

Quantificação do efeito do sombreamento arbóreo na edificação nos dias de verão

Quantifying the effect of tree shading on buildings during the summer

Cuantificar el efecto del sombreado de los árboles en los edificios durante el verano

Thayná Moreira Silva

Mestre Engenharia Ambiental, UFLA, Brasil
thaysilvamoreira22@gmail.com

Dimas Jose Rua Orozco

Professor Doutor, UFLA, Brasil.
dimas.rua@ufla.br

Luana Elis de Ramos e Paula

Professora Doutora, UFLA, Brasil.
luana.paula@ufla.br

RESUMO

No Brasil, aproximadamente 50% da energia elétrica gerada é consumida em edificações, portanto adotar estratégias para reduzir o consumo de energia é uma maneira eficaz de alcançar maior eficiência energética. As edificações podem ser aprimoradas por meio da substituição de materiais isolante, bem como pela modificação de sua forma. No entanto, para edifícios antigos, as estratégias devem ser aplicadas em seu entorno. Uma opção viável é a plantação de árvores, que, por meio do sombreamento, filtram a radiação solar, alterando assim o balanço térmico. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é quantificar o impacto do sombreamento proporcionado por espécies arbóreas no consumo de energia para condicionamento do ar em cidade de baixa densidade populacional. Para alcançar esse objetivo, foram seguidos procedimentos metodológicos que envolveram a coleta de dados empíricos durante três dias de verão. Esses dados foram posteriormente inseridos em um modelo de simulação no software Energy Plus TM. A variável desejada foi a carga térmica da edificação. Os resultados obtidos indicam que o sombreamento proporcionado pelas árvores reduz significativamente a carga térmica. Esse efeito é mais pronunciado às 16:00 horas, com redução de 11,87% ,14 ,92% e 12,55% e. Além disso, observou-se uma redução significativa no consumo de energia, sendo de 20,52% para um sistema de ar-condicionado com um coeficiente de desempenho (COP) de 2,60. Assim, conclui-se que o sombreamento na fachada oeste durante o final da tarde no verão reduz o consumo de energia de forma mais eficaz do que o sombreamento pela manhã ou no início da tarde.

PALAVRAS-CHAVES: Eficiência energética. Sombreamento. Espécies arbóreas. Carga térmica. Consumo de Energia.

ABSTRACT

In Brazil, approximately 50% of the electricity generated is consumed in buildings, so adopting strategies to reduce energy consumption is an effective way of achieving greater energy efficiency. Buildings can be improved by replacing insulating materials, as well as by modifying their shape. However, for older buildings, strategies must be applied to their surroundings. One viable option is the planting of trees, which, through shading, filter out solar radiation, thus altering the thermal balance. In this context, the aim of this study is to quantify the impact of shading provided by tree species on energy consumption for air conditioning in a city with a low population density. To achieve this objective, methodological procedures were followed that involved collecting empirical data over three summer days. This data was then entered into a simulation model in the Energy Plus TM software. The desired variable was the building's thermal load. The results indicate that the trees' shading significantly reduces the thermal load. This effect is most pronounced at 4 p.m., with a reduction of 11.87% ,14.92% and 12.55%. In addition, there was a significant reduction in energy consumption of 20.52% for an air conditioning system with a coefficient of performance (COP) of 2.60. Therefore, shading on the west façade during the late afternoon in summer reduces energy consumption more effectively than shading in the morning or early afternoon.

KEYWORDS: Energy efficiency. Shading. Tree species. Thermal load. Energy consumption.

RESUMEN

En Brasil, aproximadamente el 50% de la electricidad generada se consume en los edificios, por lo que adoptar estrategias para reducir el consumo de energía es una forma eficaz de lograr una mayor eficiencia energética. Los edificios pueden mejorarse sustituyendo los materiales aislantes y modificando su forma. Sin embargo, en el caso de los edificios más antiguos, las estrategias deben aplicarse a su entorno. Una opción viable es la plantación de árboles que, mediante el sombreamento, filtran la radiación solar, alterando así el equilibrio térmico. En este contexto, el objetivo de este estudio es cuantificar el impacto del sombreamento proporcionado por especies arbóreas en el consumo de energía para climatización en una ciudad con baja densidad de población. Para alcanzar este objetivo, se siguieron procedimientos metodológicos que implicaron la recogida de datos empíricos durante tres días de verano. A continuación, estos datos se introdujeron en un modelo de simulación en el programa informático Energy Plus TM. La variable deseada era la carga térmica del edificio. Los resultados obtenidos indican que el sombreamento proporcionado por los árboles reduce significativamente la carga térmica. Este efecto es más pronunciado a las 16.00 horas, con una reducción del 11,87% ,14,92% y del 12,55%. Además, se produjo una reducción significativa del consumo energético del 20.52% para un sistema de aire acondicionado con un coeficiente de rendimiento (COP) de 2,60. Por lo tanto, puede concluirse que el sombreamento de la fachada oeste a última hora de la tarde en verano reduce el consumo de energía de forma más eficaz que el sombreamento por la mañana o a primera hora de la tarde.

PALABRAS CLAVE: Eficiencia energética. Sombreado. Especies arbóreas. Carga térmica. Consumo energético.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, de acordo com o Atlas de eficiência energética 2022 publicado pela EPE, as edificações lideram o consumo de eletricidade, representando cerca de 50% do consumo total do país. Portanto, é notório a importância da adoção de medidas de eficiência e energética por parte de planejadores, construtores e responsáveis pelo planejamento urbano.

Nas cidades, a eficiência energética pode ser alcançada por meio da integração de vegetação urbana, o que também contribui para a redução do estresse térmico nas áreas urbanas. Diversas estratégias verdes podem ser implementadas, incluindo o uso de gramados, telhados e paredes verdes, bem como o estabelecimento de florestas urbanas.

A plantação de árvores é uma das maneiras para alcançar a melhoria no ambiente térmico urbano. O sombreamento proporcionado pelas árvores desempenha um papel crucial nesse processo, uma vez que filtra a radiação solar. A eficácia desse sombreamento é influenciada pela forma e densidade do dossel, assim como, pela densidade dos galhos e cobertura foliar.

Um dos resultados benéficos do sombreamento das árvores é a redução do consumo de energia em edifícios. Em climas quentes, o sombreamento das superfícies das edificações pode significativamente diminuir a necessidade de uso de ar-condicionado. Isso, por sua vez, resulta na redução da carga de resfriamento, como destacado por (SIMÁ et al., 2015a).

