

**Impactos microclimáticos da arborização de calçadas em regiões de
clima tropical: estudo de caso em Cuiabá-MT**

*Microclimatic impacts of sidewalk tree planting in tropical climate regions: a case study
in Cuiabá-MT*

Gabriela Kehrwald Nunes

Discente do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil
gabriela.kehrwald@outlook.com

Ivan Julio Apolonio Callejas

Professor Doutor, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil
Ivan.callejas@ufmt.br

Luciane Cleonice Durante

Professora Doutora, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil
luciane.durante@ufmt.br

RESUMO

Esta pesquisa investiga, por meio de simulação computacional, os benefícios microclimáticos proporcionados pela implantação de vegetação arbórea em calçadas urbanas, considerando sua eficácia como estratégia de mitigação microclimática. A metodologia envolveu a modelagem computacional *no software* ENVI-met, com validação a partir de dados empíricos coletados *in loco*, permitindo simulações de um ambiente urbano com e sem a presença de arborização de acompanhamento viário. Os maiores benefícios da arborização no calçamento para os pedestres ocorreram às 14h, com redução de até -10 °C nos valores do índice PET em decorrência da diminuição da temperatura do ar (T_a) em -1°C, da elevação da umidade relativa do ar (UR) em 3%, da diminuição da temperatura média radiante (T_{mr}) em -5°C e elevação da velocidade do ar (V_a). No entanto, observou-se elevação da T_{mr} durante a noite e de madrugada, evidenciando o chamado “efeito guarda-chuva”, o que acarretou ligeira elevação no nível de estresse térmico noturno. O estudo reforça a importância da vegetação como infraestrutura para o calçamento urbano com vistas a reduzir os níveis de estresse térmico dos pedestres durante o período diurno em regiões de clima tropical. Sob o ponto de vista social e ambiental, a incorporação estratégica da arborização viária proporciona maior resiliência climática e conforto térmico, contribuindo para políticas públicas de adaptação às mudanças climáticas. Recomenda-se a ampliação da pesquisa com diferentes espécies, densidades e condições sazonais, a fim de aprimorar o planejamento climático das cidades.

PALAVRAS-CHAVE: Conforto térmico. Arborização de calçamento. Arranjo arbóreo. Clima tropical.

ABSTRACT

This research investigates, through computational simulation, the microclimatic benefits provided by the implementation of tree vegetation on urban sidewalks, considering its effectiveness as a microclimatic mitigation strategy. The methodology involved computational modeling using the ENVI-met software, validated through empirical data collected on-site, allowing simulations of an urban environment with and without roadside tree planting. The greatest benefits of sidewalk tree planting for pedestrians occurred at 2:00 PM, with a reduction of up to -10°C in PET index values due to a decrease in air temperature (T_a) by -1°C, an increase in relative humidity (RH) by 3%, a reduction in mean radiant temperature (MRT) by -5°C, and an increase in air velocity (V_a). However, an increase in MRT was observed at night and early morning, highlighting the so-called “umbrella effect,” which led to a slight rise in nighttime thermal stress levels. The study reinforces the importance of vegetation as an urban sidewalk infrastructure to reduce pedestrian thermal stress levels during the daytime in tropical climate regions. From a social and environmental perspective, the strategic incorporation of roadside tree planting provides greater climate resilience and thermal comfort, contributing to public policies for climate change adaptation. It is recommended the expansion of research with different species, densities, and seasonal conditions to improve urban climate planning.

KEYWORDS: Thermal comfort. Urban vegetation. Tropical climate

1 INTRODUÇÃO

Os impactos causados pelas mudanças climáticas constituem uma das principais preocupações das sociedades e lideranças mundiais, sobretudo no contexto urbano. As cidades, marcadas por elevados índices de impermeabilização e pela escassez de áreas verdes, tornam-se particularmente vulneráveis a fenômenos como ondas de calor, alagamentos e degradação ambiental. Especialmente no caso das cidades brasileiras, o crescimento acelerado tem gerado diversos impactos ambientais, associados à ocupação e transformação do meio natural sem o devido planejamento e sem uma abordagem centrada na sustentabilidade urbana. Um dos principais reflexos dessas intervenções antrópicas é a alteração do clima urbano, o que agrava ainda mais as condições ambientais locais (Nascimento, 2011).

A expansão urbana e o adensamento populacional tendem a reduzir significativamente as áreas verdes, resultando na diminuição da evapotranspiração e da infiltração de água no solo. Além disso, a ausência de vegetação contribui para a intensificação do fenômeno das ilhas de calor urbanas, o que agrava o desconforto térmico, eleva a temperatura do ar e gera impactos negativos à saúde, ao uso dos espaços públicos e ao consumo energético (Souza; Nery, 2010; Gartland, 2010). Nesse cenário, torna-se fundamental buscar estratégias que contribuam para mitigar os efeitos dessas mudanças.

Reconhece-se que a vegetação desempenha papel na melhoria do microclima urbano. Ambientes urbanos com maior presença de vegetação tendem a apresentar temperaturas mais amenas, umidade relativa mais elevada e melhores condições de conforto térmico (Kardan *et al.*, 2016). Conforme Wassouf (2014), a vegetação contribui não apenas para a redução da incidência solar direta, como também para a melhoria da qualidade do ar e para a promoção de um ambiente mais sustentável. Diversos estudos comprovam que a presença de vegetação urbana é fundamental para o controle das variações térmicas, especialmente em regiões de clima tropical (Callejas *et al.*, 2011; Alves *et al.*, 2017; Pinheiro; Souza, 2017).

