

O IMPACTO DA ARBORIZAÇÃO VIÁRIA NO CONFORTO TÉRMICO EM DIFERENTES CENÁRIOS DE DENSIDADE ARBÓREA

Simone Berigo Büttner

Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT. Cuiabá, MT, Brasil
simoneberigo@hotmail.com.br

Ivan Júlio Apolônio Callejas

Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT. Cuiabá, MT, Brasil
ivancallejas1973@gmail.com

Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira

Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT. Cuiabá, MT, Brasil
mcjanp@gmail.com

Flávia Maria de Moura Santos

Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT. Cuiabá, MT, Brasil
flavia_mms@hotmail.com

Wennder Tharso Oliveira da Silva Martins

Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT. Cuiabá, MT, Brasil
wenndermartins@gmail.com

RESUMO

Com o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos nas áreas urbanas, fica evidente a necessidade de se criar planos de ações para a adaptação e mitigação ao aquecimento urbano em suas diversas escalas. Nesse contexto, a arborização viária se torna uma importante estratégia de mitigação. Esta pesquisa tem o objetivo de avaliar o impacto da arborização viária no conforto térmico, comparando-se quatro diferentes cenários de densidade arbórea em duas tipologias de morfologia urbana: uma classificada como zona climática local (LCZ) 3 e a outra como zona climática local (LCZ) 4, em Cuiabá - MT, onde o clima é tropical continental. O método adotado foi a simulação computacional com o Envi-met, comparando-se a temperatura radiante média (Trm) de um cenário sem arborização com outros cenários que variam o índice de densidade arbórea (IDA). Ao final, conclui-se que a arborização viária tem impacto na redução da Trm, porém não é suficiente para se atingir o conforto térmico em situação de extremo calor. E ainda, que o IDA não é o único fator determinante no impacto da arborização viária no microclima, sendo influenciado por outros fatores, como o arranjo, o porte das espécies e a morfologia urbana.

Palavras-chave: Microclima urbano. Índice de densidade arbórea. Envi-met. Morfologia urbana.

THE IMPACT OF ROAD AFFORESTATION ON THERMAL COMFORT IN DIFFERENT TREE DENSITY SCENARIOS

ABSTRACT

With the increase in the frequency and intensity of extreme weather events in urban areas, the need to create action plans for adaptation and mitigation to urban warming at its various scales is evident. In this context, road afforestation becomes an important mitigation strategy. This research aims to evaluate the impact of road afforestation on thermal comfort, comparing four different scenarios of tree density in two typologies of urban morphology: one classified as local climatic zone (LCZ) 3 and the other as local climatic zone (LCZ) 4, in the city of Cuiabá - MT, where the climate is tropical continental. The method adopted was the computer simulation with Envi-met, comparing the mean radiant temperature (Trm) of a scenario without afforestation with other scenarios that vary the tree density index (TDI). In the end, it is concluded that road afforestation has an impact on the reduction of Trm, but it is not enough to achieve thermal comfort in situations of extreme heat. Furthermore, the TDI is not the only determining factor in the impact of road afforestation on the microclimate, being influenced by other factors, such as the arrangement, the size of the species and the urban morphology.

Keywords: Urban microclimate. Tree density index. Envi-met. Urban morphology.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas estão sendo cada vez mais evidenciadas pelo aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos. Entre as consequências destaca-se o aquecimento da superfície terrestre e a ocorrência de ondas de calor, que é potencializada nos centros urbanos, pois são grandes emissores dos gases do efeito estufa decorrentes das atividades antropogênicas e devido à grande concentração de materiais impermeáveis e absorvedores de radiação infravermelha, que acabam retendo mais calor em relação às áreas rurais, sendo por isso mais vulneráveis às ondas de calor (OKE *et al.*, 2017). A supressão da vegetação nas cidades tem impacto negativo no equilíbrio térmico urbano, prejudicando o conforto térmico nos espaços abertos, a qualidade de vida e a atividade econômica e cultural da população. Por isso, a manutenção dessas ou a implementação de uma nova infraestrutura verde desempenha um importante papel no microclima, caracterizando-se como uma das principais estratégias de mitigação e adaptação ao aquecimento urbano. Nessa perspectiva, o plano de arborização se torna uma importante ferramenta da gestão urbana para orientar a manutenção e implantação de espécies arbóreas nas vias urbanas.

A cidade de Cuiabá-MT, localizada na região centro-oeste do Brasil, é caracterizada por um rigor climático de extremo calor, que têm se agravado nos últimos anos na escala microclimática, principalmente devido à diminuição brusca da vegetação arbórea na área urbana durante o processo de urbanização, que não foi planejado. Apesar das condições climáticas desfavoráveis ao uso de espaços externos devido ao desconforto térmico por calor, a maioria das vias urbanas da cidade é pouco arborizada ou desprovida de arborização. Em 2023, a prefeitura municipal publicou o plano diretor de arborização urbana de Cuiabá (PREFEITURA DE CUIABÁ, 2023), que dispõe sobre a arborização pública na área urbana, considerando a necessidade de estabelecimento de normas que visem orientar a implementação da arborização urbana, visando a segurança e a acessibilidade da população, o funcionamento das redes de infraestrutura instaladas e circulação de veículos das vias públicas da área urbana. No entanto, assim como na maioria das diretrizes voltadas para a arborização pública do Brasil, não há citação ou referência de indicadores numéricos ou dados técnico-científicos para a qualificação ambiental de espaços arborizados, que relacionam a densidade arbórea com o conforto térmico. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo geral avaliar o impacto da arborização viária no conforto térmico do pedestre, em diferentes cenários de densidade arbórea e morfologia urbana, visando contribuir para as tomadas de decisões no planejamento da infraestrutura verde urbana.

Este artigo é resultante de uma tese de doutorado, cuja hipótese formulada é de que existe uma correlação positiva entre o IDA e a redução da Trm, sugerindo que áreas com maior densidade arbórea nas vias tendem a apresentar uma diminuição mais significativa na Trm, indicando o potencial da arborização urbana para mitigar o calor por meio do sombreamento e da evapotranspiração.

METODOLOGIA

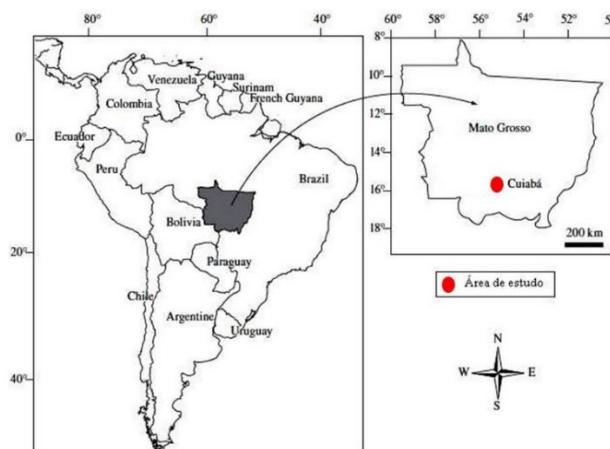
O método da pesquisa foi dividido nas seguintes etapas: 1. Delimitação e caracterização da área de estudo; 2. Revisão bibliográfica sobre índices verdes e arborização viária como estratégia de mitigação de calor urbano; 3. Seleção do método de cálculo para um índice específico a ser adotado para quantificar a densidade arbórea viária; 4. Criação de cenários hipotéticos de estudo, com distribuição dos elementos arbóreos (arranjo) e IDA distintos; 5. Simulação computacional dos cenários com o software ENVIMET; 6. Análise quantitativa do impacto do IDA e do arranjo na redução da Trm, sendo que o impacto da arborização viária e do IDA foi analisado quantitativamente por meio da diferença da Trm entre os cenários vegetados e não vegetados.

Área de estudo

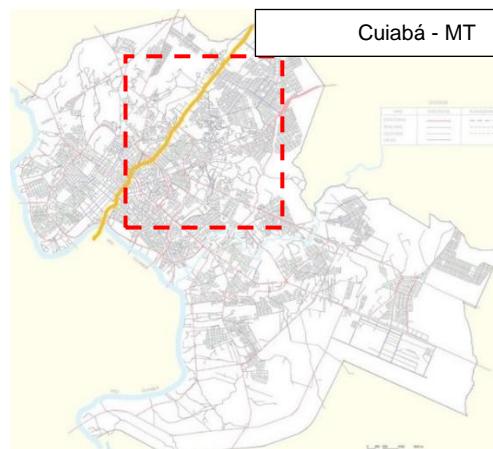
A área de estudo está inserida na cidade de Cuiabá (MT), latitude: 15° 35' 45" S, longitude: 56° 05' 48" O e altitude: 193 m (Figura 1). As condições térmicas do clima de Mato Grosso são comandadas em função de sua posição continental, extensão latitudinal, relevo, e da atuação de sistemas de circulação atmosférica sobre o Estado (MAITELLI, 1994), resultando em duas estações sazonais bem definidas no decorrer do ano: a estação chuvosa (quente e úmida) ocorre na primavera/verão (7 a 8 meses), entre outubro e abril, e a estação seca (quente-seca) ocorre no outono/inverno (4 a 5 meses), entre maio e setembro. (MONTEIRO, 1951; MACHADO *et al.*, 2015). O perfil climático, segundo a classificação de Köppen Geiger, é o tropical continental semiúmido do tipo Aw. Utilizando como referência os dados meteorológicos do período entre 1961 a 2011, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os seguintes valores médios

anuais de radiação diária global, temperatura do ar média, mínima e máxima e umidade relativa do ar foram registrados: 15,6 MJ m² y⁻¹, 27,9°C, 23,0°C, 30,0°C e 71,6%, respectivamente. Contudo, há de se considerar que nos últimos anos foram registradas temperaturas acima da média, confirmado o fenômeno de aquecimento urbano observado como uma das consequências das mudanças climáticas globais. Dados do INMET (2023) demonstram que Cuiabá ficou 1,5°C mais quente nas últimas décadas, registrando em 2023 o mês de agosto mais quente desde 1961 (Baby; Aguiar, 2023).

Figura 1 - Localização da área de estudo



Fonte: Silva e Santos Filho, 2010.



Fonte: PREFEITURA DE CUIABÁ, 2011.

Legenda:



Delimitação do recorte do mapa de Cuiabá (direita), representado em destaque na Figura 2.



Avenida estudada

Adaptação: os autores, 2023.