Os estudos que buscam analisar o potencial de sombreamento das árvores na redução do consumo de energia com carga de resfriamento podem ser conduzidos tanto de forma experimental, com base em dados empíricos, quanto por meios de simulações termo-energéticas. No trabalho de Huang et al. (1987) para demonstrar os benefícios econômicos do sombreamento proporcionado por árvores, foi adaptada uma abordagem de simulação. Nesse estudo, ao aumentar a cobertura arbórea em 25%, observou-se uma redução de 40% na carga de resfriamento na cidade de Sacramento, EUA. Por outro lado, o estudo experimental realizado por Ogueke et al. (2017) empregou um método prático. Nesse estudo, os autores utilizaram estacas de madeira seca, cada uma equipada com duas chapas de aço galvanizado. Essas chapas foram instaladas diferentes distâncias do tronco da árvore, nas direções leste, oeste, norte e sul. Esse arranjo permitiu a medição das temperaturas das placas de aço galvanizado e, subsequentemente, a quantificação da quantidade de energia absorvida. Os resultados do estudo concluíram que o plantio adequado de árvores pode resultar em uma redução de mais de 1050 kWh/ano na carga de resfriamento, o que corresponde a 22% do consumo anual de energia.

A pesquisa realizada por Simpson e Mcpherson (1996) demonstrou que a direção oeste das casas proporciona maior economia de energia em relação à carga de resfriamento. Eles descobriram que ao adicionar uma árvore de sombra no lado oeste e outra no lado leste de uma casa, os custos anuais de refrigeração da casa podem ser reduzidos em uma faixa de 10% a 50%, dependendo da localização no hemisfério de estudo. Isso ressalta a importância da vegetação, em particular das árvores de sombra.

Além disso, no estudo de Wang et al. (2016), através de simulações, foram destacados os efeitos biofísicos provenientes das árvores e gramados urbanos na redução do consumo de energia. Os resultados indicaram que o sombreamento radiativo (redução da radiação direta

sobre as superfícies sólidas urbanas) é mais eficaz na redução da temperatura ambiente do que os gramados urbanos. Portanto, a colocação adequada de árvores nas proximidades ou ao redor de edificações pode diminuir a necessidade de ar-condicionado em climas quentes, resultando em uma redução no consumo de energia.

Em uma cidade situada na Austrália, caracterizada com verão quentes e secos, frequentemente marcados por ondas de calor, e invernos amenos, úmidos e ventosos, foi conduzido um estudo com o propósito de identificar um arranjo ideal de árvores residenciais. Os resultados obtidos para a região revelaram que dois arranjos de árvores decíduas proporcionam uma economia de 15% no consumo de energia para resfriamento quando localizadas a leste ou oeste das residências, e uma economia de 7% quando posicionadas ao norte. Isso ressalta a influência das características climáticas, geográficas e das espécies arbóreas na redução do consumo energético (ROUHOLLAHI et al., 2022a).

Em um estudo realizado no Brasil, em uma cidade com clima subtropical, empregou-se a metodologia de simulação com o objetivo de avaliar o efeito de resfriamento das árvores em diferentes configurações em um ambiente urbano densamente povoado. Os resultados mostraram que o efeito de resfriamento oriundo da vegetação é mais significativo quando as árvores são plantadas ao longo das ruas, em comparação com cenários sem a presença de vegetação, especialmente durante o mês de fevereiro (DUARTE et al., 2015)

Portanto, é notável que diversos estudos empíricos e de modelagem demonstraram que as árvores de sombra podem proporcionar economias significativas de energia no verão quando estrategicamente localizadas e mantidas próximas de edifícios (AKBARI et al., 1997; SIMPSON, 2002).

Duas revisões sistêmicas (Roy; byrne; pickering, 2012; shao; kim, 2022) examinaram a distribuição geográfica das pesquisas sobre o efeito das árvores no microclima urbano e na integração edificação-árvore. Essas revisões destacaram que a maioria dos estudos (64% dos estudos) foi conduzida na América do Norte, com foco nos Estados Unidos (EUA) e Canadá. Além disso, houve um foco considerável em publicações nas regiões da República Popular da China, EUA, Austrália, Alemanha e Itália. No entanto é notável a carência de pesquisas relacionadas a essa metodologia e investigação em cidades da América do Sul, especialmente no Brasil. Embora existam estudos voltados para cidades de alta densidade, como visto nos estudos de (ABREU; LABAKI, 2010; BAPTISTA, 2014; DUARTE et al., 2015; KRÜGER et al., 2021), há uma necessidade premente de investigar o impacto do sombreamento proporcionado por espécies arbóreas no consumo de energia de condicionamento do ar em cidades de baixa densidade. Essas áreas muitas vezes enfrentam o estresse térmico devido à urbanização inadequada e à falta de planejamento adequado da infraestrutura urbana. Portanto, esta lacuna de pesquisa motiva o objetivo deste estudo, que é quantificar o impacto do sombreamento proporcionado por espécies arbóreas no consumo de energia de condicionamento do ar em cidade de baixa densidade populacional.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos empregados neste estudo envolveram a combinação de coleta de dados empíricos para a posterior inserção em um modelo de

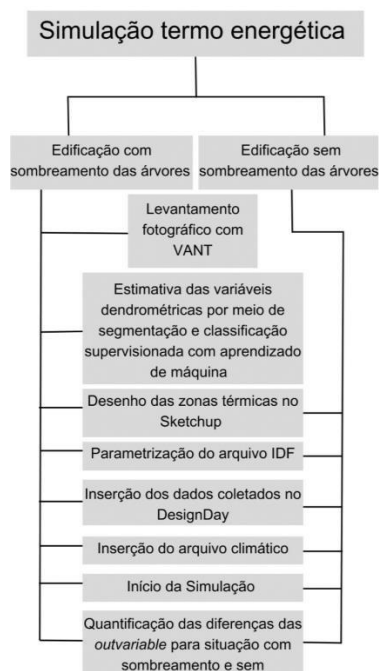
simulação. Portanto, trabalhou-se com dados observados e dados simulados (Output:Variable), conforme ilustrado no passo a passo apresentado na Figura 1. Foram desenvolvidos dois modelos de simulação: um representando a condição real (com sombreamento das árvores) e outro representando uma condição hipotética (sem a presença do sombreamento das árvores). O objetivo era quantificar a diferença entre essas duas condições.

