calor urbanas, assim como as mudanças climáticas, são um reflexo das interações humanas com o meio ambiente, e sua mitigação depende do engajamento coletivo e da adoção de práticas mais sustentáveis de desenvolvimento. Este esforço deve priorizar não apenas o controle de emissões e a adaptação climática, mas também o fortalecimento de instituições capazes de mediar e direcionar escolhas urbanas em direção a um equilíbrio entre crescimento econômico, justiça social e preservação ambiental.

AGRADECIMENTOS

Ao Governo do Estado do Pará e à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Educação Superior, Profissional e Tecnológica (SECTET) pelo apoio concedido por meio de cooperação técnica e financeira, que possibilitou a elaboração deste artigo, sendo fundamental para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BOCK, L.; LAUER, A.; SCHLUND, M.; BARREIRO, M.; BELLOUIN, N.; JONES, C.; MEEHL, G. A.; PREDOI, V.; ROBERTS, M. J.; EYRING, V. Quantifying progress across different CMIP phases with the ESMValTool. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 21, 2020. DOI: 10.1029/2019JD032321.
- CASTELLANOS, E. et al. Central and South America. In: PÖRTNER, H.-O. et al. (Eds.). **Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. p. 1689–1816. DOI: 10.1017/9781009325844.014.
- CHEN, D. et al. Framing, context, and methods. In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (Eds.). **Climate change 2021: The physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. p. 147–286. DOI: 10.1017/9781009157896.003.
- CHEN, D.; LU, X.; LIU, X.; WANG, X. Measurement of the eco-environmental effects of urban sprawl: Theoretical mechanism and spatiotemporal differentiation. **Ecological Indicators**, v. 105, p. 6–15, 2019. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.05.059.
- CHEN, X.-L.; ZHAO, H.-M.; LI, P.-X.; YIN, Z.-Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. **Remote Sensing of Environment**, v. 104, n. 2, p. 133–146, 2006. DOI: 10.1016/j.rse.2005.11.016.
- DAVINI, P.; D'ANDREA, F. From CMIP3 to CMIP6: Northern Hemisphere atmospheric blocking simulation in present and future climate. **Journal of Climate**, v. 33, n. 23, p. 10021–10038, 2020. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0862.1.

DOBLAS-REYES, F. J. et al. Linking global to regional climate change. In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (Eds.). **Climate change 2021: The physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. p. 1363–1512. DOI: 10.1017/9781009157896.012.

DOUVILLE, H. et al. Water cycle changes. In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (Eds.). **Climate change 2021: The physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. p. 1055–1210. DOI: 10.1017/9781009157896.010.

EYRING, V. et al. Human influence on the climate system. In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (Eds.). **Climate change 2021: The physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. p. 423–552. DOI: 10.1017/9781009157896.005.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

GOOD, P. MOHC HadGEM3-GC31-LL model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. Version 6.2.20.1. Earth System Grid Federation, 2019. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.10851.

GOOD, P. MOHC HadGEM3-GC31-LL model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp126. Earth System Grid Federation, 2020a. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.10849.

GOOD, P. MOHC HadGEM3-GC31-LL model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. Earth System Grid Federation, 2020b. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.10901.

GUILHERME, A. P.; BIUDES, M. S.; MOTA, D. dos S.; DE MUSIS, C. R. Relação entre tipo de cobertura do solo e temperatura de superfície. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 32, p. 539–550, 2020. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-47462.

HAN, J. Can urban sprawl be the cause of environmental deterioration? Based on the provincial panel data in China. **Environmental Research**, v. 189, 2020. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109954.

HODGSON, G. M. **Economics and evolution: bringing life back into economics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

HODGSON, G. M. **Economics and institutions: a manifesto for a modern institutional economics**. Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 1988.

HODGSON, G. M. **How economics forgot history: the problem of historical specificity in social science**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

HODGSON, G. M. **The evolution of institutional economics**. London: Routledge, 2004.

HODGSON, G. M. What are institutions? **Journal of Economic Issues**, v. 40, n. 1, p. 1–25, 2006.

HSU, H.; DIRMEYER, P. A. Uncertainty in projected critical soil moisture values in CMIP6 affects the interpretation of a more moisture-limited world. **Earth's Future**, v. 11, e2023EF003511, 2023. DOI: 10.1029/2023EF003511.

IPCC. **Climate change 2021: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: 10.1017/9781009157896.

JACKSON, L. **MOHC HadGEM3-GC31-MM model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp126**. Version 6.2.37.5. Earth System Grid Federation, 2020a. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.10850.

JACKSON, L. **MOHC HadGEM3-GC31-MM model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585**. Version 6.2.37.5. Earth System Grid Federation, 2020b. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.10902.

JANTSCH, E. **Inter-and transdisciplinary university: a systems approach to education and innovation**. **Higher Education**, v. 1, n. 1, p. 7–37, 1972.

LANDSBERG, H. E. **The urban climate**. Maryland: Academic Press, 1981.