Logo, a implantação de vegetação arbórea em calçadas revela-se como estratégia para tornar as áreas destinadas à circulação de pedestres mais aprazíveis e ambientalmente qualificadas, favorecendo, ainda, a interação social. Nesse sentido, a arborização dos passeios públicos constitui para promover melhor qualidade de vida à população urbana, gerando benefícios nos âmbitos social, ecológico e paisagístico (Silva; Xavier; Alvarez, 2015).

A implantação da arborização nas cidades, em geral, é orientada por um Plano Diretor de Arborização Urbana, que estabelece normas para o plantio, incluindo espaçamento, espécies e porte vegetal. Esse plano tem por objetivo minimizar conflitos entre a arborização e a infraestrutura urbana, assegurando a segurança e a acessibilidade dos pedestres, bem como o pleno funcionamento das redes públicas. Em Cuiabá-MT, o Decreto nº 5.144, oficializado em 15 de fevereiro de 2012 (Cuiabá, 2012), define diretrizes para a arborização pública em áreas urbanas e distritos do município. De acordo com o decreto, a arborização pública refere-se à vegetação localizada em vias e logradouros públicos, com finalidades ornamentais, de amenização climática, purificação do ar, atenuação da poluição sonora, deposição de poeira atmosférica e atração da fauna local. Além de regulamentar as disposições da arborização nas calçadas, o decreto estabelece que o plantio de árvores, junto às edificações, deve seguir as orientações do órgão municipal competente, sendo parte integrante do projeto arquitetônico.

Assim, recomenda-se que os projetos urbanísticos considerem tais diretrizes para garantir uma adequada implantação da vegetação nos espaços públicos.

Com base nesse panorama, a presente pesquisa investiga, por meio de simulação computacional através do *software ENVI-met*, os benefícios microclimáticos proporcionados pela implantação de vegetação arbórea em calçadas urbanas, comparando-as com calçadas desprovidas de vegetação, a fim de avaliar o potencial da vegetação como estratégia para mitigação do desconforto térmico em espaços urbanos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Definição da área de estudo e local da pesquisa

A pesquisa desenvolve-se na região Centro-Oeste do Brasil, na cidade de Cuiabá, capital do Estado de Mato Grosso (Figura 1). A cidade apresenta clima tropical de savana (Aw Köppen-Geiger), com a presença de estações quente-úmida e quente seca (Nimer, 1989). A capital tem temperaturas média, mínima e máxima anuais de 27,9°C, 23,0°C e 30,0°C, respectivamente (Callejas *et al.*, 2019).



Fonte: Google Imagens e SIG Cuiabá, 2025. Adaptado pelos Autores.

Considerou-se um recorte territorial para o estudo, situado no Residencial Santa Terezinha II, sendo uma região composta de habitações populares do programa do Governo Federal, Minha Casa Minha Vida. A região apresenta diferentes graus de arborização, com a maioria das casas implantadas sem espécimes arbóreos (Figura 2a), ainda que exista algumas habitações que apresentem arborização, proporcionando sombreamento (Figura 2b).

Figura 2 – Caracterização do objeto de estudo em relação à presença de arborização



Fonte: Google Street View, 2024

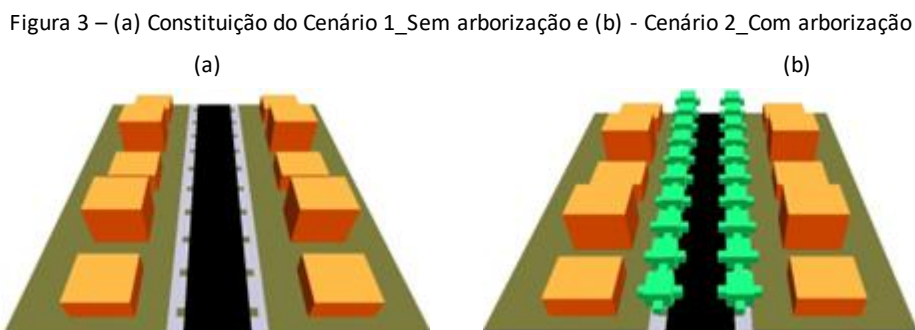
2.2 Coleta de dados

Os dados meteorológicos utilizados foram aqueles captados durante uma pesquisa anterior realizada na região, onde se coletou dados referentes às variáveis de temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m/s) e radiação solar direta (W/m²), todas registradas entre os dias 11 e 12 de julho de 2019. A escolha dessas datas se deve à coincidência com o período de realização de trabalhos de medições em campo, possibilitando a verificação entre os dados coletados, com o objetivo de analisar as condições climáticas predominantes e seus impactos.

2.3 Determinação dos parâmetros dos cenários

Para a modelagem dos cenários do estudo (Figura 3a e 3b), identificou-se a tipologia das edificações, categorizou-se os elementos constituintes da área e definiu-se as propriedades termofísicas dos materiais construtivos e revestimentos. Ao final, os elementos constituintes foram categorizados em: revestimentos (solo nu, asfalto e concreto), vegetação (forração, arbustiva e arbórea), sistema de cobertura e sistema de vedação vertical.