Para a modelagem da condição real, foi necessário obter informações sobre as variáveis dendrométricas das árvores. Para isso, foi realizada uma coleta de dados em campo usando um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) do modelo Dji Phantom 4. Foram capturadas 48 imagens que representam as copas das árvores. Essas imagens foram processadas para extrair a altura das árvores, por meio da criação de um Modelo Digital do Terreno (MDT) e de um Modelo Digital de Superfície (MDS). Para as demais variáveis, foi utilizada técnicas de Machine Learning (Aprendizado de Máquina). Inicialmente foi utilizado os softwares *Label me* para criar polígonos representativos das árvores e, em seguida, foi utilizada a linguagem de programação Python para segmentar e realizar a classificação supervisionada com o algoritmo *Random Florest*. As métricas resultantes foram obtidas na linguagem R, através do pacote *Pliman*, especializado em análise de imagens, principalmente de plantas.

As zonas térmicas foram criadas no Sketchup, conforme mostrado na Figura 2, tanto para condição real quanto para a condição hipotética. A sala a ser simulada foi identificada com um ponto vermelho. Em seguida, o modelo foi parametrizado com os dados coletados em campo, incluindo informações sobre a temperatura de bulbo seco e bulbo úmido para os dias típicos 27 de fevereiro de 2023, 01 de março de 2023 e 03 de março de 2023. O arquivo IDF correspondente a esses parâmetros está no material complementar. Além disso, foi selecionado o arquivo climático adequado, que corresponde a uma distância de 50 km da região de estudo, conforme indicado nas informações adicionais dos arquivos climáticos fornecidos pelo Energy Plus. A variável de saída solicitadas para a simulação incluíram:

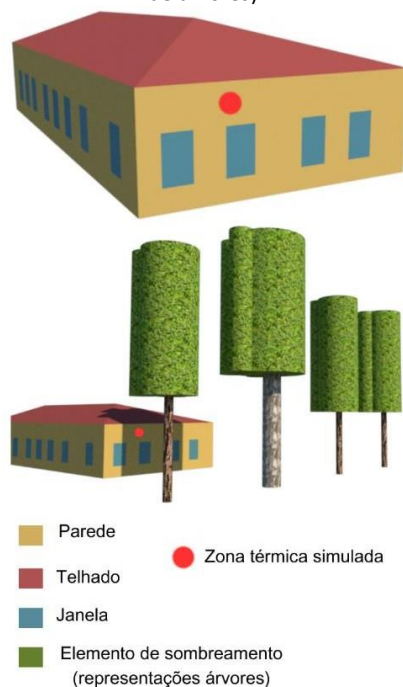
- Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Rate: Taxa de resfriamento total (sensível e latente) removida da zona;

Figura 1 - Esquema metodológico para a simulação termo energética da situação real e hipotética



Fonte: Autor ,2023

Figura 2 - Zonas térmicas do edifício construídas para situações hipotéticas e reais (com sombreamento de árvores)



Fonte: Autor ,2023

A quantificação das diferenças entre as condições foi realizada por meio de programação na linguagem R, e o script correspondente pode ser encontrado no material

2.1 Área de estudo

A edificação em análise está localizada na cidade de Campo Belo na região sul do estado de Minas Gerais, no sudeste do Brasil. Suas coordenadas geográficas são 20°53'32.3" S de latitude e 45°16'17.0" W de longitude. Campo Belo abriga uma população estimada em 54.338 habitantes (IBGE,2020), e tem uma densidade demográfica de 97,56 hab./km². A escolha desta região se deve à sua pertinência como representante da realidade observada em aproximadamente 90% dos municípios de Minas Gerais. Além disso, essa região do sudeste do Brasil enfrenta uma tendência de aumento de temperatura, estimada entre 3 °C e 3,5 °C, o que a torna especialmente relevante para estudos sobre adaptação e mitigação das mudanças climáticas. Cidades de baixa densidade populacional, como Campo Belo, estão se tornando cada vez mais vulneráveis às variações nas condições microclimáticas devido à falta de medidas adequadas de adaptação e mitigação. Isso reflete a realidade de 2 a 90 % dos municípios do Estado de Minas Gerais com população de até 50 mil habitantes. Quanto ao clima, a região de Campo Belo é classificada como subtropical úmido, com altitude de 945 m acima do nível do mar. A precipitação média anual atinge 1.250 mm, enquanto a temperatura média anual se situa em torno de 23,5 °C. A vegetação predominante na área combina elementos do Cerrado e da Mata Atlântica (SANTOS; BELO; ALBERICO, 2015), o que a torna ainda mais interessante para estudos relacionados ao impacto da vegetação na regulação do microclima urbano. As árvores que estão expostas a edificação estão descritas no quadro 1.

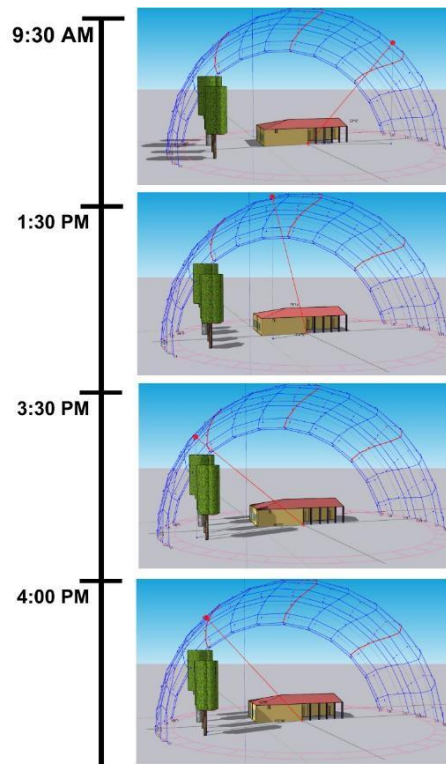
Quadro 1 - Espécies de árvores no local arborizado

| Tree species | <i>Caesalpinia leiostachya</i> | <i>Licania tomentosa</i> | <i>Ficus benjamina</i> L | <i>Archontophoenix alexandrae</i> |
|---------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Áreas urbanas | Cônego Ulisses Praça | Cônego Ulisses Praça | Cônego Ulisses Praça | Cônego Ulisses Praça |

Fonte: Plantnet e Embrapa ,2003;2004

A caracterização das espécies arbóreas foi realizada utilizando a ferramenta Plantnet (<https://identify.plantnet.org/pt-br>), bem como com base na coleção de livros da Embrapa (2003, 2014) denominada “Espécies arbóreas brasileiras” que abrange os volumes 1 e 5. Essa abordagem permitiu uma identificação precisa das espécies estudadas. Quanto ao diagrama solar do local estudado, os resultados foram representados nas Figura 3. Nota-se que durante o período da manhã, a sombra projetada segue uma direção oposta à edificação. No entanto, à tarde, a sombra se desloca na direção da edificação. Essa variação ao longo do dia é fundamental para compreender o comportamento da sombra em relação à edificação e suas implicações no microclima local.