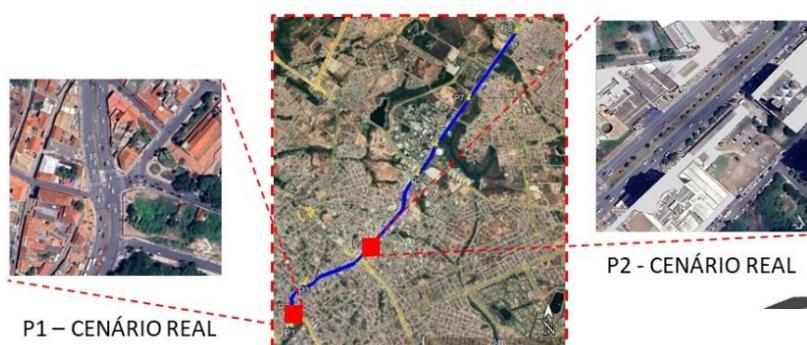
Seleção dos recortes urbanos

Para servir de área de estudo, selecionou-se uma avenida estrutural que atravessa a cidade, denominada Avenida Tenente Coronel Duarte, que depois tem o nome alterado para Avenida Rubens de Mendonça (Figura 2). É um território marcado por alterações bruscas no meio ambiente natural que impactam o microclima urbano, como a substituição da cobertura do solo permeável por materiais impermeáveis, aumento de superfícies construídas absorvedoras e refletoras, aumento do fluxo de veículos (emissores de fontes poluentes e calor antropogênico) e da densidade construtiva, que modifica a geometria urbana e reduz as áreas verdes. Em razão da abrangência da avenida e com intuito de delimitar a extensividade da pesquisa, selecionou-se dois recortes com dimensões de 200m x 200m para as avaliações propostas, denominados de (P1) e (P2), representando duas tipologias morfológicas distintas dentro da cidade. De acordo com o método de classificação *Local Climate Zone* (LCZ), proposto por Oke *et al.* (2017), o (P1) pertence à classe de LCZ 3, caracterizada por edifícios baixos, em arranjo compacto, com pouca área permeável e vegetada entre os lotes, enquanto o (P2) à classe LCZ 4, caracterizada por edifícios altos esparsos (entre edifícios baixos), e uma quantidade maior de áreas permeáveis e vegetadas em relação ao ponto anterior. A literatura demonstra que este método é adequado e amplamente usado pela comunidade científica que estuda o clima urbano, especialmente aquelas voltadas ao planejamento urbano. Ferreira, Ferreto e Duarte (2023) reforçam a adequação do método a pesquisas com diferentes enfoques e escalas de análise, auxiliando pesquisadores e gestores urbanos que desejem conhecer e monitorar as características morfológicas, incorporando-as efetivamente aos instrumentos de tomada de decisão e de gestão. O procedimento metodológico adotado para a classificação das LCZ's se deu a partir da qualificação e quantificação dos atributos físicos e espaciais dos espaços urbanos, a partir de imagens satélites disponibilizadas pelo *Google Earth*¹ e observações in loco, que permitiram reconhecer os padrões homogêneos de

¹ Aplicativo disponível gratuitamente nas versões para WEB e para download no PC. Disponível em: <https://www.google.com.br/earth/index.html>. Acesso em: 21 jun. 2022.

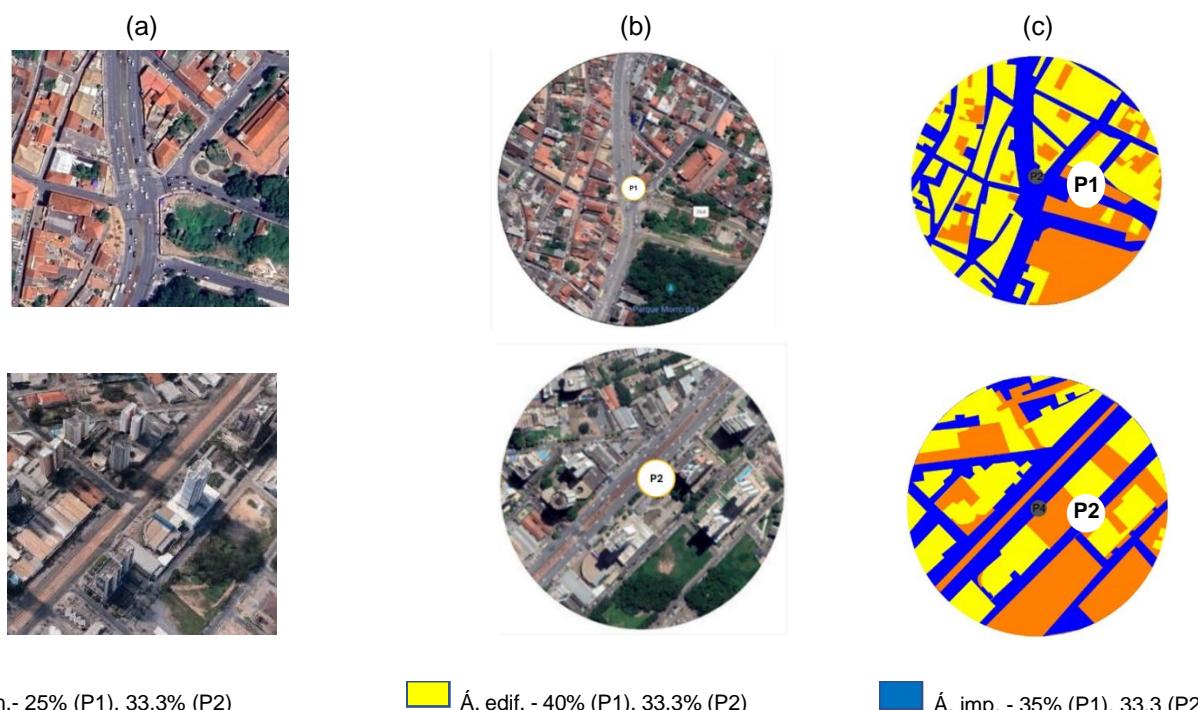
cobertura do solo. O mapeamento de cobertura do solo foi feito a partir de imagem obtida do *Google Earth* (Figura 3-a), inserindo-a no software AutoCAD (AUTODESK, 2022), (versão de estudante concedida gratuitamente para a instituição de ensino responsável pela pesquisa), e posterior redefinição da escala, tendo-se como referência dimensões conhecidas. Após a imagem ser escalada, recortou-se a área estabelecida para a caracterização, adotando-se um diâmetro de 400 metros (Figura 3-b). Assim foi possível delimitar as áreas com cobertura de solo comuns e obter as áreas de cada atributo urbano, (Figura 3-c), que resultou na classificação das áreas em LCZ apresentadas na Tabela 1, de acordo com as faixas de valores estabelecidos por Oke *et al.* (2017) para cada LCZ.

Figura 2 - Imagem do Google Earth, com vista da área de estudo, destaque dos pontos selecionados para a avaliação e ampliação dos recortes urbanos (P1 e P2)



Fonte: GOOGLE EARTH, 2022. Elaboração: Os autores, 2023.

Figura 3 - Imagem do Google Earth - 3D (a); 2D (b); Imagem trabalhada no CAD, com caracterização da cobertura do solo (c), do P1 (superior) e P2 (inferior)



Fonte: Google Earth, 2022. Elaboração: Os autores, 2022.

Tabela 1 - Parâmetros urbanísticos levantados em 2022 para classificação das LCZs

LCZ	Descrição	Dados	(a)	(b)	(c)	(d)
LCZ 3		Edifícios baixos / arranjo compacto	Levantamento autores	40%	35%	25%
			Referência	40-70	20-50	<30
LCZ 4		Edifícios altos / arranjo aberto	Levantamento autores	33%	33%	22 - 25
			Referência	20-40	30-40	>25

Legenda: a- Razão da área plana edificada em relação à área plana total do terreno (%); b - Razão da área plana impermeável (pavimentada, rocha) em relação à área plana total do terreno (%); c - Razão da área plana permeável em relação à área total do terreno (%); d - Média geométrica de alturas de edifícios, em metros.

Fonte: OKE *et al.*, 2017. Organização: Os autores, 2022.

O principal critério adotado para a escolha dos pontos selecionados para a área de estudo foi a predominância atual das tipologias morfológicas mais representativas na cidade. Segundo o mapeamento realizado por Ferreira (2019) (Figura 4), a LCZ 3 apresenta uma proporção de 50,4% de todo território urbano, seguido da LCZ 7, com 19%, e depois da LCZ 2, com 8% de ocupação (Figura 5). Considerando que a LCZ 7 não tem representatividade na região de estudo e a LCZ 2 apresenta-se de maneira mesclada com a LCZ 3, conforme levantamento feito, optou-se por adotar as tipologias da LCZ 3 e da LCZ 4, pois representa uma tendência atual do crescimento e ocupação territorial desta porção da cidade, que é a verticalização. O principal objetivo em se adotar duas tipologias morfológicas (LCZs) é analisar a relação entre o impacto do efeito da arborização na redução das temperaturas e a morfologia urbana.

Figura 4 - Classificação das LCZs no interior do perímetro urbano de Cuiabá

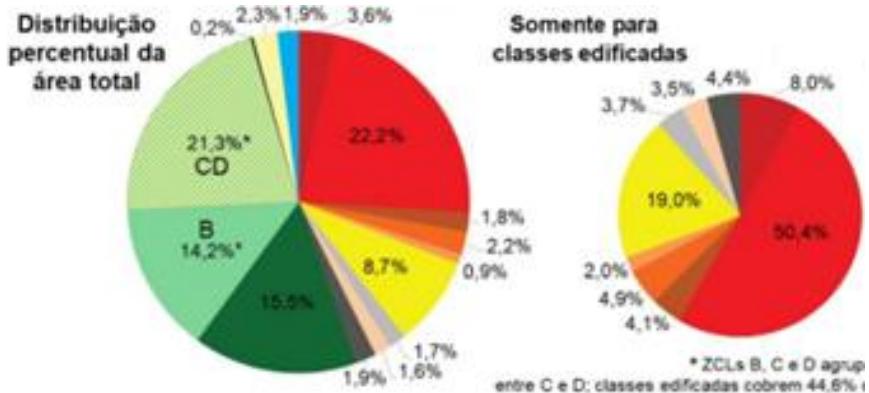


Fonte: Ferreira, 2019. Organização: Os autores, 2024.

A Figura 6 ilustra os dois pontos selecionados para a área de estudo: o (P1), classificado como LCZ 3 e o P2, classificado como LCZ 4.

O Quadro 1 apresenta as características espaciais das áreas de estudo (P1) e (P2), com descrição da geometria urbana, cobertura do solo, principais materiais de construção, uso predominante e da arborização.

Figura 5 - Distribuição percentual das LCZs no território urbano



Fonte: Ferreira, 2019. Organização: Os autores, 2024.

Figura 6 - Vista geral da via no P1 (esquerda) e no P2 (direita)



Fonte: Google Earth. Organização: Os autores, 2024.

Quadro 1 - Características espaciais urbanas da área de estudo

CARACTERÍSTICAS ESPACIAIS	P1 (LCZ 3)	P2 (LCZ 4)
Uso do solo	predominantemente comercial e institucional,	Misto, predominantemente comercial e residencial,
Largura caixa viária total	30m (com variações)	50m (com variações)
Largura faixa de pedestres	1,5m - 2,5m (estreito, pois é no centro histórico)	5m - 10m
Largura canteiro central	5m (com variações)	10m (com variações)
Largura faixa de veículo	10m cada lado (com variações)	10m cada lado (com variações)
Arborização	Sem arborização viária, apenas em quintais, praças e parque próximo	arborização viária no canteiro e na faixa de pedestres
Morfologia urbana geral	Edificações pequenas e de baixa altura, de até 2 pavimentos, em arranjo compacto. Pouca área permeável, apenas em alguns fundos de lotes.	Edificações altas (acima de 9 pav.), em arranjo aberto, com edificações térreas do tipo galpões comerciais entre estes. Alguns lotes desocupados, que funcionam como estacionamento, com área permeável, tanto com cobertura vegetal quanto com o solo exposto.

Fonte: Os autores, 2023 e 2024.

Medições das variáveis microclimáticas

Para a calibração do software e adaptações necessários do modelo às condições locais foi preciso coletar dados das variáveis microclimáticas na área de estudo para serem comparados com dados de simulação. A coleta de dados foi realizada com um transecto móvel, que consiste em uma estação meteorológica fixada no teto de um automóvel, que registrou as variáveis climáticas em pontos pré-determinados dentro da área de estudo. Foi adotado este método em função de sua aplicação relativamente mais simples e de baixo custo operacional do que a instalação de várias estações fixas para coleta dos dados. A estação montada é composta por um sensor de temperatura e umidade, modelo HOBO U30 Station, que mede temperaturas nas escalas de - 40 a 125°C e a umidade do ar nas faixas de 0 a 100% e um *datalogger* (Registrador de dados), programado em placa microcontroladora da marca HOBO (Figura 7). Os sensores foram calibrados antes das medições, para garantir precisão e eficácia. A velocidade do veículo durante o percurso foi constante na maior parte do tempo entre 20 e 40 km/h, próximo de 30 km/h, com variações em curvas, semáforos, faixas de pedestres, trânsito intenso ou outras situações.