As propriedades físicas e térmicas dos materiais de vedação e cobertura identificados foram obtidas conforme NBR 15.220 (ABNT, 2022). Para os demais, utilizou-se valores padrões do banco de dados do *software* ENVI-met. Para captar a influência microclimática no entorno das calçadas e edificações, o grid unitário adotado foi de 1x1x1m e total de 50x50x25 (x,y,z).



Fonte: Autoria Própria, 2025

2.4 Determinação dos parâmetros da vegetação

Como no cenário original (cenário 1) não havia a presença de espécimes arbóreas, não foi necessário a classificação quanto a características dendrométricas e densidade de área foliar pré-existente. Por sua vez, o cenário 2 foi modelado utilizando dez exemplares de *Licania Tomentosa* (Oiti) em cada calçada, seguindo as diretrizes propostas pelo Decreto nº 5.144 (Cuiabá, 2012) de arborização pública em áreas urbanas, que estabelece que para calçadas de vias locais com calçamento de até 2,0m de largura, árvores de acompanhamento viário de pequeno porte, com altura e distância de implantação indicados na Tabela 1. A escolha dessa espécie se justifica por ser uma arborização indicada no decreto, ser de ampla utilização na região, adaptada ao clima local e de fácil manutenção.

Tabela 1 – Especificações da espécie *Licania Tomentosa* (Oiti)

Parâmetros	Valor
Altura	5 m
Diâmetro da copa	5 m
Espaçamento entre a arborização	5 m
IAF (índice de área foliar)	6,3 m ² /m ²
DAF (Densidade de área foliar, homogêneo na altura)	1,23 m ² /m ³

Fonte: Autoria Própria, 2025

2.5 Procedimento de calibração do modelo

Para a simulação no programa ENVI-met, utilizou-se as seguintes abas: "Configurações Gerais" e "Forçamento Simples". Na primeira, foram estabelecidas as configurações iniciais para o período de simulação e condições atmosféricas observadas no dia anterior à data desejada para a simulação (Tabela 2). Na aba seguinte, são introduzidos dados meteorológicos de temperatura e da umidade do ar registrados pela Estação meteorológica, visando “forçar” os dados simulados a se aproximarem dos medidos.

Tabela 2 – Parâmetros de entrada para a simulação no *software* ENVI-met

Parâmetros	Dados
Data de início da simulação	11/07/2019
Hora de início	20h00min0s
Duração total	27 horas
Intervalo de Registro	60 min
Velocidade do vento a 10m	0,90m/s
Direção do vento	255°
Rugosidade z0 no ponto de referência	0,010m
Temperatura inicial da atmosfera	26,22°C
Umidade específica a 2500m	12,7 g/kg
Umidade relativa a 2m	45%

Fonte: Autoria Própria, 2025

Após simulação, calculou-se o Erro Absoluto Médio (EAM), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) e Índice de Concordância “d”. O “EAM” representa a média entre os dados coletados e simulados, enquanto o “REQM” resulta na média quadrática dos erros entre os dados medidos e simulados. Quanto menores os resultados, mais os valores simulados se aproximam dos medidos. Já o “d” mede o grau em que os valores resultantes da simulação estão livres do erro, variando de 0 a 1, onde quanto mais próximo ao um, maior é a concordância entre os dados (Willmott, 1982). Os resultados serão apresentados posteriormente.

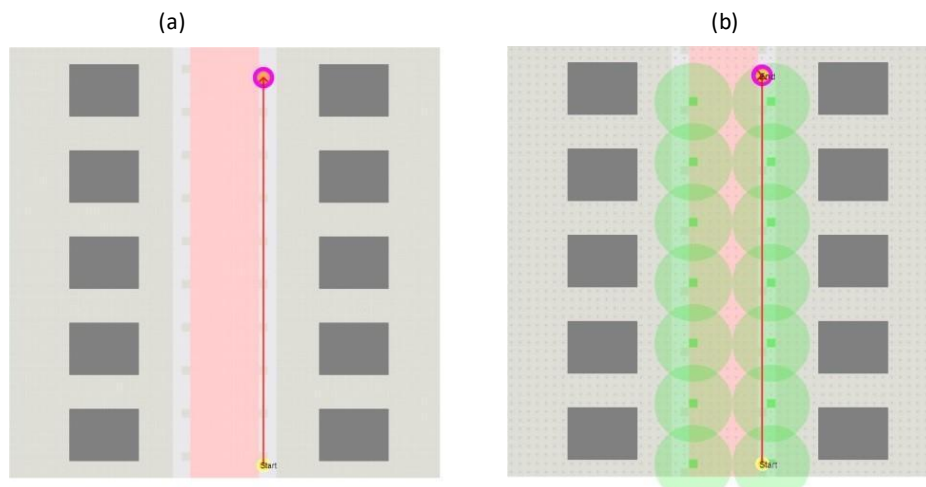
2.6 Avaliação dos impactos proporcionados pela implantação de vegetação

Considerado calibrado o modelo computacional, partiu-se para a simulação do modelo hipotético com a implantação de arborização nas calçadas. Para quantificar os benefícios do uso

de vegetação nas calçadas nas variáveis ambientais de temperatura do ar (T_a) e umidade relativa do ar (UR), temperatura radiante média (T_{rm}) e velocidade do ar (v_a), mapas temáticos (cromáticos) das diferenças entre simulações ao nível dos usuários foram confeccionados para permitir avaliações quantitativas e qualitativas das diferenças observadas, permitindo assim identificar a extensão espacial da influência das árvores. Os horários e frequências das observações microclimáticas selecionadas para a produção dos mapas seguiram aqueles prescritos pela Organização Meteorológica Mundial, adaptados ao período local (OMM 2008), referente aos horários das 6h, 14h e 20h, no horário local.