Figura 3 - Diagrama solar para um dia típico de manhã e à tarde para a cidade de Campo Belo, Minas Gerais, no edifício em estudo.



Fonte: Author ,2023

2.3 Coleta de dados empíricos

A coleta de dados foi conduzida tanto no interior da sala da edificação quanto no ambiente exterior, conforme ilustrado na Figura 4. As medições ocorreram no intervalo das 09:30 às 16:00 horas, com uma pausa durante o horário de almoço, quando não havia ocupação na sala e, não foram realizadas medições nesse período. Para efetuar as medições, foi utilizado um medidor de stress térmico do modelo TGD-400, cujas especificações técnicas podem ser consultadas na Tabela 1. Antes de iniciar as medições, foi necessário aguardar um período de estabilização do equipamento, o qual demandou 25 minutos. A altura do equipamento foi a 1,30 m (altura de um tórax). A taxa de amostragem foi de 1 minuto. O método de combinação de simulação e coleta de dados empíricos é baseado nos métodos de Wang et al. (2016) , Hes et al. (2011) e Simá et al. (2015). Os principais dados de interesse para inserção no software Energy Plus incluíram as medições da temperatura de bulbo seco e bulbo úmido.

Figura 4 - Localização do equipamento de medição nas áreas externa e interna



Source: Author ,2023.

Tabela 1 - Descrição dos parâmetros do dispositivo de medição de estresse térmico TGD 400

| Medidor de estresse térmico TGD -400 | | | | |
|--------------------------------------|---|--------------|------------------|---------------------|
| Especificações técnicas | Tela: Tela dupla de cristal líquido (LCD) com 3 ½ dígitos | Anemômetro | Ponto de orvalho | Umidade operacional |
| Escala | -10~150°C | 0 - 20m/s | 5º a 60°C | 0 a 85% UR |
| Resolução | 0,1°C | 0.1m/s | ----- | ----- |
| Precisão | ± 0,5°C | ±4% + 0.1m/s | ----- | ----- |

Fonte: Instrutherm ,2020

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões foram organizados em três seções distintas. Na primeira seção, são apresentados os resultados do levantamento fotográfico das espécies arbóreas sobre a edificação, realizado com o uso de um VANT. A segunda seção aborda a estimativa das variáveis dendrométricas, as quais são posteriormente inseridas como zonas de sombreamento no modelo de simulação. Por fim, na terceira seção, são apresentados os resultados obtidos com a variável de saída solicitada ao Energy Plus.

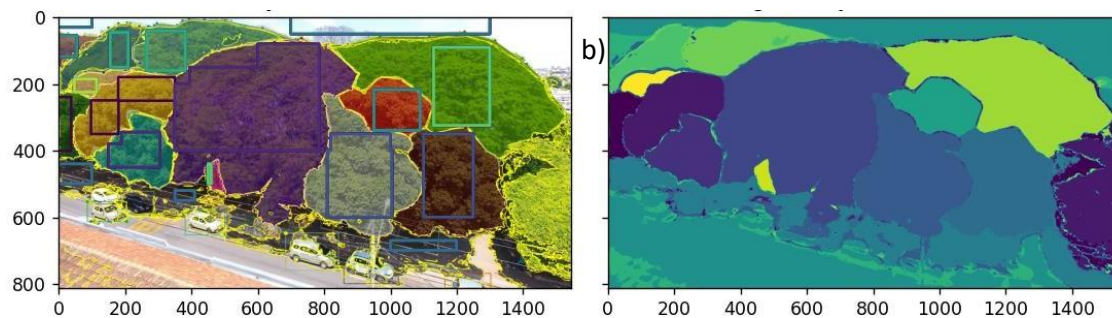
3.1 Levantamento Fotográfico com VANT

O levantamento foi conduzido no mês de novembro de 2022, resultando em um total de 48 imagens, as quais estão disponíveis para consulta no material complementar. Essas imagens foram processadas utilizando a plataforma Web ODM, a fim de gerar o Modelo digital do terreno (MDT) e o Modelo digital da superfície (MDS). Posteriormente, foi realizando uma operação de diferença entre esses modelos, resultando na criação do Modelo digital de elevação (MDE). Os resultados obtidos do MDE revelam uma variação na faixa de -5,08 a 20,69. Esses valores estão relacionados com a elevação do dossel das árvores, representado, portanto, a altura do aglomerado de árvores em estudo.

3.2 Estimativa das variáveis dendrométricas

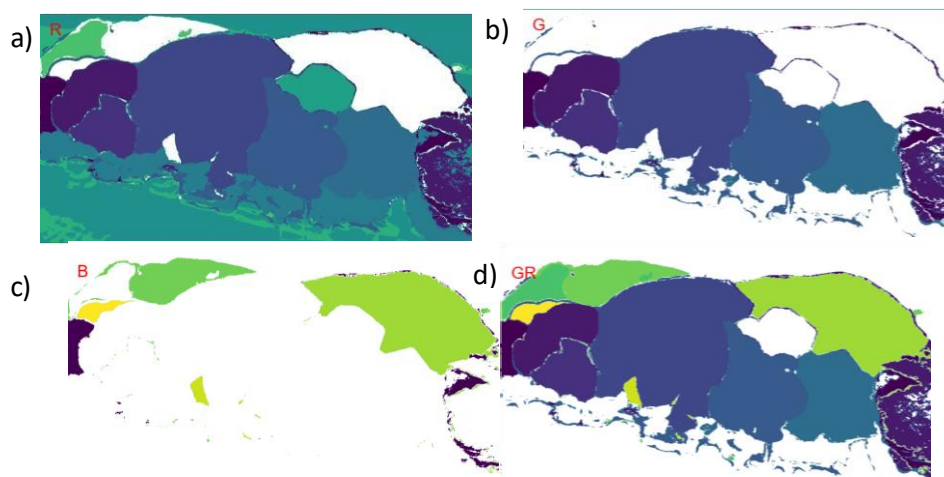
As informações relativas à copa das árvores foram obtidas conforme indicado na Tabela 2. Inicialmente, essas informações foram obtidas por meio da análise das imagens anotadas, conforme mostrado na Figura 5, seguida pela identificação das bandas RGB. Notavelmente, a combinação das bandas GR, R e G (Figura 6) demonstrou uma segmentação mais de acordo com a imagem original. Portanto, foram utilizadas essas bandas para a extração das informações relacionadas às copas das árvores.