Figura 7 - Equipamentos de medição do transecto móvel



Fonte: Os autores, 2024.

Foram estabelecidos dois períodos para medição: o período seco, nos dias 04, 05 e 06 de agosto de 2022; e o úmido: nos dias 20, 21 e 22 de dezembro de 2022. Os horários de coleta foram: 08h, 14h e 20h (horário local), nos 3 dias consecutivos, no percurso de 6,215 km da avenida analisada, em 08 (oito) pontos de medição, cada um com uma morfologia urbana distinta. A Figura 8 apresenta o mapa com o trajeto, a marcação dos pontos de medição e o destaque dos pontos (P1) e (P2).

Observação: Os pontos de medição foram numerados de P1 a P8. No entanto, destes, o P2 e P4 foram selecionados para servir de área de estudo para a avaliação do impacto da arborização viária, sendo renomeados, tornando-se P1 e P2, respectivamente.

Definição dos cenários hipotéticos

Em síntese, a metodologia adotada para a etapa experimental seguiu as seguintes etapas: a) Definição do método de cálculo para um índice específico a ser adotado para quantificar a densidade arbórea em vias estruturais; b) Definição dos cenários hipotéticos, tendo o IDA como principal variável; c) Simulação computacional; d) Elaboração de gráficos e mapas, com análise dos resultados. Para o cálculo do IDA considerou-se a relação entre a soma das áreas de projeção dos dosséis arbóreos e a área total da caixa viária (faixa de veículos, faixa de pedestre e canteiros centrais), conforme expressa a Equação 1.

$$\text{IDA} = \text{soma projeção dosséis} / \text{área da caixa viária} \quad (1)$$

A Figura 9 demonstra a delimitação da área das caixas viárias no mapa das áreas do P1, com 6.172 m² e P2, com 12.280 m².

Figura 8 - Pontos de medição no trajeto percorrido com o transecto móvel, com destaque para P1 e P2



Elaboração: Os autores, 2024.

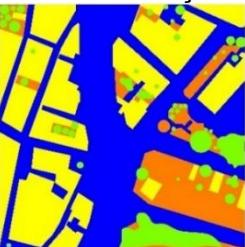
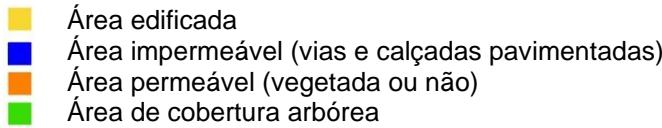
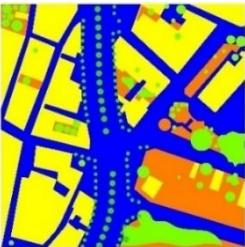
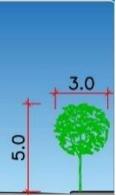
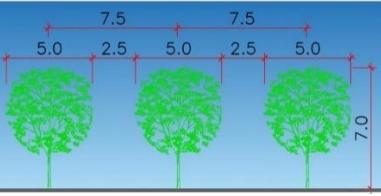
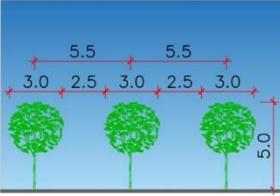
Figura 9 - Área da caixa viária do P1 e P2, para cálculo do índice de densidade arbórea



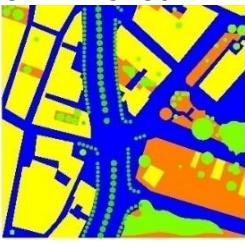
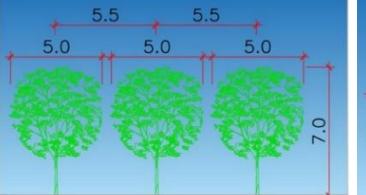
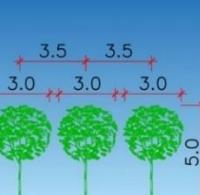
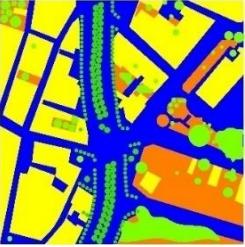
Fonte: Google Earth, 2023. Elaboração: Os autores, 2024.

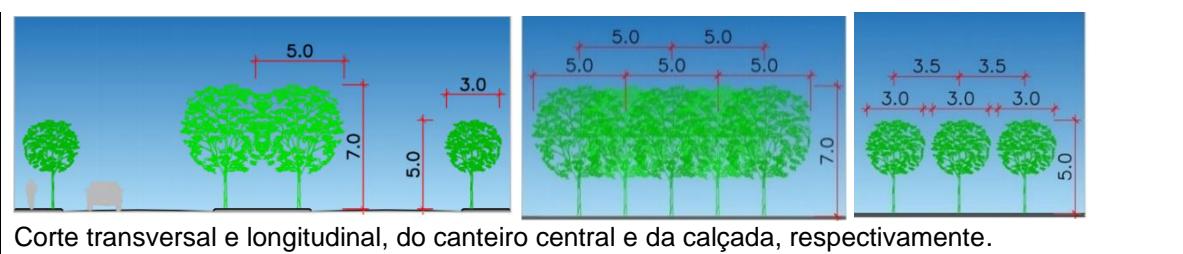
A partir da definição do método de cálculo para o índice de densidade arbórea, foram criadas quatro (04) variações de cenários, distinguindo-se os IDA para cada área de estudo, sendo um deles adotado como cenário de referência, que é desprovido de arborização na caixa viária. A partir deste modelo, outros três cenários hipotéticos foram criados com aumento gradativo na densidade arbórea (15%, 22% e 35%), que nesta pesquisa é definida pela quantidade e distribuição dos elementos arbóreos, ou seja, é o resultado da variação dos seguintes aspectos: dimensão dos espécimes arbóreos (altura total e diâmetro do dossel) e o espaçamento entre eles, conforme se observa nos Quadros 2 e 3. Vale ressaltar que o principal parâmetro de avaliação é o IDA, e não o arranjo arbóreo (dimensões e espaçamento dos elementos arbóreos). Porém, como o arranjo influencia no impacto do conforto térmico, também foi analisado. Por isto, cenários com mesmo IDA apresentam diferentes arranjos no P1 e no P2, já que as dimensões da caixa viária são diferentes nos dois recortes urbanos. Os atributos dos arranjos arbóreos foram definidos a partir do Plano Diretor de Arborização Urbana de Cuiabá (2023) e de algumas referências já testadas em estudos anteriores, como o de ZHANG, ZHAN e LAN (2018) e o de Rui *et al.* (2018), adaptando-os para atingir os índices estabelecidos nesta pesquisa.

Quadro 2 - Variação dos cenários hipotéticos da área de estudo (P1)

CENÁRIO: C1 SEM VEGETAÇÃO 	LEGENDA:  Área da caixa viária (via estrutural) - 6.172,00 m²
CENÁRIO: C2 	Dados das Árvores: Altura (h): 7m Diâmetro (D): 5m Distância (d): 7,5m h/d: 0,93 (< 1) Área cobertura arbórea: 926 m ² Área da caixa viária: 6.172 m ² IDA: 926/6.172 = 0,15
	  
Corte transversal e longitudinal, do canteiro central e da calçada, respectivamente.	

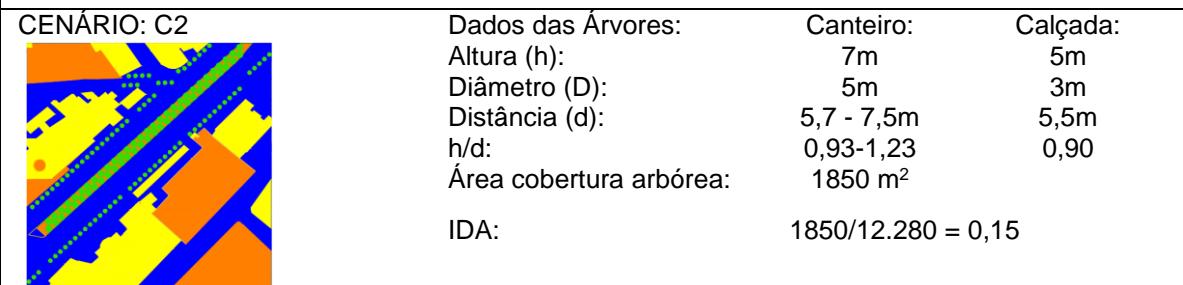
Quadro 2 (continua) - Variação dos cenários hipotéticos da área de estudo (P1)

CENÁRIO: C3 	Dados das Árvores: Altura (h): 7m Diâmetro (D): 5m Distância (d): 5,5m h/d: 1,27 (>1) Área cobertura arbórea: 1357 m ² Área da caixa viária: 6.172 m ² IDA: 13.57/6.172 = 0,22	Canteiro: Calçada:
		  
Corte transversal e longitudinal, do canteiro central e da calçada, respectivamente.		
CENÁRIO: C4 	Dados das Árvores: Altura (h) 7m Diâmetro (D) 5m Distância (d) 5m h/d 1,4 (>1) Área cobertura arbórea 2160 m ² Área da caixa viária 6.172 m ² IDA: 2.160/6.172 = 0,35	Canteiro: Calçada:



Elaboração: Os autores, 2023.

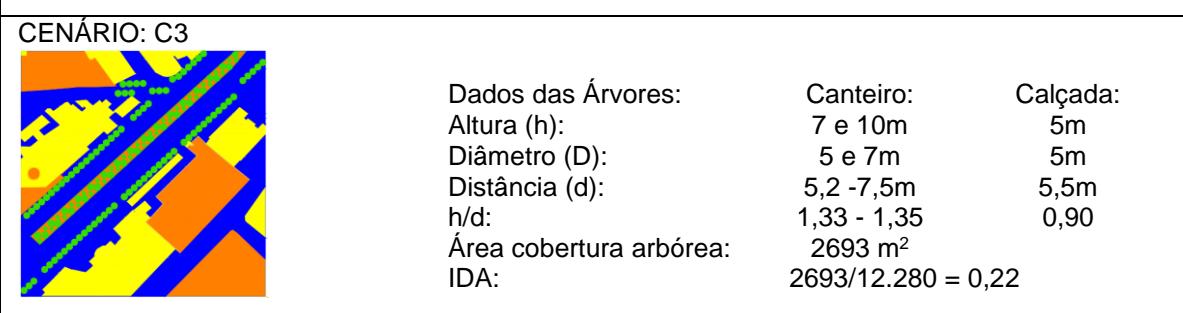
Quadro 3 - Variação dos cenários hipotéticos da área de estudo (P2)