Complementarmente, avaliou-se o índice Temperatura Equivalente Fisiológica (PET) considerando um pedestre caminhando ao longo da calçada em um percurso pré-estabelecido, derivado a partir do *software* Bio-MET, na aba *Dynamic Comfort*, disponibilizado pelo *software* ENVI-met (Figura 4). Para o cálculo do índice, considerou-se para os dados pessoais deste pedestre os valores de altura, peso e idade, referentes ao homem/mulher média estabelecidos pela norma ISO 8896 (2004), com vestimenta equivalente a um traje de verão (0,5 clo) e atividade metabólica equivalente à caminhada leve a 1,34km/h, conforme procedimentos estabelecidos pelo próprio *software*. Buscou-se avaliar a influência da implantação de vegetação no conforto térmico ao longo da caminhada pela calçada.

Figura 4 – (a) Percurso no Cenário 1_Sem arborização e (b) Percurso no Cenário 2_Com arborização



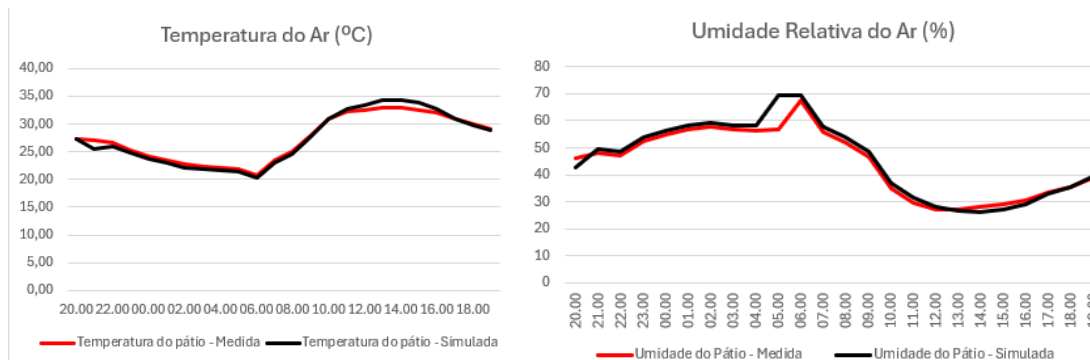
Fonte: Autoria Própria, 2025

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Validação do modelo simulado

O modelo idealizado no ENVI-met é capaz de representar a variação diária da temperatura e umidade do ar, medidos em campo conforme pode ser observado na Figura 5. Apesar da similaridade, a curva da temperatura do ar simulada apresentou valores ligeiramente subestimados, comportamento também observado por Forouzandeh (2018), que atribuiu em parte às diferenças devido à incidência de radiação solar nos abrigos que alojam os instrumentos de medição. De forma oposta, a curva da umidade relativa do ar simulada apresentou valores superestimados. As diferenças médias entre os dados de temperatura e umidade do ar são de 0,09°C e 1,19%, respectivamente.

Figura 5 – Curso da temperatura e umidade relativa do ar medida (vermelho) e simulada (preto)



Fonte: Autoria Própria, 2025

A partir dos dados, realizou-se a análise estatística entre os dados medidos em campo e os simulados, onde estimou-se baixos valores para o EAM e REQM e elevado índice de concordância (Tabela 3). Assim, as simulações apresentam precisão aceitável para área pesquisada, conforme estudos similares sobre o tema (Callejas *et al.*, 2022). Portanto, o modelo idealizado no ENVI-met reproduz com confiança o microclima, possibilitando simulações a partir de cenários hipotéticos.

Tabela 3 - Indicadores de desempenho de calibração

Variáveis	EAM	REQM	d
Ta (°C)	1,02	0,71	0,99
UR (%)	0,97	3,00	0,99

Fonte: Autoria Própria, 2025

3.2 Impacto da implantação de vegetação nas variáveis ambientais

Ao analisar o comportamento microclimático nos mapas cromáticos das calçadas e vias, percebe-se que a implantação da vegetação afeta as variáveis ambientais de forma distinta (Figura 6). Cabe destacar que valores negativos expressam redução, enquanto positivos, elevação nas variáveis pesquisadas (T_{ar} , UR, T_{mr} e v_a).

Em relação a variável temperatura do ar, nota-se efeito de arrefecimento evaporativo devido a implantação da arborização, a qual é capaz de beneficiar tanto as calçadas e via, como terrenos nas edificações adjacentes em todos os horários, apesar de menor intensidade nos horários das 6 e 20h (Figura 6a). O impacto é maior na porção sudeste (redução de até -1°C), com menor intensidade na porção central (de $-0,5^{\circ}\text{C}$ até -1°C). Apesar de reduzido (de 0°C até $-0,11^{\circ}\text{C}$), o efeito de resfriamento em decorrência da transpiração impacta a porção noroeste do recorte, principalmente no horário das 14h. É possível visualizar ainda no mapa que o efeito de arrefecimento se estende para além dos locais onde foram implantadas as árvores, influenciando os terrenos das edificações adjacentes, localizados na região oeste e leste. Esse comportamento decorre do fluxo de ar que se estabelece no recorte, uma vez que ele foi modelado sem muros ou outras vedações verticais, o que favorece a ventilação cruzada e, conseqüentemente, o carregamento desse efeito para fora da área de implantação da