Figura 5 a) Imagens com anotação de banda realizada no Labelme e Python para anotar as bandas b) Imagem com segmentação usando classificação supervisionada com o algoritmo RandomForest



Fonte: Author, 2023

Figura 6 a) Segmentação usando R-band RGB b) Segmentação usando G-band RGB c) Segmentação usando B-band RGB d) Segmentação usando GR-band RGB



Fonte: Author, 2023

O desenvolvimento das métricas fez uso do pacote Pliman na linguagem R para determinar as características das copas. Isso resultou na identificação das bandas da imagem que estimaram as variáveis de interesse da copa, com base no índice GR (Figura 7).

Tabela 2 - Métricas para a copa das árvores

| ID/Métricas | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 | 9 | 10 | 12 | 13 | 15 | 16 | 17 | 19 | 30 | 33 |
|-------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| area | 23,53 | 11,76 | 11,43 | 4,37 | 3,27 | 2,11 | 1,48 | 1,71 | 0,76 | 0,89 | 1,47 | 0,94 | 0,68 | 0,26 | 0,28 |
| diam_mean | 5,51 | 3,91 | 3,85 | 2,35 | 2,29 | 1,64 | 1,39 | 1,53 | 1,01 | 1,07 | 1,51 | 1,09 | 0,95 | 0,58 | 0,62 |

Fonte: Author ,2023

Figura 7 - Identificação das bandas de imagem para estimar as variáveis de interesse do dossel usando o índice GR



Fonte: Author ,2023

Esses valores foram validados em campo medindo a sombra na superfície do piso.

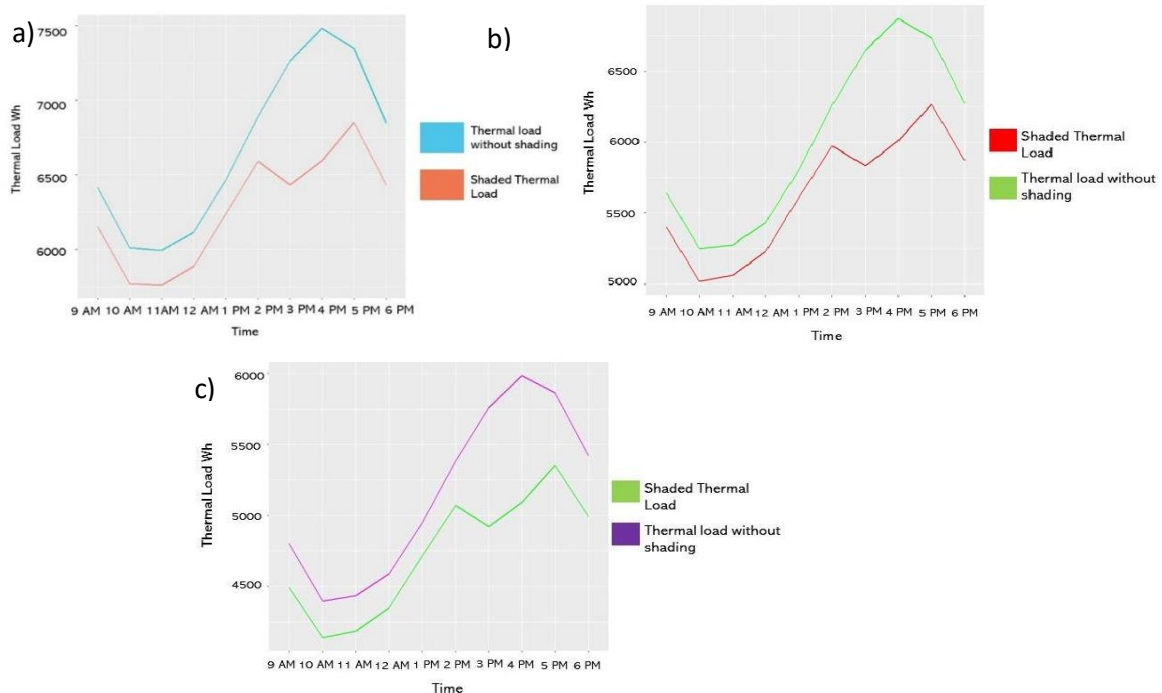
3.3. Simulação termo energética

3.3.1 Cargas total ideais de resfriamento da zona

A carga de resfriamento foi calculada através do balanço térmico, utilizando o algoritmo Conduction Transfer Function (CTF) para os dias em que os dados foram coletados, considerando-os como dias de referência. Assim, os dois modelos, tanto a condição real quanto a hipotética, apresentaram diferenças ao longo de três dias. Essas diferenças foram evidentes durante todo o período de ocupação da edificação, com o pico de carga térmica ocorrendo às 16:00 horas na condição hipotética (sem sombreamento das árvores) e às 17:00 horas na condição real, que inclui o sombreamento das árvores. Essa discrepância pode ser explicada pelo fato de que, às 16:00 horas, o sol está incidindo diretamente na superfície da parede oeste e nas janelas, aumentando a transferência de calor por condutividade térmica através dos materiais, bem como por radiação solar. Por outro lado, na presença de sombreamento durante o horário de maior incidência solar, a transferência de calor é reduzida, resultando em um pico de carga térmica às 17:00 horas. Esse fenômeno pode ser atribuído ao atraso térmico, sendo que o sombreamento atua como uma maneira de alterar esse atraso térmico dos materiais. Nesse contexto, o sombreamento se mostra benéfico, uma vez que às 17:00 horas, horário mais próximo do fim da ocupação da edificação, a carga térmica é reduzida.

Os resultados revelam uma interação vantajosa entre o horário de maior exposição à radiação solar e a presença de sombreamento, o que contribui para a redução do consumo de energia. Em outras palavras, o sombreamento é uma estratégia eficaz para aumentar a eficiência energética da edificação, especialmente na redução do consumo de energia associado a sistemas de condicionamento de ar. Portanto, essa interação satisfatória entre a exposição à radiação solar e o sombreamento resulta em uma notável inércia térmica na edificação.