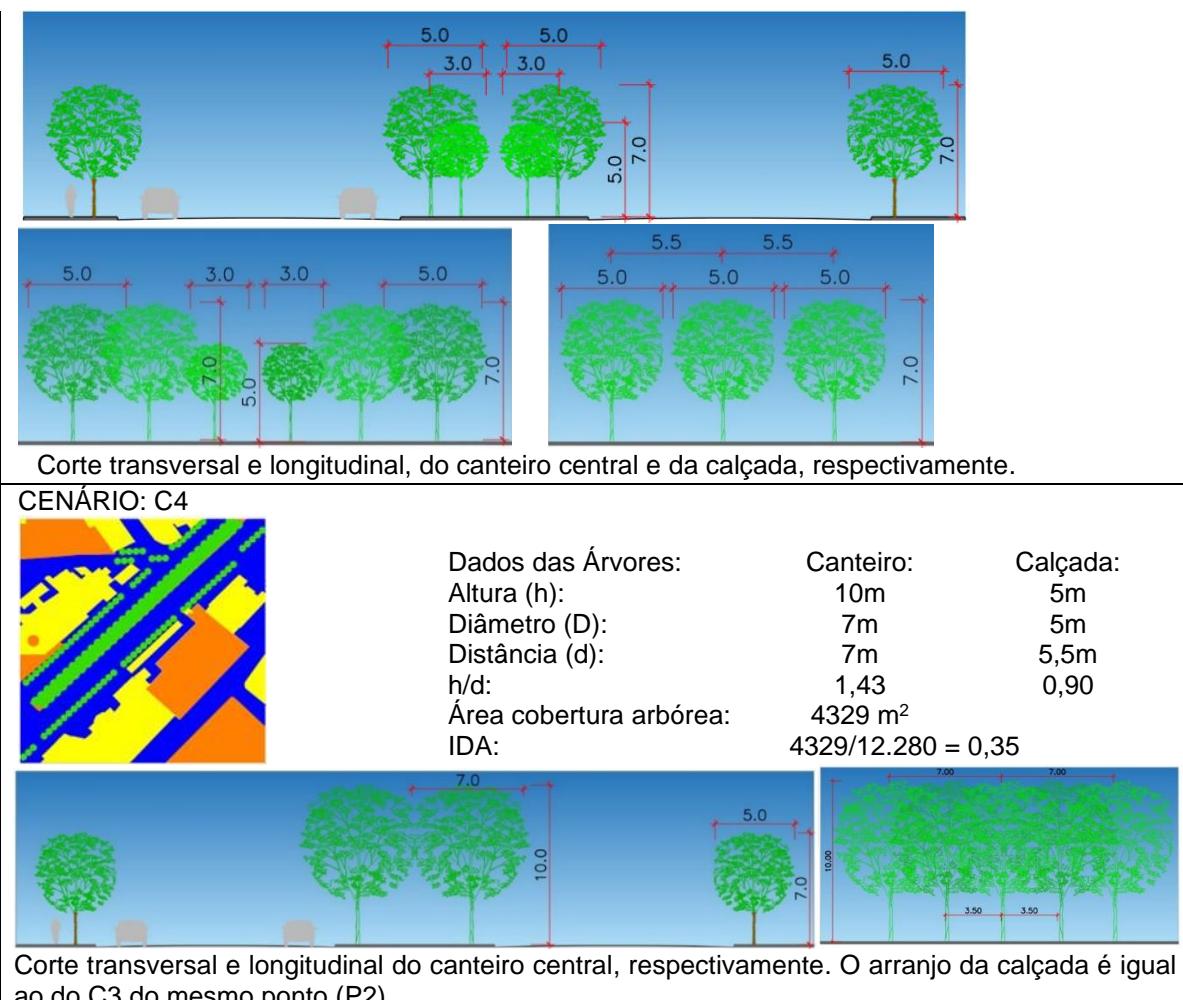


Quadro 3 (continua) - Variação dos cenários hipotéticos da área de estudo (P2)



Corte transversal e longitudinal do canteiro central, respectivamente. O arranjo da calçada é igual ao do C2 no P1.





Elaboração: Os autores, 2023.

Simulação - Calibração

As simulações foram realizadas com o software Envimet, versão 5.1 estudantil (ENVIMET, 2021), e foram divididas em duas etapas: a primeira com o objetivo de calibração da modelagem e a segunda para as avaliações propostas no objetivo da pesquisa. A escolha do software é devido ao reconhecimento na comunidade científica, comprovado por diversos estudos e por ser um dos poucos que descreve a maior parte dos processos climáticos que agem no ambiente urbano.

Quanto à modelagem tridimensional, a área do modelo geométrico foi definida com 100 x 100 grids (200 x 200m / 1grid = 2m), adotando-se uma área maior que a área da caixa viária, pois o entorno interfere na interface termodinâmica entre superfícies, atmosfera e vegetação para que o modelo calcule com precisão os processos climáticos que agem na área da via. Como a avenida nesta área é sinuosa, a área do modelo abrange as quadras adjacentes e outras vias, embora não sejam consideradas como objeto de estudo. Para a calibração, os modelos geométricos foram construídos buscando aproximar ao máximo as características geométricas, construtivas e de vegetação, das levantadas na área de estudo. Para os materiais foram adotados os dados padrões do programa, como do cimento das calçadas, do asfalto da via, da grama e do solo exposto. Para o banco de dados climáticos, adotou-se os dados obtidos das estações meteorológicas de referência local (INMET), para os mesmos dias de medição, para caracterizar as mesmas condições existentes no momento da coleta de dados. Para esta simulação utilizou-se o modo “simple forcing” do software, em que os dados climáticos são inseridos manualmente e o software calcula as condições atmosféricas apenas do período informado. A simulação foi programada para começar 12 horas antes do início do período analisado de 24 horas, considerando um período de adaptação e estabilização do software para calcular o microclima, totalizando assim 36 horas.

Quanto aos dados da vegetação, a Tabela 2 indica as propriedades térmicas adotadas nas configurações padrões do Envi-met, para o qual apenas se alterou o Índice de Área foliar (IAF), a altura e as dimensões do dossel, conforme medições realizadas, mantendo-se as demais propriedades. A aferição do IAF se deu por meio do analisador *Ceptometer Accupar* modelo LP80, que realiza estimativa instantânea dos valores do IAF e mede a radiação solar no intervalo do comprimento de ondas da PAR em $\mu\text{mol m}^{-2} / \text{s}$. A aferição ocorreu no período chuvoso, nos horários de máxima radiação solar, entre 11h e 13h, em quatro pontos: três sob a área do dossel e um fora da área do dossel arbóreo, ou seja, com exposição plena a radiação solar (OLIVEIRA; CALLEJAS; NOGUEIRA 2013). Algumas medidas foram repetidas para confirmação de valores.

Tabela 2 - Propriedades térmicas das espécies arbóreas, no P1 e P2

Parâmetro	valor
Tipo de fixação de CO ₂	C3
Tipo de folhas	dicotiledôneas
Albedo	0,2
Emissividade	0,97
Transmitância	0,3
Profundidade da raiz	2,0

FONTE: ENVI-Met / Simple-plant. Elaboração: os autores, 2022.

A Tabela 3 apresenta a relação das espécies criadas no banco dos espécimes arbóreos (nomes aleatórios para identificação entre os autores), com a configuração de IAF e respectiva altura, enquanto as Tabelas 4 e 5 apresentam os dados climáticos e construtivos inseridos no software, respectivamente.

Tabela 3 - Relação das espécies arbóreas inseridas nos modelos para calibração

Nome	IAF	h	Local	Nome	IAF	h	Local
Árvore Padrão BD	3,50	4-6	P1/P2	Palmeira Fênix P2	1,3	3,2	P2
Árvore Padrão MD	4,9	7-9	P1/P2	Palmeira P	0,85	5	P1
Árvore Padrão AD	6,3	≥ 10	P1/P2	Palmeira Imperial M	0,85	10	P2
Árvore grande vazada	2	15,0	P1/P2	Árvore Talude	2,10	10	P1
Árvore média vazada	0,9	5	P1/P2	Khaya P	2,7	3/4	P2
Árvore pequena vazada	1,3	2,5	P1/P2	Khaya M	3,3	4/5	P2
Arbusto baixo	1	0,6	P1	Cica	3	2	P2
Arbusto denso	2	1,0	P1	Areca	2	4	P2
Oiti grande	2,24	11	P1	Ficus MD	3,3	5/6	P2
Mangueira PP	4	6	P1	Árvore P2 a	3,0	6,0	P2
Mangueira P	4	8	P2	Árvore P2 b	1,75	5,0	P2
Mangueira M	5	13	P1	Árvore P2 c	2,0	6,0	P2
Mangueira G	6,5	15	P1	Árvore P2 d	2,5	6,5	P2
Palmeira Fênix P1	1	3,2	P1	Grama baixa	1,0	0,1	P1/P2

Elaboração: os autores, 2022

Após a simulação, os resultados obtidos em medição foram comparados com os obtidos com a simulação, permitindo avaliar o funcionamento do software e verificar a sua precisão para as particularidades do local e a necessidade de ajustes dos parâmetros do modelo.

Tabela 4 - Dados climáticos inseridos do Envi-met

Variáveis	P. Quente-úmido 20.12.2022	P. Quente-seco 05.08.2022
Temperatura máxima / horário	34,2 °C / 16h	36,6 °C / 16h
Temperatura mínima / horário	24,5 °C / 5h	21,70 °C / 6h
Umidade relativa máxima / horário	81% / 6h	61% / 6h

Variáveis	P. Quente-úmido 20.12.2022	P. Quente-seco 05.08.2022
Umidade relativa mínima / horário	37% / 16h	17% / 16h
Velocidade do ar (m/s)	2,09m/s	1,04m/s
Direção do vento (°)	330° (NW)	54 (NE)
Nebulosidade (nuvens baixas/medias/altas)	4/1/0	0/0/0
Umidade específica	10,67g/kg	7,7 g/kg
Umidade do solo (0-20cm)	60%	31,5%
Umidade do solo (20-50cm)	65%	31,0%
Umidade do solo (50-200cm)	70%	31,0%
Temperatura do solo (0-20cm)	30,00 °C	28,00 °C
Temperatura do solo (20-50cm)	31,85 °C	29,00 °C
Temperatura do solo (50-200cm)	32,85 °C	29,50 °C

Fonte: INMET. Elaboração: Os autores, 2022.

Tabela 5 - Propriedades térmicas dos materiais de construção no P1 e no P2

Parâmetro	Cobertura		Parede	
	P1	P2	P1	P2
	Telha de barro	Telha fibrocimento	Taipa cor média	Argamassa cor média
Espessura (m)	0,05	0,01	0,05	0,01
Reflexão	0,50	0,70	0,50	0,60
Absorção	0,50	0,30	0,50	0,40
Transmissão	0,00	0,00	0,00	0,00
Emissividade	0,90	0,90	0,90	0,90
Calor específico (J/kg°C)	840	840	840	850
Condutiv. térmica W/m°C)	0,81	1,90	0,81	1,60
Densidade (kg/m³)	1.700	2.500	1.700	2.220

Fonte: Banco de dados do Envimet. Elaboração: Os autores, 2022.