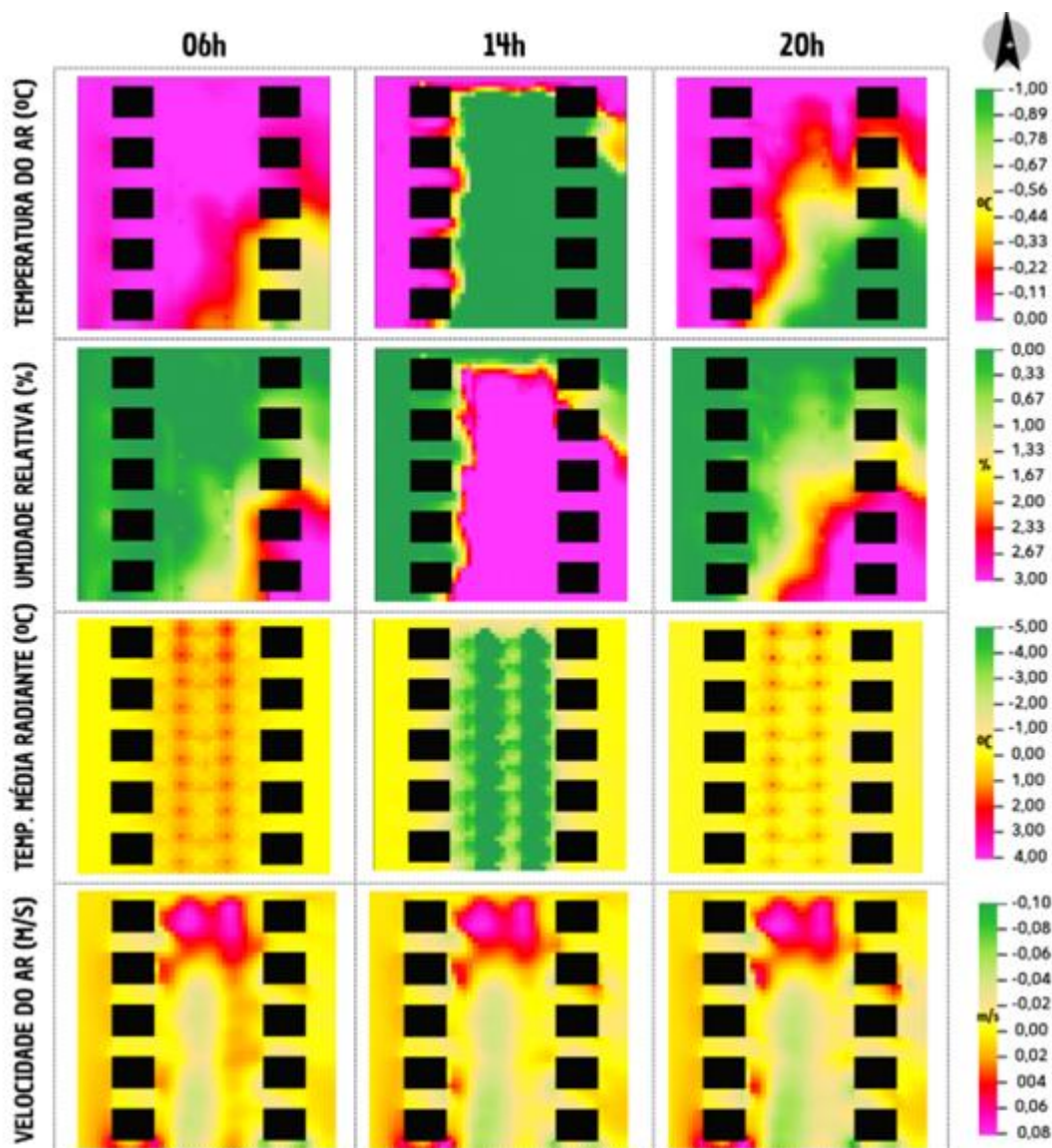
arborização.

Comportamento similar é observado na umidade relativa do ar, onde a inserção das vegetações beneficia não só as calçadas, mas também terrenos e vias em todos os horários pesquisados, induzindo a um ambiente ligeiramente mais úmido (Figura 6b). As maiores elevações são observadas na porção mais sudeste do recorte (elevação superior a 3%), com o quadrante noroeste sendo menos afetado pela transpiração das espécies (de 0% a 0,33%). Mesmo assim, como ocorre para a temperatura do ar, o efeito de umidificação ainda é carregado para os terrenos das edificações, principalmente nos horários das 14h, demonstrando-se a importância de se projetar vias permeáveis, evitando barreira como a proporcionada por muros altos, o que favorece não só a distribuição da umidade nas calçadas e vias, como nos interiores das propriedades. Os maiores impactos nessa variável são identificados no horário das 14h.