Figura 8- a) Carga térmica com a presença de sombreamento e sem sombreamento sobre a sala de estudo para 27 de fevereiro de 2023 b) Carga térmica com a presença de sombreamento e sem sombreamento sobre a sala de estudo para 1º de março de 2023 c) Carga térmica com a presença de sombreamento e sem sombreamento sobre a sala de estudo para 3 de março de 2023



Fonte: Author ,2023

Nas Figuras 8 (a),(b) e (c), são apresentadas as diferenças entre a condição hipotética e a real. A maior redução da carga térmica ocorreu às 16:00 horas, correspondendo a 11,87% , 14 ,92% e 12,55% para os respectivos dias de medições. As reduções nos demais horários estão detalhadas na Tabela 3. Essa redução está relacionada à idade das árvores que proporcionam sombreamento, uma vez que árvores mais antigas tendem a possuir copas maiores. Caso as árvores fossem mais jovens, o sombreamento poderia não atingir a superfície da parede (SIMPSON; MCPHERSON, 1996).

A redução da carga térmica também foi observada em outros trabalhos, como os de (AKBARI et al., 1997; CHAGOLLA et al., 2012; HUANG et al., 1987a; ROUHOLLAHI et al., 2022b; SIMÁ et al., 2015b; SIMPSON, 2002; SIMPSON; MCPHERSON, 1996) . Nesses estudos, a redução está atrelada ao consumo anual de energia nos edifícios, obtido por meio da simulação e medição in loco. Portanto, já era esperado que a sombra das árvores diminuísse o consumo de energia ao reduzir a exposição à radiação solar. Além disso, alguns desses estudos destacaram o efeito também da evapotranspiração que é satisfatório para reduzir a carga térmica. É

importante ressaltar que a redução de carga térmica, através do sombreamento, é mais notável em casa antigas, devido à menor integridade térmica, conforme nossa condição de estudo (HUANG et al., 1987a). O nosso estudo demonstrou que o sombreamento começa a afetar a fachada a partir das 15:00 horas, com a redução da carga térmica ocorrendo nesse período. Porém, para a condição real, também observamos uma redução no período da manhã. Esse padrão é consistente com o estudo de Donovan e Butry (2009), que mostrou que a sombra no final da tarde, na fachada oeste de uma propriedade no verão, reduz o consumo de energia mais do que a sombra pela manhã ou no início da tarde.

Tabela 3 - Carga térmica para a condição hipotética, a condição real e a diferença entre as duas

| data | hora | Carga térmica Wh (condição hipotética) | Carga térmica Wh (condição real) | Diferença Carga térmica (%) |
|------------|----------|--|----------------------------------|-----------------------------|
| 27/02/2023 | 9 horas | 6154,44 | 6417,56 | 4,1 |
| 27/02/2023 | 10 horas | 5771,53 | 6011,93 | 4,0 |
| 27/02/2023 | 11 horas | 5761,96 | 5995,32 | 3,89 |
| 27/02/2023 | 12 horas | 5888,14 | 6117,23 | 3,74 |
| 27/02/2023 | 13 horas | 6237,1 | 6463,02 | 3,5 |
| 27/02/2023 | 14 horas | 6592,7 | 6890,79 | 4,33 |
| 27/02/2023 | 15 horas | 6432,94 | 7263,17 | 11,43 |
| 27/02/2023 | 16 horas | 6593,96 | 7482,2 | 11,87 |
| 27/02/2023 | 17 horas | 6851,91 | 7347,67 | 6,75 |
| 27/02/2023 | 18 horas | 6428,33 | 6844,81 | 6,08 |
| 01/03/2023 | 9 horas | 4800,88 | 4493,84 | 6,4 |
| 01/03/2023 | 10 horas | 4394,62 | 4137,38 | 5,85 |
| 01/03/2023 | 11 horas | 4433,01 | 4184,36 | 5,61 |
| 01/03/2023 | 12 horas | 4586,28 | 4347,32 | 5,21 |
| 01/03/2023 | 13 horas | 4946,36 | 4712,02 | 4,74 |
| 01/03/2023 | 14 horas | 5382,7 | 5071,08 | 5,79 |
| 01/03/2023 | 15 horas | 5760,22 | 4919,74 | 14,59 |
| 01/03/2023 | 16 horas | 5985,15 | 5092,31 | 14,92 |
| 01/03/2023 | 17 horas | 5864,95 | 5352,79 | 8,73 |
| 01/03/2023 | 18 horas | 5418,02 | 4990,99 | 7,88 |
| 03/03/2023 | 9 horas | 5642,55 | 5403,48 | 4,24 |
| 03/03/2023 | 10 horas | 5247,51 | 5014,61 | 4,44 |
| 03/03/2023 | 11 horas | 5275,08 | 5060,06 | 4,08 |
| 03/03/2023 | 12 horas | 5432,06 | 5229,54 | 3,73 |
| 03/03/2023 | 13 horas | 5806,83 | 5611,86 | 3,36 |
| 03/03/2023 | 14 horas | 6260,17 | 5973,8 | 4,57 |
| 03/03/2023 | 15 horas | 6649,63 | 5834,28 | 12,26 |
| 03/03/2023 | 16 horas | 6874,08 | 6011,28 | 12,55 |
| 03/03/2023 | 17 horas | 6735,03 | 6267,52 | 6,94 |
| 03/03/2023 | 18 horas | 6274,76 | 5872,17 | 6,42 |

Fonte: Author ,2023

É visto que o sombreamento proporcionado pelas árvores não apenas reduz o ganho solar direto que atinge a envolvente do edifício, mas também tem o efeito de reduzir a luz difusa refletida do céu e das superfícies circundantes (HUANG et al., 1987b).

3.3.2 Economia no consumo de energia

A redução da carga térmica impacta de forma significativa na economia de energia, especialmente no consumo de ar-condicionado, como já é bem sabido. Considerando um sistema de ar-condicionado comercial com coeficiente de desempenho de 2,60 (INMETRO, 2021), podemos avaliar a redução no consumo diário conforme demonstrado na Tabela 4. Em termos de custo, a economia é de 1,57 R\$, 1,59 R\$ e 1,46 R\$ para os respectivos dias analisados. Isso significa que, se durante os meses, o comportamento for similar, a economia acumulada seria de 46,20 R\$, 47,70 R\$ e 43,60 R\$ no consumo total de energia.