Simulação - Etapa experimental

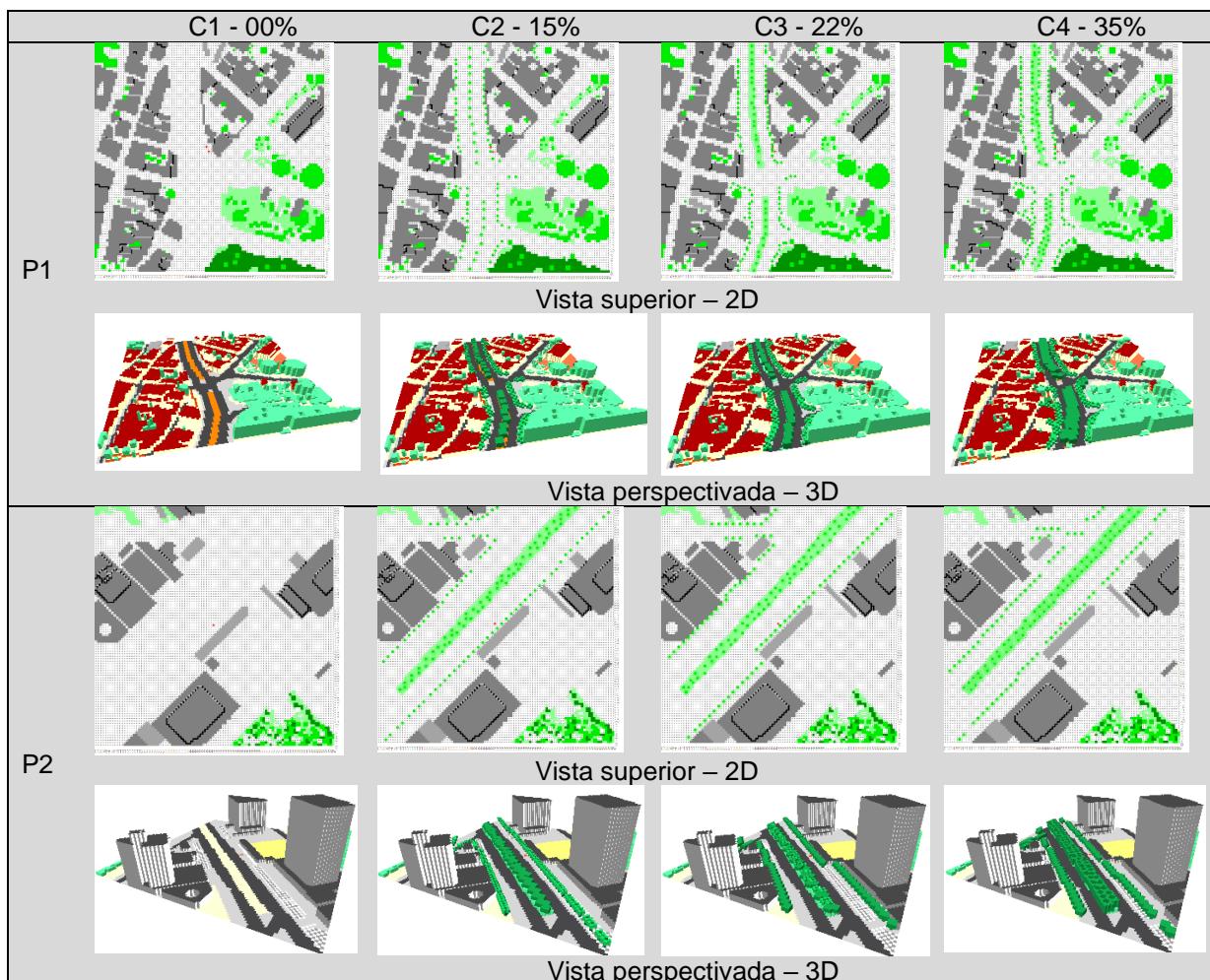
A segunda fase de simulação foi estruturada com as seguintes etapas: a) modelagem tridimensional dos cenários hipotéticos b) Levantamento e seleção dos dados climáticos; c) Criação do banco de espécies arbóreas; d) Configuração dos dados de saída e processamento do software.

Os cenários hipotéticos dos pontos P1 e P2 foram modelados a partir do modelo adotado na simulação para a calibração. A única alteração foi a remoção total de espécies arbóreas, quando presentes na caixa viária (apenas no P2 são presentes no cenário real). A partir do cenário de referência de cada ponto, os demais cenários com as variações de IDA e de arranjo foram criados, conforme especificado nos Quadros 2 e 3, resultando nos modelos geométricos apresentados no Quadro 4. Apenas a arborização viária é hipotética, a geometria construtiva e as características de cobertura do solo e revestimento dos materiais foram definidas conforme as características reais coletadas em campo.

Quanto aos dados de entrada, O banco de materiais construtivos foi o mesmo adotado na simulação de calibração (Tabela 5). Basicamente, os novos dados inseridos para esta etapa foram o banco climático e o de vegetação. Nesta etapa, para o banco climático, foi utilizada a opção *Full Forcing*, por ser mais completa e detalhada que o *Simple Forcing*, e por permitir avaliar as condições de um dia típico de cada período a partir de arquivos climáticos confiáveis. O arquivo climático adotado foi o *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)*, em formato “.epw” (*EnergyPlus Weather*), obtido da estação meteorológica Marechal Rondon (Várzea Grande-MT). A única seção editada manualmente foi a seção do solo, cujos valores foram os mesmos usados por Callejas *et al.* (2020) para a umidade, porém com alguns ajustes a partir dos resultados da simulação de calibração, aumentando um pouco os níveis de umidade para aproximar com os resultados da medição. Os demais itens editáveis foram mantidos na opção padrão do programa. Em relação ao período do ano, a simulação foi configurada

para processar nos dias 05.08 e 20.12, representando os períodos quente-seco e quente-úmido, respectivamente.

Quadro 4 - Variação dos cenários, em imagens 2D e 3D, para os pontos P1 e P2



Elaboração: Os autores, 2023.

Quanto aos dados de vegetação, adotou-se o banco de dados de vegetação padrão do *Albero L-System Editor* com ajustes para representar os espécimes arbóreos definidos nos cenários hipotéticos (Quadros 2 e 3). Uma das configurações necessárias para a simulação computacional no *Envi-met* é a Densidade de Área Foliar (DAF) em cada camada da copa da árvore, da superfície do solo até o topo da copa, considerando dez camadas. A DAF é definida como a área foliar unilateral total por unidade de volume da copa (m^2/m^3) (HOSOI; OMASA, 2009) e pode ser obtida a partir do valor de Índice de Área Foliar (IAF), um parâmetro biofísico adimensional da vegetação definido como a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo (m^2/m^2) (WATSON, 1952), que é a somatória dos valores de DAF de todas as camadas. Tendo-se algumas referências de valores de IAF obtidas em estudos anteriores, que obtiveram sombreamento eficiente, e visando obter uma área de projeção de dossel efetiva de sombreamento, adotou-se um valor de IAF de espécies de média a alta densidade foliar, com valor de entre 4 e 5 m^2/m^3 , tomando como referência o levantamento realizado por Rossetti *et al.*, (2019), de padrões de densidade de área foliar e geometria de copa das árvores de elevada frequência de ocorrência na arborização pública cidade de Cuiabá (clima tropical em região central do Brasil), considerando espécies nativas e exóticas. Desta maneira, converteu-se o IAF em DAF, resultando no valor fixo de dois para os três modelos arbóreos criados, assumindo-se a homogeneidade da DAF no interior das camadas. Para considerar o efeito da sazonalidade, foi editado

um calendário anual, em que é possível colocar um fator de redução para a densidade foliar, deixando os meses de junho, julho e agosto com 90% da densidade foliar da espécie em relação aos demais meses.

Após a configuração do DAF, configurou-se a altura e diâmetro dos modelos arbóreos adotados, considerando-se as três variações: um de pequeno porte (5m de altura e 3m de diâmetro); um de médio porte, (7m de altura e 5 m de diâmetro); e um de grande porte, (10m de altura e 7m de diâmetro), sendo que as árvores pequena e média foram editadas a partir de um modelo padrão do banco de vegetação, de dossel em formato esférico, enquanto para a árvore grande considerou-se o formato cilíndrico. As demais propriedades fisiológicas dos modelos arbóreos não foram alteradas, mantendo-as de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades fisiológicas das espécies arbóreas

Propriedades	Valores
Tipo de folha (sazonalidade)	perene
Tipo de fixação de CO ₂	C3
Albedo - ondas curtas da folhagem	0,18
Transmitância - ondas curtas da folhagem	0,30
Emissividade das folhas	0,96
Capacidade isoprene	12,0
Peso das folhas (g/m ²)	100
Diâmetro da raiz	3,0
DAF ou LAD (para cada camada)	2,0

Fonte: Adaptado de ROSSETI (2013) e CALLEJAS *et al.*, (2020).

A duração da simulação foi definida com total de 48 horas, pois considerou-se um período de adaptação e estabilização do microclima, de 24 horas, antes do início do período de 24 horas de avaliação. Quanto à variável climática adotada como parâmetro de avaliação, definiu-se a Trm, em °C, de um determinado ponto (denominado Ponto A) situado a 1,5 metro de altura acima do solo, por ser a altura média aproximada do core central do corpo humano, em pé, nos usos habituais do espaço urbano. Para a análise, comparou-se a Trm do cenário sem arborização viária (C1), com a Trm do ponto A (sob dossel arbóreo) nos cenários arborizados, com índices de cobertura arbórea crescentes (C1 – 15%, C2 – 22% e C3 – 35%).

RESULTADOS

Calibração

A Tabela 7 e a Figura 9 ilustram a comparação entre os resultados da Trm obtidos na medição, na simulação e na estação de referência (INMET), para os mesmos horários. Os dados da estação não são dados do momento exato da medição, é uma média entre valores máximos e mínimos do horário analisado. Além disto, é importante lembrar que a estação não se encontra exatamente no local experimental, e sim a alguns quilômetros distantes, justificando pequenas diferenças entre as variáveis climáticas, servindo por isso apenas como uma referência aproximada.

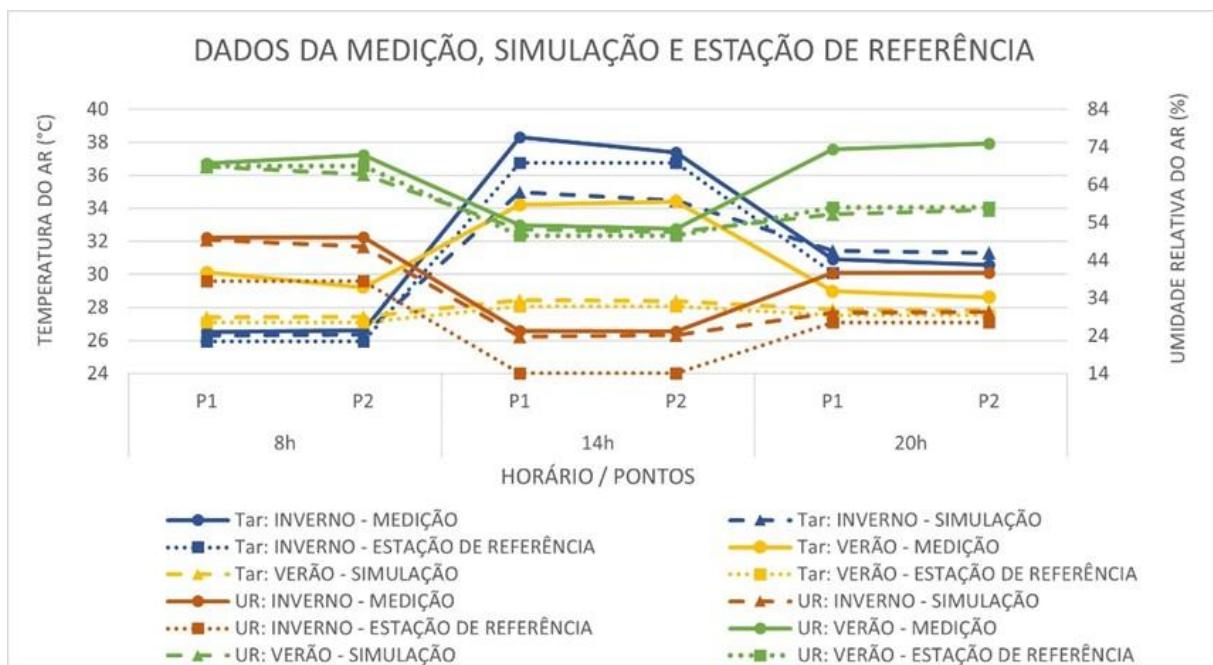
Tabela 7 - Dados da Trm, de Medição e de Simulação (Inverno e verão), nos pontos P1 e P2

Horário	8h		14h		20h	
	Variáveis / pontos	P1	P2	P1	P2	P1
Tar: Inverno – Medição (°C)	26,52	26,60	38,31	37,40	30,93	30,57
Tar: Inverno – Simulação (°C)	26,28	26,35	34,98	34,46	31,43	31,31
Tar: Inverno – Estação Ref. (°C)	25,95	25,95	36,75	36,75	30,10	30,10
Tar: Verão – Medição (°C)	30,12	29,22	34,2	34,41	28,97	28,62

Tar: Verão – Simulação (°C)	28,82	29,03	33,51	33,16	30,92	30,63
Tar: Verão - Estação Ref. (°C)	27,50	27,50	31,80	31,80	29,40	29,40
UR: Inverno - Medição (%)	50,00	50,10	25,30	25,20	40,60	40,70
UR: Inverno – Simulação (%)	49,36	47,62	23,82	24,22	30,12	30,28
UR: Inverno - Estação Ref. (%)	38,50	38,50	14,00	14,00	27,50	27,50
UR: Verão – Medição (%)	69,70	71,90	53,30	52,30	73,40	74,90
UR: Verão – Simulação (%)	68,87	66,68	52,23	51,45	56,14	57,34
UR: Verão - Estação Ref. (%)	69,00	69,00	50,50	50,50	58,00	58,00

Fonte: os autores, 2023.