A avaliação dos mapas de variação da temperatura média radiante (T_{mr}) nos horários analisados revela padrões diferenciados entre o período noturno e o diurno (Figura 6c). Durante a noite, entre 20h e 6h, verifica-se um aumento na T_{mr} , com diferenças que chegam a 2°C. Esses incrementos ocorrem de forma localizada, principalmente sob as copas das árvores implantadas, sendo mais evidentes nas áreas de calçadas. Esse fenômeno é resultado do chamado "efeito guarda-chuva", em que a folhagem das árvores retém e absorve a radiação de onda longa emitida pelas superfícies abaixo das mesmas, dificultando o resfriamento mais acelerado que ocorre em áreas sem cobertura arbórea. Consequentemente, há uma piora nas condições térmicas sob as copas em relação à T_{mr} , o que pode, em um primeiro momento, afetar o conforto dos pedestres. Por outro lado, no período da tarde, às 14h, observa-se o efeito inverso, com reduções na T_{mr} de até -5,0°C nas áreas onde a vegetação foi implantada. Esse comportamento está relacionado principalmente à reflexão e ao sombreamento proporcionado pelas copas, que diminuem significativamente a exposição à radiação solar direta. Dessa forma, considerando que a temperatura média radiante é um dos fatores mais relevantes para o conforto térmico, é possível inferir que, durante o dia, a presença da vegetação tende a melhorar o bem-estar térmico das pessoas em circulação, especialmente em regiões de clima tropical, onde os níveis de radiação solar são elevados.

Devido ao aumento da rugosidade superficial causado pela estrutura da arborização, observa-se, nos três horários analisados (6h, 14h e 20h), uma diminuição na velocidade do ar nas proximidades das árvores e um aumento na porção norte do recorte (Figura 6d). As variações entre os cenários permanecem relativamente constantes, com destaque para a região sul, onde a redução chega a aproximadamente -0,08 m/s. Nas áreas sem arborização implantada, as alterações são praticamente inexistentes. A vegetação arbórea atua como uma barreira física ao fluxo do ar (Lechner, 1990), sendo esse efeito condicionado pelas características morfológicas das espécies, como a flexibilidade dos galhos e folhas (Chapman *et al.*, 2015).

Figura 6 – Mapas cromáticos com a distribuição das diferenças provocadas pela instalação de espécimes arbóreos nas variáveis ambientais

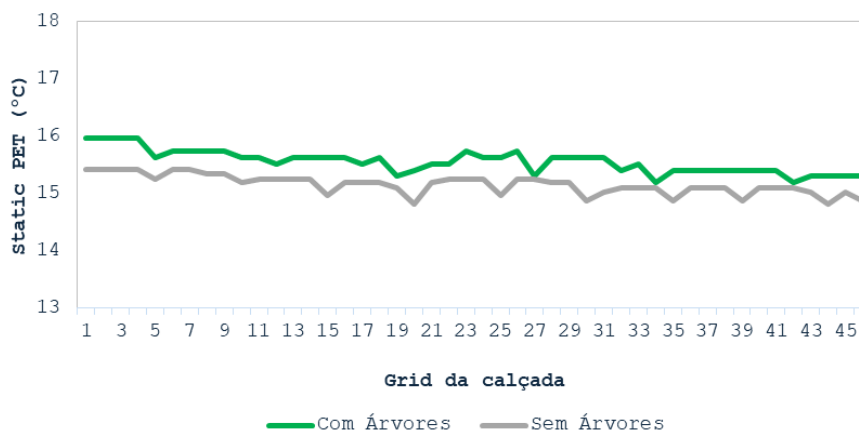


Fonte: Autoria Própria, 2025

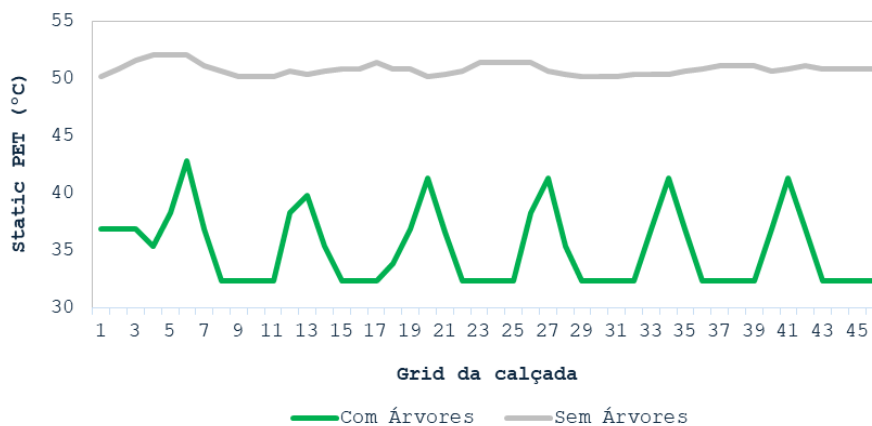
3.3 Impacto da implantação de vegetação na ambiência das calçadas ao longo do percurso

Em relação à variável PET (°C) ao longo do percurso de caminhada pelo pedestre, nota-se que a presença da arborização interfere de maneira significativa no conforto térmico percebido nos três horários analisados (6h, 14h e 20h) (Figura 7).