Comparando o nosso estudo com o trabalho de Rouhollahi et al.(2022c), observa-se que, assim como no estudo, o autor, em um local localização também no hemisfério sul, destaca a influência positiva do plantio de árvores na fachada oeste. Isso resulta na redução da exposição à radiação de ondas curtas durante as tardes de verão, o que, por sua vez, resfria a superfície da fachada criando um efeito de resfriamento evaporativo. Portanto, em comparação com uma situação sem árvores, o plantio de árvores a oeste demonstra um maior efeito na eficiência energética, controlando a transferência de calor diurna e a retenção de calor durante a noite.

Tabela 4 - Consumo de energia para um ar-condicionado com COP 2,60 para as condições hipotéticas, reais e de diferença.

| data | hora | Sem sombreamento | Sombreado | Diferença |
|------------|----------|------------------|-----------|-----------|
| 27/02/2023 | 9 horas | 1719,2 | 1643,0 | 76,2 |
| 27/02/2023 | 10 horas | 1601,5 | 1541,0 | 60,5 |
| 27/02/2023 | 11 horas | 1612,1 | 1554,2 | 57,9 |
| 27/02/2023 | 12 horas | 1655,9 | 1600,0 | 55,9 |
| 27/02/2023 | 13 horas | 1755,7 | 1700,0 | 55,7 |
| 27/02/2023 | 14 horas | 1883,2 | 1801,7 | 81,4 |
| 27/02/2023 | 15 horas | 2001,8 | 1779,4 | 222,4 |
| 27/02/2023 | 16 horas | 2118,2 | 1835,5 | 282,8 |
| 27/02/2023 | 17 horas | 2152,7 | 1998,5 | 154,1 |
| 27/02/2023 | 18 horas | 1662,6 | 1519,6 | 143,0 |
| 01/03/2023 | 9 horas | 1846,49 | 1728,4 | 118,09 |
| 01/03/2023 | 10 horas | 1690,24 | 1591,3 | 98,94 |
| 01/03/2023 | 11 horas | 1705 | 1609,37 | 95,63 |
| 01/03/2023 | 12 horas | 1763,95 | 1672,05 | 91,91 |
| 01/03/2023 | 13 horas | 1902,45 | 1812,32 | 90,13 |
| 01/03/2023 | 14 horas | 2070,27 | 1950,42 | 119,85 |

| data | hora | Sem sombreamento | Sombreado | Diferença |
|------------|----------|------------------|-----------|-----------|
| 01/03/2023 | 15 horas | 2215,47 | 1892,21 | 323,26 |
| 01/03/2023 | 16 horas | 2301,98 | 1958,58 | 343,4 |
| 01/03/2023 | 17 horas | 2255,75 | 2058,77 | 196,98 |
| 01/03/2023 | 18 horas | 2083,85 | 1919,61 | 164,24 |
| 03/03/2023 | 9 horas | 2170,21 | 2078,26 | 91,95 |
| 03/03/2023 | 10 horas | 2018,27 | 1928,7 | 89,58 |
| 03/03/2023 | 11 horas | 2028,88 | 1946,18 | 82,7 |
| 03/03/2023 | 12 horas | 2089,25 | 2011,36 | 77,89 |
| 03/03/2023 | 13 horas | 2233,4 | 2158,41 | 74,99 |
| 03/03/2023 | 14 horas | 2407,76 | 2297,62 | 110,14 |
| 03/03/2023 | 15 horas | 2557,55 | 2243,95 | 313,6 |
| 03/03/2023 | 16 horas | 2643,88 | 2312,03 | 331,85 |
| 03/03/2023 | 17 horas | 2590,4 | 2410,58 | 179,81 |
| 03/03/2023 | 18 horas | 2413,37 | 2258,53 | 154,84 |

Fonte: Author, 2023

Outro estudo relevante para comparação é o de Hsieh et al. (2018), no qual realizaram simulações no Energy Plus considerando sombreamento arbóreo em distâncias de 6 e 3 metros da edificação. Nesse estudo, observou-se uma redução na carga de resfriamento de 15,2% com a aproximação de 3 metros da edificação e de 12,4% e 10,3% com distâncias de 6 metros, sendo este último o cenário atual. Em nosso estudo, as reduções para os três dias foram entre 8,0% e 6,3%. No entanto, há algumas diferenças notáveis. Primeiramente, as árvores em nosso estudo estão localizadas a uma distância maior, cerca de 14 metros da edificação. Além disso, as características das árvores, como a altura da copa, densidade da copa e altura da árvore, são diferentes. O formato das árvores também desempenha um papel importante, visto que está relacionado com a projeção da sombra. Árvores com copas menos densas tendem a proporcionar menor sombreamento. Além disso, as características do próprio edifício também influenciam, como o número de andares e a condutividade térmica dos materiais. Portanto, a diferença nas reduções diárias pode ser explicada por essas variações. Outro estudo realizado por Calcerano e Martinelli (2016), que também utilizou simulação no Energy Plus, demonstrou um potencial de redução de consumo de energia de 10,7% ao inserir uma árvore na fachada oeste. Nesse caso, as características da árvore incluíam uma altura de 8 m e um diâmetro de copa de 6 m para uma edificação térrea. Novamente, a semelhança entre este estudo e o nosso reside no diâmetro da copa das árvores, o que resulta em valores de redução de energia próximos. Porém, a distância em relação à edificação é distinta, uma vez que os autores consideraram uma distância de 3 metros em seu estudo. É importante destacar que a localização geográfica também desempenha um papel importante, visto que a cidade dos autores está no hemisfério norte, o que afeta a direção da incidência de radiação solar. No hemisfério sul, como no nosso estudo, a fachada oeste tende a apresentar uma maior redução durante o período da tarde, devido à exposição mais intensa ao sol.

4. LIMITAÇÃO DO ESTUDO

O estudo teve como objetivo quantificar o impacto do sombreamento arbóreo nas edificações, mas é importante ressaltar que, embora foi possível realizar a simulação, ainda assim, pode haver algumas discrepâncias em relação à situação real. Isso ocorre porque a simulação não leva em consideração o efeito biofísico da evapotranspiração das árvores, nem abrange a dinâmica térmica completa de uma cidade, incluindo seus arredores. Além disso, a geometria das árvores foi simplificada, não se considerando detalhes como a forma das folhas e galhos, o que significa que a representação das árvores na simulação não corresponde com precisão à realidade. No entanto, os resultados obtidos foram satisfatórios ao demonstrar o impacto positivo do sombreamento na redução da carga térmica nas edificações. Para aprimorar a representação das árvores, buscou-se aproximar sua geometria com base em imagem obtidas pelo VAP no local de estudo. É importante enfatizar que o objetivo deste trabalho foi explorar o efeito do sombreamento na superfície das paredes expostas, e não realizar uma caracterização completa do ambiente urbano ou uma representação precisa das árvores reais.