Figura 9 - Gráfico com resultados de Medição, simulação e da estação de referência



Fonte: os autores, 2023.

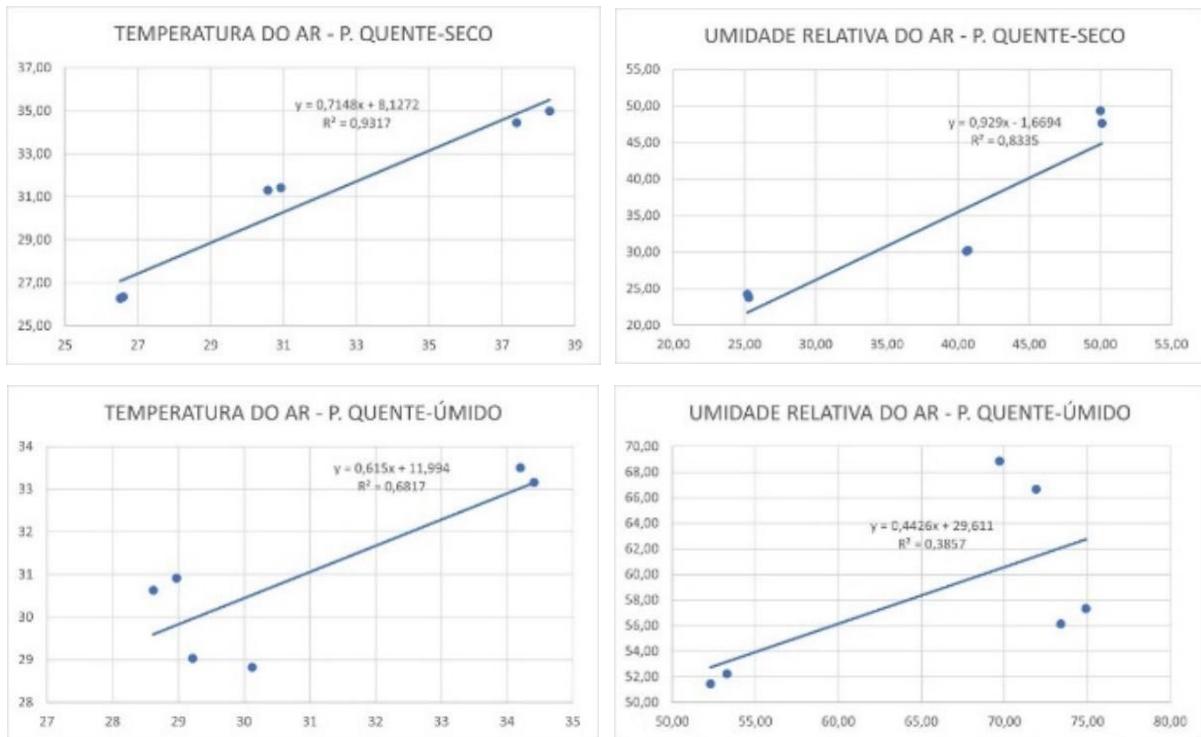
Para verificar o grau de correlação entre os dados medidos e simulados, foi feita uma análise estatística, adotando-se os métodos de Regressão Linear e Correlação de Pearson. A Tabela 8 apresenta os valores obtidos a partir dos métodos adotados, para o P1 e para o P2, no período quente-seco e quente-úmido, enquanto a Figura 10 apresenta os resultados da Regressão Linear, em que o eixo x representa os valores de medição, enquanto o eixo y de simulação.

Tabela 8 - Resultados das análises estatísticas pelos métodos Regressão Linear (r^2) e Correlação de Pearson (r)

Variável/ Período	Método estatístico Regressão Linear (r^2)	Correlação de Pearson (r)
Temp. ar / quente-seco	0,93	0,97
Temp. ar / quente-úmido	0,68	0,83
Umidade Rel. / quente-seco	0,83	0,92
Umidade Rel. / quente-úmido	0,39	0,62

Fonte: os autores, 2023.

Figura 10 - Gráficos de Regressão Linear para dados de Temperatura do ar e Umidade relativa do ar

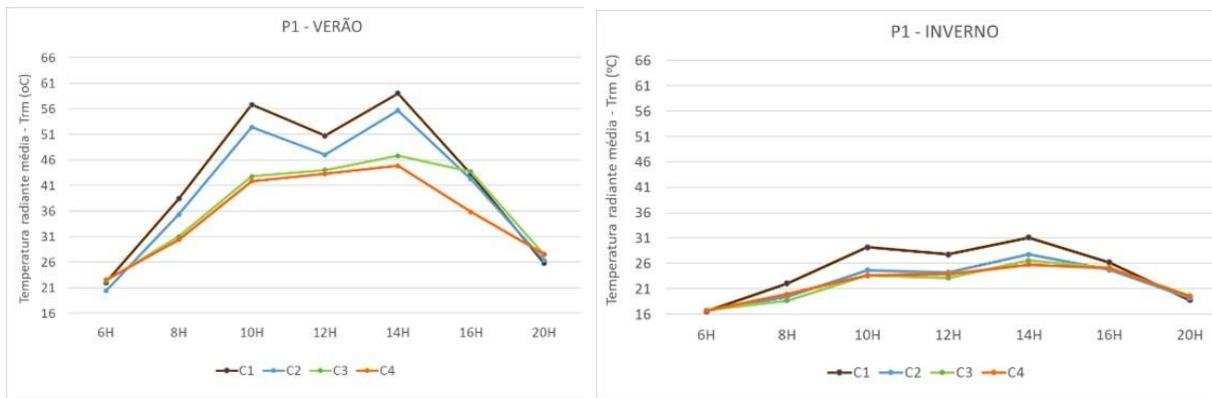


Fonte: os autores, 2023.

Cenários hipotéticos

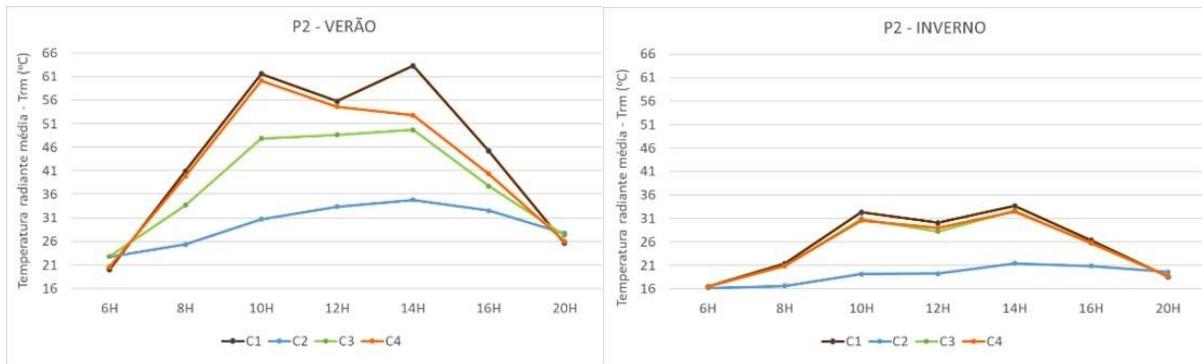
As Figuras 11 e 12 apresentam a Trm do Ponto A nos cenários variados de IDA, no P1 e P2, respectivamente.

Figura 11 - Temperatura radiante média (Trm) (°C), do Ponto A, nos cenários (C1, C2, C3, C4), no P1



Fonte: os autores, 2023.

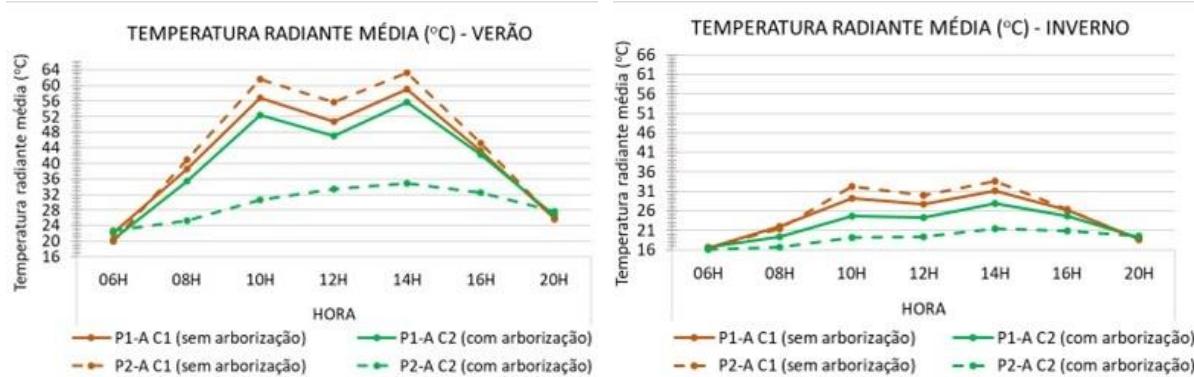
Figura 12 - Temperatura radiante média (Trm) (°C), do Ponto A, nos cenários (C1, C2, C3, C4), no P2



Fonte: os autores, 2023.

Para analisar o impacto da morfologia urbana no efeito de resfriamento da arborização viária, tomou-se como referência um dos cenários, o de densidade intermediária (C2) para comparar a diferença entre a Trm do cenário não vegetado com um vegetado, no P1 (LCZ 3) e no P2 (LCZ 4). Nos gráficos da Figura 13, os dados de P1 e P2 estão plotados juntos para facilitar a visualização da diferença do impacto da arborização entre as morfologias urbanas, no verão e no inverno, sem avaliar o incremento do índice de cobertura arbórea.

Figura 13 - Comparação da Trm entre cenário não vegetado e cenário vegetado, no P1 e no P2.



Fonte: os autores, 2023.