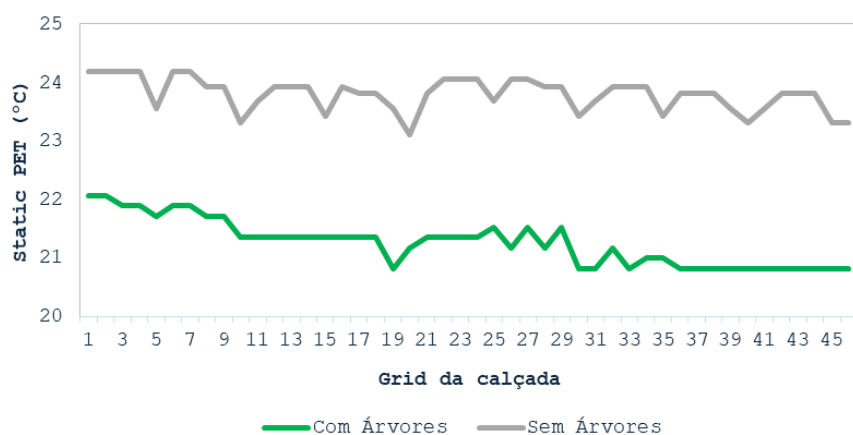
Figura 7 – Distribuição do índice *static* PET (°C) ao longo do percurso de caminhada às 06h, 14h e 20h



(a) Caminhada às 06h



(b) Caminhada às 14h



(c) Caminhada às 20h

Fonte: Autoria Própria, 2025

No horário das 6h, apesar da diferença entre os cenários ser mais sutil, observa-se tendência de valores mais elevados de PET no cenário com arborização (Figura 7a). Essa elevação, de até 1°C, pode ser associada à retenção da radiação de onda longa sob as copas das árvores, efeito guarda-chuva conforme descrito anteriormente, que reduz a perda de calor para a atmosfera durante a noite. Essa retenção térmica tende a elevar a temperatura média radiante

(T_{mr}), impactando diretamente a variável PET, que considera o balanço de trocas térmicas do corpo humano com o ambiente. Entretanto, esse efeito é temporário e menos crítico, se comparado ao ganho significativo presenciado no período vespertino, conforme exposto na sequência. Devido a época em que a simulação foi conduzida, nota-se nesse horário desconforto térmico em ambas as condições de calçamento por frio, conforme escala local do índice PET adaptada para a região (Callejas *et al.*, 2020)

No horário das 14h, o comportamento se inverte. A arborização reduz consideravelmente os valores de PET ao longo de praticamente todo o percurso simulado (Figura 7b). As reduções chegam a superar 10°C em determinados pontos, o que evidencia o forte efeito do sombreamento proporcionado pelas copas das árvores durante o período de maior incidência solar. Essa redução da carga térmica radiante contribui de maneira decisiva para a mitigação do desconforto térmico em regiões tropicais. É importante destacar que no cenário sem vegetação a temperatura PET se mantém praticamente constante, ultrapassando 50°C, o que representa um nível muito forte de estresse térmico ao calor na escala local do índice PET adaptada para a região. Por sua vez, no cenário com a presença da arborização, a temperatura PET se reduz para 32,4°C e 41,3°C, respectivamente nas zonas situadas sob as copas e de transição entre as copas, o que equivale redução para níveis de moderado estresse ao calor, o que demonstra a importância dos espécimes arbóreos para mitigação do calor.

Às 20h, ainda havia persistência de diferença entre os valores de PET no cenário, seguindo o padrão observado no período vespertino. O cenário sem arborização mantém valores de PET mais elevados, com diferenças médias de aproximadamente 2°C em relação às áreas arborizadas (Figura 7c). Este comportamento demonstra que os benefícios térmicos proporcionados pela vegetação não se limitam ao período diurno, mas se estendem até as primeiras horas da noite. Nesse horário, ambas as calçadas permanecem sob a condição de um pouco de frio (<24,1°C).

Evidencia-se, portanto, que a arborização tem papel central na modulação do conforto térmico ao longo do percurso do calçamento, com efeito benéfico expressivo durante o período diurno com maior carga térmica (que se entende até às 20h) e leve impacto negativo no período noturno e de madrugada com ausência de incidência solar, o que reforça a importância do planejamento criterioso da vegetação urbana, especialmente em relação à densidade de copas e à ventilação local.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os achados da pesquisa evidenciam que a vegetação urbana desempenha papel fundamental na mitigação dos efeitos negativos do clima em áreas urbanizadas. A inserção de arborização promoveu reduções na temperatura do ar e na temperatura média radiante, ao mesmo tempo em que aumentou a umidade relativa e contribuiu para a melhoria do conforto térmico ao longo do percurso analisado. Destaca-se a redução de até 10 °C nos valores de PET durante o período de maior carga térmica (14h), apontando o sombreamento e o arrefecimento evaporativo como mecanismos-chave de mitigação microclimática, sobretudo em climas tropicais.

Adicionalmente, observou-se que, embora a arborização proporciona benefícios térmicos expressivos durante o dia, podem ocorrer elevações na T_{mr} durante o período noturno

e de madrugada, em decorrência do chamado “efeito guarda-chuva”. Tal fenômeno reforça a necessidade de um planejamento criterioso das espécies arbóreas, considerando densidade de copas, horários de uso dos espaços públicos e dinâmica de ventilação local.

A validação da simulação no ENVI-met frente aos dados de campo demonstrou boa acurácia, com baixos valores de erro e elevado índice de concordância, conferindo confiabilidade à simulação. Ainda assim, o estudo apresenta limitações importantes: a modelagem adotou uma representação simplificada do ambiente urbano, sem a inclusão de elementos como muros e outras barreiras verticais que podem interferir nos padrões de ventilação e conforto térmico. Além disso, a análise concentrou-se em uma única condição climática representativa (período quente-seco), sem considerar variações sazonais. Essas escolhas metodológicas, embora justificáveis no escopo da pesquisa, indicam que os resultados devem ser interpretados à luz das especificidades do contexto estudado, e que sua aplicação em outros cenários urbanos pode requerer adaptações ou estudos complementares.