LIGUORI, I. N.; MONTEIRO, L. M. Ilha de calor de superfície e indicadores geoespaciais: avaliação decadal comparativa por sensoriamento remoto. **Ambiente Construído**, v. 24, 2024. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/138042>. Acesso em: 20 nov. 2024.

LIMA, A. P. C.; LIMA, J. J. F.; ROLIM, L. F. **Conversão de terra rural em urbana na Amazônia: uma análise a partir da configuração das cidades de Parauapebas e Canaã dos Carajás no Pará**. In: 1º Simpósio Brasileiro de Sintaxe Espacial, Brasília, 2022. Anais [...].

LIMA, J. J. F.; ROLIM, L. F. A inserção das cidades na configuração da fronteira amazônica: um estudo de morfologia urbana na região de Carajás, 2010–2020. *Novos Cadernos NAEA*, v. 25, n. 4, dez. 2022. ISSN 2179-7536. DOI: 10.18542/ncn.v25i4.12849.

MITCHELL, J. M. The temperature of cities. *Weatherwise*, v. 14, n. 6, p. 224–258, 1961. DOI: 10.1080/00431672.1961.9930028.

GOOD, P. **MOHC HadGEM3-GC31-LL model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245**. Earth System Grid Federation, 2019. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.10851.

MONTEIRO, M. A.; SILVA, R. P. Expansão geográfica, fronteira e regionalização: a região de Carajás. *Confins*, n. 49, 2021. DOI: 10.4000/confins.35296.

MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, v. 463, n. 7282, p. 747–756, 2010.

NAIM, M. N. H.; KAFY, A.-A. Assessment of urban thermal field variance index and defining the relationship between land cover and surface temperature in Chattogram city: a remote sensing and statistical approach. *Environmental Challenges*, v. 4, 2021, 100107. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100107.

NEGRON-JUAREZ, R. et al. Coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) high resolution model intercomparison project (HighResMIP) bias in extreme rainfall drives underestimation of Amazonian precipitation. *Environmental Research Communications*, v. 6, n. 9, p. 091001, 2024. DOI: 10.1088/2515-7620/acb5ea.

PAINÇAL, J.; NUNES, C.; FERNANDES, A. Impacto do stress térmico por calor na saúde do trabalhador da indústria. *Revista Portuguesa de Saúde Ocupacional*, v. 5, p. 45–50, 2018. DOI: 10.31252/RPSO.02.01.2018.

PRESTON, S. H. Urban growth in developing countries: a demographic reappraisal. *Population and Development Review*, v. 5, n. 2, p. 195–215, 1979. DOI: 10.2307/1971823.

RIDLEY, J.; MENARY, M.; KUHNBRODT, T.; ANDREWS, M.; ANDREWS, T. **MOHC HadGEM3-GC31-MM model output prepared for CMIP6 CMIP historical**. Earth System Grid Federation, 2019. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.6112.

RIDLEY, J.; MENARY, M.; KUHNBRODT, T.; ANDREWS, M.; ANDREWS, T. **MOHC HadGEM3-GC31-LL model output prepared for CMIP6 CMIP historical**. Earth System Grid Federation, 2019. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.6109.

ROLIM, L. F. **A dinâmica expansão urbana na Amazônia: um estudo sobre a apropriação da renda fundiária urbana na região de Carajás**. 2024. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)—Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, 2024. DOI: 10.6084/m9.figshare.27661743.v1.

TOMLINSON, C. J.; CHAPMAN, L.; THORNES, J. E.; BAKER, C. Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies: a case study for Birmingham, UK. **International Journal of Health Geographics**, v. 10, n. 42, 2011. DOI: 10.1186/1476-072X-10-42.

WALEED, M.; SAJJAD, M. Leveraging cloud-based computing and spatial modeling approaches for land surface temperature disparities in response to land cover change: evidence from Pakistan. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 25, 2022. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100665.

WALEED, M.; SAJJAD, M.; ACHEAMPONG, A. O.; ALAM, M. T. Towards sustainable and livable cities: leveraging remote sensing, machine learning, and geo-information modelling to explore and predict thermal field variance in response to urban growth. **Sustainability**, v. 15, n. 1416, 2023. DOI: 10.3390/su15021416.

WALEED, M.; SAJJAD, M.; SHAZIL, M. S. Urbanization-led land cover change impacts terrestrial carbon storage capacity: a high-resolution remote sensing-based nation-wide assessment in Pakistan (1990–2020). **Environmental Impact Assessment Review**, v. 105, 2024, 107396. DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107396.

WILLIAMS, K. D. et al. The Met Office Global Coupled model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) configurations. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 10, p. 357–380, 2017. DOI: 10.1002/2017MS001115.

ZHANG, Y.; YIYUN, C.; QING, D.; JIANG, P. Study on urban heat island effect based on normalized difference vegetated index: a case study of Wuhan City. **Procedia Environmental Sciences**, v. 13, p. 574–581, 2012. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.01.048.

Submissão: 21/08/2024 • Aprovação: 18/12/2024