DISCUSSÃO

Em relação à calibração, de um modo geral, as diferenças de valores entre simulação e medições, são menores que 10%, apresentando um comportamento equivalente das variáveis na medição e na simulação, com exceção da umidade relativa do ar, às 20h, tanto no período quente-seco (inverno), quanto no período quente-úmido (verão). A análise estatística confirmou as constatações quanto à baixa correlação obtida para a umidade relativa do ar, na estação do verão. Para ajustar os resultados, principalmente da umidade relativa do ar às 20h que estava muito abaixo da de medição, os dados do solo foram aumentados, de acordo com os dados adotados por Callejas *et al.*, 2020, acrescidos de pequenos ajustes para aproximação dos resultados. Considera-se a principal causa da discrepância dos resultados da umidade do ar o fato de não se conhecer o dado do solo com precisão, pois usar valores médios podem prejudicar a comparação entre simulação e medição. No entanto, esta diferença brusca, corrobora os resultados obtidos por Michelon (2021), para Florianópolis (SC), em que o autor verificou a tendência do software Envi-met subestimar a UR, que ficou abaixo dos valores medidos nos três horários, em ambos os períodos avaliados, especialmente às 20h. Sun *et al.*, (2017) explica que

desvios de 10 e 35% entre dados de simulação no ENVI-met e dados de medição são comuns e Liu *et al.*, (2021) reforçam que é devido às diferenças na inserção dos dados entre cenário real e simulado, que nem sempre são medidos ou obtidos com precisão, adotando-se valores aproximados, o que pode alterar o resultado do cálculo termodinâmico. Além destas observações, há o fato de que o calor antropogênico gerado pela influência humana, dos veículos e dos sistemas mecânicos de resfriamento, não foi contabilizado no software. E ainda há de se considerar que o dossel vegetativo real não é uniforme como no banco de dados, o que pode subestimar a radiação solar que normalmente atravessa os vazios entre as folhas, ou ainda possíveis erros de medição da densidade de área foliar, que pode influenciar a distribuição da folhagem e introduzir incertezas. Portanto, conclui-se que, diante destes fatos, mesmo com a discordância observada para a umidade relativa do ar às 20h, o Envi-met forneceu uma representação coerente dos dados medidos em campo, considerando-o adequado para prosseguir com as simulações experimentais dos cenários hipotéticos.

Em relação aos cenários hipotéticos, o objetivo da análise foi avaliar o impacto da arborização viária no conforto térmico do pedestre, considerando o IDA como principal parâmetro. Para isso, a Trm no ponto A foi comparada entre os cenários com diferentes IDA. Os resultados indicam (Figuras 11 e 12) que em todos os cenários arborizados (C2, C3, C4), a presença da arborização viária reduz os valores da Trm no Ponto A, no período diurno, principalmente nos horários mais quentes (10h e 14h), com reduções máximas no verão, de 14,16 °C e 30,92 °C, no P1 (LCZ 3) e P2 (LCZ 4), respectivamente. No entanto, no período noturno e nas primeiras horas da manhã, há o efeito praticamente nulo no inverno e contrário no verão, com aumento da Trm, de cerca de 0,50 °C às 6h e cerca 2,0 °C às 20h. Isso ocorre por causa do efeito “guarda-chuva” das copas das árvores, e das múltiplas reflexões de radiações de ondas longas, que aquecem a superfície do solo e o ar adjacente, que não consegue dissipar o calor sob as copas, mantendo-o aquecido por mais tempo, em relação aos pontos descobertos.

Outro estudo local (NOVAIS *et al.*, 2022), constatou redução na temperatura do ar, com a implementação de arborização nos mesmos horário (08h; 14h e 20h), sendo mais significativo às 14h que no início e fim do dia. Os autores explicam que as mudanças são sutis no início do dia, pois não houve tempo necessário para que as superfícies e o ar se aquecessem ao ponto de a arborização fazer efeito de redução nas temperaturas. Já no período noturno, embora se saiba que a grande quantidade de calor armazenado durante o dia é liberada à noite (OKE *et al.*, 1999), deve-se considerar que em áreas urbanas com grande quantidade de superfícies asfaltadas e concretadas, por serem materiais de alta absorção, condutibilidade e calor específico (cerca de 0,223cal/g °C), leva maior tempo para liberar o calor ao meio (NOVAIS *et al.*, 2016). Os resultados desta pesquisa também corroboram com Souza *et al.* (2024), que na mesma área de estudo do P1, avaliaram o impacto do aumento da cobertura arbórea e obtiveram redução na Trm quando incrementaram 11% da cobertura arbórea. Os autores destacam a importância de um adequado posicionamento e espaçamento dos espécimes nas vias ao se pensar a ambiência térmica dos pedestres.

No P1, as reduções na Trm são proporcionais ao incremento da cobertura arbórea, com diferenças sutis entre o C3 e o C4, demonstrando que o aumento da área de cobertura arbórea tem benefícios, porém até certo ponto, pois podem prejudicar o resfriamento do ar logo abaixo das copas. Já no P2, a redução da Trm ocorreu inversamente proporcional ao índice de cobertura arbórea, com o efeito decrescente mais notório no verão. Assim, o C4 (maior IDA) obteve o menor impacto, contudo ainda significativo, de 10,5 °C. No inverno, os cenários (C3 e C4) obtiveram resultados próximos, ambos com pouco impacto na redução da Trm, em média de 1,04 °C, entre 10h e 14h, enquanto o C2, assim como no verão, impactou mais significativamente, com Δ Trm de 12,2 °C. Isso demonstra que para este tipo de morfologia, com edifícios altos em arranjo esparsos (LCZ 4), e consequentemente um menor fator de visão do céu, o incremento nas áreas de cobertura arbórea pode prejudicar a diminuição do fluxo dos ventos e a dissipação da radiação de ondas longas, causada pelas copas das árvores. Ou seja, o sombreamento arbóreo impacta na Trm, pois intercepta a radiação solar direta, por outro lado, obstrui o vento e as perdas convectivas e radiativas, armazenadas sob a copa devido à emissão de ondas longas pelas copas das árvores e superfícies próximas, tendo por isso um efeito negativo ao resfriamento, conhecido como efeito guarda-chuva, corroborando com os achados de Novais *et al.* (2016) e Souza *et al.* (2024), sendo que neste último, o aumento da arborização aumentou a temperatura do ar mas não a Trm.

Observa-se, portanto, a importância de se avaliar, além do índice de cobertura arbórea e de sombreamento arbóreo, as variações no arranjo (distância elas), da altura entre as espécies e do IAF, para confirmar quais aspectos podem melhorar o desempenho térmico e impacto desta estratégia de

mitigação nos espaços urbanos (ZHANG; ZHAN; LAN, 2018; RUI *et al.*, 2018). Há de se considerar ainda, outras pesquisas que também obtiveram respostas pouco impactantes e/ou negativas na Temperatura (principalmente na temperatura do ar, onde os impactos são menos perceptíveis que na Trm), em cenários arborizados em relação aos não arborizados, como a de Yoshida, Shinzato e Duarte (2022); Novais *et al.*, (2022) e Callejas *et al.*, (2020), estes os dois últimos para a mesma região de estudo, em que também se observou uma redução pequena, de apenas 0,1°C na temperatura do ar.

Outro fator que merece atenção quanto à ferramenta computacional, é que em alguns estudos que adotaram o Envimet como ferramenta computacional de simulação térmica, como o de Liu; Zheng e Zhao (2018), constatou-se uma subestimação do efeito térmico das árvores, ou seja, das diferenças de temperatura entre áreas sombreada e não sombreadas por árvores, comprovando que a diferença de temperatura costuma ser menor no Envi-met para cada variável do microclima, em relação às medidas de campo. Isso pode ser considerada uma limitação do software, pois não consegue simular a evaporação que ocorre nas folhas das plantas de forma adequada, ocasionando subestimação dos valores, se comparados aos medidos.

Deve-se, contudo, investigar outros fatores que influenciam a redução da Trm, além da morfologia urbana e o IDA, como por exemplo a altura e a distância entre as espécies. Isso porque os cenários (C2, C3 e C4), embora apresentem mesmo IDA nas duas morfologias urbanas, P1 e P2, não apresentam o mesmo arranjo arbóreo (distribuição), pois a área das caixas viárias e consequentemente das calçadas e canteiros não são iguais, gerando arranjos diferentes para atingir o mesmo IDA. Outro fator que pode influenciar no impacto da arborização é a orientação solar do eixo da via, pois impacta no maior ou menor sombreamento provocado pelos edifícios altos na caixa viária. Porém, este aspecto não é objeto de análise nesta pesquisa.

Analizando o impacto da morfologia urbana, por meio dos gráficos da Figura 13, reforça-se que em ambas as estações do ano, o impacto na redução da Trm é maior no P2 (LCZ 4 - edifícios altos e arranjo esparsos) em relação ao P1 (LCZ 3 - edificações são baixas), nos horários de maior insolação (14h), considerando que em ambos os pontos não há sombreamento por edifícios adjacentes. Isso se deve às múltiplas reflexões que ocorrem nas superfícies das fachadas altas na LCZ 4, provocando um maior aquecimento na superfície das calçadas e no ar adjacente, quando não sombreada. Com o implemento da arborização, estas reflexões são diminuídas significativamente, impactando na redução da Trm de maneira mais expressiva que nas calçadas da LCZ 3, onde não ocorrem esse aquecimento oriundo das múltiplas reflexões de fachadas altas, havendo assim, consequentemente, um menor impacto. Não foram encontrados outros estudos locais até o momento, que avaliaram a correlação entre as variáveis climáticas, a densidade arbórea em vias urbanas e a morfologia urbana, havendo algumas contribuições que relacionam a temperatura superficial (Ts) do solo com a morfologia urbana, sem a análise específica dos arranjos arbóreos.

Em nível nacional, Ferreira e Duarte, 2019 realizaram um estudo para a cidade de São Paulo, em que relacionaram a Ts, diurna e noturna, com as diferentes morfologias urbanas (LCZs) e respectivos índices de cobertura vegetal, comprovando uma relação negativa relevante entre o índice de cobertura vegetal e a Ts, corroborando com outros estudos realizados em outras localidades, como o de Stewart e Oke (2012). Em nível regional, Ferreira e Ugeda Júnior (2020), também verificaram variações na Ts em diferentes LCZs do território urbano de Cuiabá - MT. Li *et al* (2023) mostraram que outros fatores influenciam a Ts (e consequentemente a Trm), além da densidade arbórea: o IAF, a largura da copa e a altura das árvores tiveram grande influência na Ts e no fluxo de calor sensível sob a copa das árvores, e o efeito de resfriamento do agrupamento de árvores foi melhorado quando a altura das árvores ultrapassou 10 (dez) metros, com uma cobertura ideal de 30 %. Contudo, ainda é necessário aprofundar em pesquisas para uma maior compreensão da correlação entre as variáveis climáticas (Ts, Trm ou índice PET) e as características construtivas, a geometria urbana (tipologia de LCZ), a densidade vegetativa, as variáveis do arranjo arbóreo, como a altura da árvore, largura da copa e distanciamento entre os espécimes, em busca de uma maior precisão dos resultados e visando soluções eficientes para o planejamento urbano, que seja capaz de mitigar os efeitos do aquecimento urbano e desconforto térmico dos pedestres.

Embora algumas correlações já tenham sido confirmadas pela literatura, os valores das propriedades precisam ser verificadas para o contexto da região de estudo. Quanto ao grau de impacto nas diferentes estações do ano, o resultado apresentou comportamento oposto ao que as pesquisas costumam apontar, que é de impacto maior nos períodos secos devido ao déficit de umidade do ar, ocorrendo assim maior evaporação da água para o ambiente, por meio do processo de evapotranspiração da

vegetação, desde que haja disponibilidade de água no solo. A redução da Trm é determinada pela quantidade de umidade do ar e do solo, porém, neste caso, ao observar impactos expressivamente menores no inverno, deve-se considerar que talvez o dado de umidade do solo e do ar adotado esteja abaixo da condição real e que o dia selecionado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo abordou o impacto da arborização viária no microclima urbano e no conforto térmico do pedestre, adotando como principal parâmetro de avaliação o IDA. Além disso, investigou também a influência da morfologia urbana no efeito de resfriamento da arborização em vias.