5. CONCLUSÃO

A pesquisa revelou que o sombreamento proporcionado por árvores é uma estratégia eficaz na redução do consumo de energia em edificações, resultando em uma economia significativa de 20,52% quando considerados os dois dias típicos de verão. Essa economia indica que, caso essa tendência persista ao longo de todo o mês, o custo de energia pode ser reduzido em aproximadamente R\$ 47,70 para as edificações estudadas, com uma economia total de R\$ 43,60 no custo de energia.

Esses resultados destacam a importância da implementação de uma infraestrutura urbana verde, com foco especial em edificações de menor integridade térmica, como casas antigas, como uma medida fundamental para melhorar a eficiência energética. É relevante observar que o estudo não quantificou o efeito da evapotranspiração das árvores, o que representa uma limitação em nossa compreensão da dinâmica térmica completa. No entanto, o principal objetivo da pesquisa era quantificar o impacto do sombreamento, e nesse aspecto, os resultados foram satisfatórios.

Os achados da pesquisa demonstram claramente que a introdução de árvores sobre edifícios antigos desempenha um papel crucial na melhoria das condições térmicas e na redução do consumo de ar-condicionado durante os meses de verão. Isso não apenas contribui para a economia de energia, mas também promove um ambiente urbano mais sustentável e confortável. Portanto, a incorporação de áreas verdes nas estratégias de planejamento urbano deve ser encorajada como uma medida efetiva para enfrentar os desafios da eficiência energética nas edificações. Este estudo oferece uma base sólida para futuras pesquisas e práticas de design urbano voltadas para a promoção da sustentabilidade energética e do conforto térmico.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L. V.; LABAKI, L. C. Conforto térmico propiciado por algumas espécies arbóreas: avaliação do raio de influência através de diferentes índices de conforto. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p. 103–117, 2010.
- AKBARI, H. et al. **Peak power and cooling energy savings of shade trees** *Energy and Buildings*. v.25, p.139-148 1997.
- BAPTISTA, M. D. **University of São Paulo “Luiz de Queiroz” College of Agriculture Use of different street trees species and their effect on human thermal comfort Piracicaba**. Dissertação (Mestrado em Ciência). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.
- COSTA, Maria Helena Couto Costa. **Urbanismo sustentável em Áreas de Proteção Ambiental**. O caso da drenagem urbana no Setor de Mansões Park Way, em Brasília – DF, 2008. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, 2008.
- CALCERANO, F.; MARTINELLI, L. Numerical optimisation through dynamic simulation of the position of trees around a stand-alone building to reduce cooling energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 112, p. 234–243, 15 jan. 2016.
- CHAGOLLA, M. A. et al. Effect of tree shading on the thermal load of a house in a warm climate zone in Mexico. **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)**, v. 7, n. PARTS A, B, C, D, p. 761–768, 2012.
- DONOVAN, G. H.; BUTRY, D. T. The value of shade: Estimating the effect of urban trees on summertime electricity use. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 6, p. 662–668, jun. 2009.
- DUARTE, D. H. S. et al. The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. **Urban Climate**, v. 14, p. 224–239, 1 dez. 2015.
- EMBRAPA. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. [s.l.: s.n.]. v. 1
- EMBRAPA. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. [s.l.: s.n.]. v. 5
- HSIEH, C. M. et al. Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. **Energy and Buildings**, v. 159, p. 382–397, 15 jan. 2018.
- HUANG, Y. J. et al. The Potential of Vegetation in Reducing Summer Cooling Loads in Residential Buildings. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 26, n. 9, p. 1103–1116, set. 1987a.
- HUANG, Y. J. et al. The Potential of Vegetation in Reducing Summer Cooling Loads in Residential Buildings. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 26, n. 9, p. 1103–1116, set. 1987b.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama**. Cidades: Campo Belo, MG, 2021. Disponível em: . Acesso em: 26 nov. 2021.
- _____. **Cidades e estados**. Campo Belo, MG, 2021. Disponível em: . Acesso em: 26 nov. 2021.
- INMETRO. Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas. p. 139, 2021. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002707.pdf>.
- KRÜGER, E. L. et al. Calibrating UTCI’S comfort assessment scale for three Brazilian cities with different climatic conditions. **International Journal of Biometeorology**, v. 65, n. 9, p. 1463–1472, 2021.
- OGUEKE, N. V. et al. Energy-saving potentials of some local trees. **Energy Efficiency**, v. 10, n. 1, p. 171–181, 2017. PLANTNET. **Identifique, explore e compartilhe suas observações de plantas silvestres**.
- ROUHOLLAHI, M. et al. Potential residential tree arrangement to optimise dwelling energy efficiency. **Energy and Buildings**, v. 261, 15 abr. 2022a.
- ROUHOLLAHI, M. et al. Potential residential tree arrangement to optimise dwelling energy efficiency. **Energy and Buildings**, v. 261, 15 abr. 2022b.

ROUHOLLAHI, M. et al. Potential residential tree arrangement to optimise dwelling energy efficiency. **Energy and Buildings**, v. 261, 15 abr. 2022c.

ROY, S.; BYRNE, J.; PICKERING, C. **A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. Urban Forestry and Urban Greening**, 2012.

SHAO, H.; KIM, G. A Comprehensive Review of Different Types of Green Infrastructure to Mitigate Urban Heat Islands: Progress, Functions, and Benefits. **Land**, v. 11, n. 10, 1 out. 2022.

SIMÁ, E. et al. Tree and neighboring buildings shading effects on the thermal performance of a house in a warm sub-humid climate. **Building Simulation**, v. 8, n. 6, p. 711–723, 13 dez. 2015a.

SIMÁ, E. et al. Tree and neighboring buildings shading effects on the thermal performance of a house in a warm sub-humid climate. **Building Simulation**, v. 8, n. 6, p. 711–723, 13 dez. 2015b.

SIMPSON, J. R. Improved estimates of tree-shade effects on residential energy use. **Energy and Buildings**, 2002.

SIMPSON, J. R.; MCPHERSON, E. G. POTENTIAL OF TREE SHADE FOR REDUCING RESIDENTIAL ENERGY USE IN CALIFORNIA. **Journal of Arboriculture**, v.22,p.10-17, 1996.

WANG, Z. H. et al. Cooling and energy saving potentials of shade trees and urban lawns in a desert city. **Applied Energy**, v. 161, p. 437–444, 2016.