Dessa forma, recomenda-se que pesquisas futuras aprofundem a avaliação do desempenho microclimático considerando diferentes tipologias vegetais, explorando variáveis como porte, densidade foliar e distribuição espacial, conforme sugerido no Decreto nº 5.144 da prefeitura de Cuiabá. Sugere-se, ainda, a realização de simulações sobre diferentes condições climáticas e épocas do ano, bem como a integração de análises subjetivas de conforto térmico e uso dos espaços.

Conclui-se, portanto, que a vegetação deve ser compreendida como infraestrutura urbana essencial — não apenas por seu valor paisagístico e ecológico, mas, sobretudo, por sua contribuição efetiva para a resiliência climática e a qualificação ambiental dos espaços públicos em áreas urbanas tropicais.

REFERÊNCIAS

ALVES, A. K.; JESUS, A. T. C.; MACÊDO, K. C.; SAMPAIO, M. M. A. Avaliação do Conforto Urbano Sob a Influência da Vegetação na Cidade de Cuiabá-MT. *E&S Engineering and Science*, v. 6, n. 1, p. 106-121, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho Térmico de Edificações - Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, Brasil, p. 1-10, 2022.

BARBOSA, E. C. **Influência da vegetação nas condições microclimáticas em ambientes urbanos - estudo de caso Ilha do Fundão**. 2016. Projeto de Graduação (Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

CALLEJAS, I. J. A. et al. Estudo do sombreamento arbóreo, atenuação da radiação solar e microclima dos pátios escolares: elementos para se pensar a sustentabilidade urbana. In: IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2011, Vitória. *Anais [...]*. Vitória, 2011.

CALLEJAS, I. J. A.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; DURANTE, L. C.; DE ALMEIDA LOBO, F. Patterns of energy exchange for tropical urban and rural ecosystems located in Brazil central. *Journal of Urban & Environmental Engineering*, v. 13, n.1, 2019.

CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; DIZ-MELLADO, E.; GALÁN-MARÍN, C. Thermal Sensation in Courtyards: Potentialities as a Passive Strategy in Tropical Climates. *Sustainability*, v.12, n.15, p.6135, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12156135>

CALLEJAS, I. J. A.; SANTOS, F. A. S.; SILVA, D. T.; DURANTE, L. C.; ROSSETI, K. A. C. Espécimes arbóreos em pátio interno: benefícios termohigrométricos para a edificação. In: Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente

Construído, v. 19, p. 1-13, 2022. **Anais [...]**, Porto Alegre: ANTAC, 2022. DOI:
<https://doi.org/10.46421/entac.v19i1.2120>

CHAPMAN, J. A.; WILSON, B. N.; GULLIVER, J. S. Drag force parameters of rigid and flexible vegetal elements. **Water Resour Res**, v.51, p. 3292– 3302, 2015.

FOROUZANDEH, A. Numerical modeling validation for the microclimate thermal condition of semi-closed courtyard spaces between buildings. **Sustain. Cities Soc.**, 36, p. 327–345, 2018.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. Tradução: Sílvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficinas de Textos, 2010. 248p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (2004). **ISO 8896: Ergonomics of the thermal environments: determination of thermal metabolic rate**. Genebra, 2004.

KARDAN, O.; GOZDYRA, P.; MISIC, B.; MOOLA, F.; PALMER, L. J.; PAUS, T.; BERMAN, M. G. Neighborhood greenspace and health in a large urban center. **Scientific reports**, v. 5, n. 1, p. 11610, 2015.

LECHNER, N.; Heating, cooling, lighting: design methods for architects. Canadá: John Willey & Sons, 1990. 648 p.
MASCARÓ, L.; MASCARÓ, J. L. **Vegetação Urbana**. 3ª. edição, Porto Alegre: Masquatro. 2005. 212p.

NASCIMENTO, D.T.F.; OLIVEIRA, I.J. de. Análise da evolução do fenômeno de ilhas de calor no município de Goiânia/GO (1986-2010). **Boletim goiano de geografia**, v. 31, n. 2, p. 113-127, 2011.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2 ed. IBGE: Rio de Janeiro, 1989.

PINHEIRO, C. B.; SOUZA, D. D. A importância da arborização nas cidades e sua influência no microclima. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 6, n. 1, p. 67-82, 2017.

PREFEITURA DE CUIABÁ. **Decreto nº 5144, de 12 de fevereiro de 2012**. Dispõe sobre a arborização pública na área urbana do município de Cuiabá-MT. Diário Oficial do Município, Cuiabá, MT, 12 fev. 2012.

SILVA, B. A.; XAVIER, T. C.; ALVAREZ, C. E. De. A influência da vegetação no conforto térmico para a condição microclimática de vitória (ES). **Cidades Verdes**, v. 3, n. 8, p. 15, 2015.

SOUZA, D. M.; NERY, J. T. Análise da Temperatura, da Umidade e do Conforto Térmico no Município de Ourinhos. In: IX Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 9., 2010, Fortaleza/CE. **Anais [...]** Ourinhos (CE): Universidade Estadual Paulista, 2010.

WASSOUF, M. **Da casa Passiva à norma PASSIVHAUS: A arquitetura passiva em climas quentes**. Tradução: Carla Zollinger. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2014. 708p.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.63, n.11, p.1309-1313, 1982.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO-No. 8. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. Genebra: World Meteorological Organization. 2008.