Os resultados das simulações no Envi-met v.5 demonstraram que a arborização viária se mostra uma estratégia importante para a redução dos efeitos do aquecimento urbano, capaz de reduzir a Trm, obtendo-se uma redução expressiva de até 14°C no P1 (LCZ 1) e 31°C no P2 (LCZ 4).

Ficou evidente que a arborização reduz o aquecimento e melhora a sensação de conforto térmico urbano, principalmente no período diurno, contudo, há limitações nos efeitos microclimáticos, principalmente nos momentos de altas temperaturas, como às 10h e 14h, por exemplo, em que o sombreamento arbóreo e o resfriamento evaporativo da vegetação não são suficientes para se atingir o conforto térmico. É preciso adotar outras estratégias em conjunto com a arborização para mitigar o aquecimento urbano rigoroso, como a pintura de fachadas com cores claras, pavimentação com menores índices de absorção; inserção de corpos d'água, espaçamento entre as edificações para permitir circulação dos ventos, entre outras.

No período noturno, a arborização tem efeito nulo ou contrário, podendo aumentar a Trm devido ao efeito guarda-chuva das copas, que além de reduzir o fluxo dos ventos, prejudica as perdas da radiação de ondas longas devido às múltiplas reflexões do meio ambiente urbano. Assim, embora o sombreamento arbóreo intercepte a radiação solar, por outro lado funciona como uma barreira para as perdas convectivas e radiativas.

Quanto ao impacto da arborização viária nos períodos do ano, para este clima analisado, caracterizado por duas estações definidas, quente-seco (inverno) e quente-úmido (verão), constatou-se um impacto maior no período quente-úmido, sendo pouco significativo no período quente-seco.

Em relação ao incremento do IDA pôde-se concluir que o impacto na redução do da Trm é proporcional na área de tipologia morfológica urbana da classe LCZ 3 e inversamente proporcional na da classe LCZ 4. O motivo está no cânion urbano da LCZ 4, que reduz o fator de visão do céu, e com isso dificulta as perdas do calor infravermelho (radiação de ondas longas). Assim, pode-se dizer que, apesar do benefício duplo de sombreamento e evapotranspiração que esta estratégia promove, pode causar um efeito negativo no conforto térmico, principalmente em arranjos fechados e com espécies arbóreas baixas. Neste sentido, os cenários com maior IDA não obtiveram os maiores impactos na atenuação da Trm nas duas morfologias urbanas avaliadas, portanto, não se deve afirmar que o efeito de resfriamento é proporcional ao incremento do IDA. São muitos os fatores que interferem no efeito de resfriamento da arborização, como por exemplo as dimensões de altura, diâmetro e o afastamento entre elas, sem falar nas propriedades fisiológicas das espécies, uma vez que diferentes tipos de vegetação têm efeitos distintos sobre o microclima e a qualidade do ar, porém este aspecto precisa ser investigado com mais aprofundamento, pois não foi objetivo desta pesquisa.

Por último, sugere-se que o IDA sirva como um parâmetro quantitativo para os planos de arborização, e que sejam aplicados de maneira distinta nas diferentes tipologias morfológicas urbana. Portanto, o conhecimento do impacto do IDA no conforto térmico pode auxiliar gestores nas decisões projetuais do planejamento urbano, evitando equívocos na orientação quanto à densidade arbórea exigida, pois altos índices de densidade arbórea, dependendo da morfologia urbana e do clima, podem não desempenhar a função de mitigação do calor urbano, e ainda podem gerar altos custos de implantação e manutenção, sem que haja o benefício esperado.

REFERÊNCIAS

AUTODESK. **Software Autocad**. Disponível em: www.autodesk.com/pt/products/autocad/overview. Acesso em: 5 fev. 2022.

BABY, A.; AGUIAR, W. **Era da Fervura Global:** Cuiabá na fila da vulnerabilidade das mudanças climáticas. Crea-MT. Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Mato Grosso. Disponível em: <https://www.crea-mt.org.br/portal>. Acesso em: 13 set. 2023.

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

ENVIMET. **Software ENVI-met Science Student Edition**, [s. l.]2021. Disponível em: <https://www.envi-met.com/>. ID. 832406563. Acesso em: 6 out. 2021.

FERREIRA, H. V. L. **A organização do espaço urbano e a estrutura térmica da cidade de Cuiabá-MT.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, ICHS. Cuiabá, 2019.

FERREIRA, L. S.; DUARTE, D. H. S. Exploring the relationship between urban form, land surface temperature and vegetation indices in a subtropical megacity. **Urban Climate**, v. 27, p. 105-123, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.11.002>

FERREIRA, H. V. L.; UGEDA JÚNIOR, J. C. Variação da temperatura da superfície através de imagens Aster em zonas climáticas locais da cidade de Cuiabá, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, 2020. ISSN: 2237-8642. <https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.67546>

FERREIRA, L. S.; FERRETO, D.; DUARTE, D. H. S. Mapeando a morfologia urbana: aplicações do método Local Climate Zones (LCZ) em diferentes escalas do projeto. **Revista Pos FAUUSP**. São Paulo, 2023. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2317-2762.posfausp.2023.197563>

GOOGLE EARTH. **Google Earth**. Disponível em: <http://earth.google.com/web>. Acesso em: 18 ago. 2022.

HOSOI, F.; OMASA, K. Estimating vertical plant area density profile and growth parameters of a wheat canopy at different growth stages using three-dimensional portable lidar imaging. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, p.151-158. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.09.003>

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados climáticos**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. Acesso em: 13 set. 2022.

LI, J.; ZHAI, Z.; DING, Y.; LI, H.; DENG, Y.; CHEN, S.; YE, L. Effect of optimal allocation of urban trees on the outdoor thermal environment in hot and humid areas: A case study of a university campus in Guangzhou, China. **Energy and Buildings**, v. 300, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113640>

LIU, Z.; ZHENG, S.; ZHAO, L. Evaluation of the ENVI-Met Vegetation Model of Four Common Tree Species in a Subtropical Hot-Humid Area. **Atmosphere** 9(5), 2018. <https://doi.org/10.3390/atmos9050198>

LIU, Z.; CHENG, W.; JIM, C.Y.; MORAKINYO, T. E.; SHI, Y.; NG, E. Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4. **Building and Environment**, v. 200, p. 107939, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107939>

MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S.; QUERINO, C. A. S.; DANIELICHEN, V. H. de M.; VELASQUE, M. C. S. Seasonal and interannual pattern of meteorological variables in Cuiabá, Mato Grosso State, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 33 n.3, p.1-10, 2015. <https://doi.org/10.5902/2179460X41205>

MAITELLI, G. T. **Uma abordagem tridimensional de clima urbano em área tropical continental: o exemplo de Cuiabá-MT**. Tese (Geografia Física). USP, São Paulo-SP. 1994.

MICHELON, T. **Análise por simulação computacional da influência de elementos vegetados e de sombreamento no conforto térmico ao nível do pedestre em microclima urbano para Florianópolis – SC**. Dissertação 156 (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2021.

MONTEIRO, C. A. F. Notas para o estudo do clima do Centro-oeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia**, ano XIII, n. 1. 1951. Disponível em: <http://rbg.ibge.gov.br/index.php/rbg/article/view/1047>. Acesso em: 08 fev.2025.

- NOVAIS, J.W.Z.; JOAQUIM, T. D.; KUNZ, F. de O., et al. Condições térmicas e dependência espacial da temperatura de diferentes superfícies pelo Método da Krigagem em Cuiabá-MT, Brasil. **Ensaio e Ciência**, v.20, n.3, p.131-136, 2016. <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2016v20n3p133-138>
- NOVAIS, J.; W. Z.; RIBEIRO, T. S.; SILVA, R. D. de S. L. da; SOUZA, P. J. de. Influência da inserção de vegetação na temperatura do ar de um loteamento de interesse social em Cuiabá/MT. **Nature and conservation**, v. 15, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2022.001.0005>
- OKE, T. R.; MILLS, A. G.; CHRISTEN, A.; VOGT, J. A. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. ISBN 9781107429536. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- OLIVEIRA, Â. S. de; CALLEJAS, I. J. A; NOGUEIRA, M. C. J. de A. Relações entre vegetação arbórea e uso de praças públicas: estudo de caso em cidade de clima tropical. **ENCONTRO NACIONAL (12.) E ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (8.) (ENCAC e ELACAC)**, 2013, Brasília. **Anais...** Brasília, v.1, 2013. DOI:10.13140/RG.2.1.2452.0400.
- PREFEITURA DE CUIABÁ. **Hierarquia das vias e vias verdes**. 2011. Disponível em: <http://www.cuiaba.mt.gov.br/secretarias/meio-ambiente-e-desenvolvimento-urbano-e-sustentavel/uso-e-ocupacao-do-solo>. Acesso em: 8 fev. 2025.
- PREFEITURA DE CUIABÁ. **Plano diretor de arborização urbana de Cuiabá – PDAU**, 2023.
- ROSSETI, K. de A. C.; SCAFFI, M. H.; CALLEJAS I. J. A.; DURANTE, L. C. Proposta metodológica para levantamento e configuração de Densidade de Área Foliar (DAF) para aplicação no software ENVI-met. **E&S - Engineering and Science**, v. 2, ed. 8, 2019. <https://doi.org/10.18607/ES201988566>
- RUI, L.; BUCCOLIERI, R.; GAO, Z.; DING, W.; SHEN, J. The Impact of Green Space Layouts on Microclimate and Air Quality in Residential Districts of Nanjing, China. **Forests**. 2018. v.9, 224. <https://doi.org/10.3390/f9040224>
- SILVA, D.; SANTOS-FILHO, M. Aspectos ecológicos de *Stenocercus caducus* (Squamata:Iguanidae) em fragmentos de floresta no sudoeste de Mato Grosso. **Revista Colombiana de Ciência Animal - RECIA**. 2, 2010. <https://doi.org/10.24188/recia.v2.n2.2010.280>
- SOUZA, G. M. M. de; CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; ROSSETI, K. de A. C.; NUNES, G. K.; MASCARO, L. P. M.; BONALDO, J. P. Benefícios microclimáticos e de conforto térmico proporcionado pela vegetação arbórea na região tombada do Centro Histórico. **ES Engineering and Science**, v. 13, n. 2, 2024. <https://doi.org/10.18607/ES20241316849>
- STEWARD, I.D.; OKE, T.R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bull. Am. Meteorol. Soc.** 93, 1879–1900, 2012. <https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00019.1>
- SUN, S.; XU, X.; LAO, Z.; LIU, W.; LI, Z.; GARCÍA, E. H.; HE, L. Jianning Zhu. Evaluating the impact of urban green space and landscape design parameters on thermal comfort in hot summer by numerical simulation. **Building and Environment**, v. 123, p. 277-288, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.010>
- WATSON, D. J. The physiological basis of variation in yield. **Advances in Agronomy**, v. 4, p.101-144, 1952. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60307-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60307-7)
- YOSHIDA, D.; SHINZATO, P.; DUARTE, D. H. Da S. The microclimate effects of urban green infrastructure under RCP 8.5. projection and plant vitality. Will plants be enough? **CONFERENCE PLEA**, Santiago, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/365780271_The_microclimate_effects_of_urban_green_infrastructure_under_RCP_85_projection_and_plant_vitality_Will_plants_be_enough. Acesso em: 9 fev.2025.
- ZHANG, L.; ZHAN, Q.; LAN, Y.. Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters. **Building and Environment**, v. 130, p. 27-39, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.014>