

## Aspersores de água implantados em edificação com pátio: estratégia complementar de arrefecimento térmico para clima tropical

## Water sprinklers installed in courtyard buildings: a complementary thermal cooling strategy for tropical climates

*Gabriela Kehrwald Nunes(1); Ivan Julio Apolonio Callejas(2); Luciane Cleonice Durante(3)*

1 Discente do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Mato (UFMT), Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

E-mail: gabriela.kehrwald@outlook.com | ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4168-3058>

2 Doutor em Física Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental e Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Mato (UFMT), Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

E-mail: ivan.callejas@ufmt.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7877-7029>

3 Doutora em Física Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental e Professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Mato (UFMT), Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

E-mail: luciane.durante@ufmt.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4998-4587>

**Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, vol. 14, n. 1, p. 145-164, janeiro-junho, 2025 - ISSN 2318-1109

DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2025.v14i1.5149>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

## Resumo

Sistemas de aspersores de água são uma estratégia de resfriamento evaporativo com potencial de interferir no microclima dos ambientes onde são instalados. O objetivo deste artigo é avaliar o impacto da implantação de aspersores de água no microclimático de pátios localizados em região de clima tropical. A metodologia se baseia em simulações computacionais no software ENVI-met, com a modelagem do pátio com e sem aspersores, a fim de identificar sua influência sobre o microclima e nos espaços circundantes (corredores e salas adjacentes ao pátio). A análise considerou a espacialização dos dados, por meio de mapas cromáticos das diferenças nas variáveis ambientais - temperatura do ar ( $T_a$ ), umidade relativa (UR), temperatura radiante média ( $T_{rm}$ ), velocidade do ar ( $V_a$ ) e conforto térmico, expresso pelo índice de Temperatura Equivalente Fisiológica (PET), considerando os horários de 6, 14 e 20h. Os resultados evidenciaram a ocorrência de alteração da sensação térmica, com o índice PET se reduzindo em até  $-1,0^{\circ}\text{C}$  no pátio central, em até  $-0,5^{\circ}\text{C}$  nos corredores e em até  $-0,2^{\circ}\text{C}$  nas salas adjacentes. Os benefícios dos aspersores de água não se limitam ao pátio onde estão instalados, com efeitos se distribuindo espacialmente a depender do fluxo de ventilação que se estabelece no edifício, impactando nos ambientes contíguos, embora nestes, quantitativamente, de forma mais reduzida. O uso de estratégias integradas se configura como um meio alternativo para reduzir os elevados níveis de estresse em edificações com pátio em clima tropical.

**Palavras-chave:** Conforto térmico; Resfriamento Evaporativo; Envi-Met; Temperatura Equivalente Fisiológica.

## Abstract

Water sprinkler systems are an evaporative cooling strategy with the potential to influence the microclimate of the environments where they are installed. The article's objective is to assess the impact of implementing water sprinklers on the microclimate of courtyards located in a tropical climate region. The methodology is based on computational simulations using the ENVI-met software, modeling the courtyard with and without sprinklers to identify their influence on the microclimate and surrounding spaces (corridors and rooms adjacent to the courtyard). The analysis considered the spatialization of data through chromatic maps showing differences in environmental variables—air temperature ( $T_a$ ), relative humidity (RH), mean radiant temperature (MRT), air velocity ( $A_v$ ), and thermal comfort, expressed by the Physiological Equivalent Temperature (PET) index, considering the times of 6 AM, 2 PM, and 8 PM. The results showed a change in thermal sensation, with the PET index decreasing by up to  $-1.0^{\circ}\text{C}$  in the central courtyard, up to  $-0.5^{\circ}\text{C}$  in the corridors, and up to  $-0.2^{\circ}\text{C}$  in adjacent rooms. The benefits of water sprinklers are not limited to the courtyard where they are installed, as their effects are spatially distributed depending on the ventilation flow established within the building, impacting contiguous environments, although quantitatively to a lesser extent. The use of integrated strategies serves as an alternative means to reduce high stress levels in courtyard buildings in tropical climates.

**Keywords:** Thermal comfort; Evaporative cooling; Envi-Met; Physiological equivalent temperature.

## 1 Introdução

De acordo com o relatório intitulado Perspectivas de Urbanização Global das Nações Unidas (United Nations, 2022), quatro bilhões de pessoas vivem em grandes cidades, e espera-se que este número atinja os 9,7 bilhões até 2050, com três quartos da população mundial vivendo em centros urbanos. Assim, evidencia-se um elevado crescimento populacional nas cidades em um curto período de tempo, o que, certamente, pode intensificar os impactos já ambiente urbano, tais como a elevação da poluição do ar e da água, alterações climáticas locais, perda da biodiversidade e aumento das demandas energéticas entre outros (Artaxo, 2020).

Em termos de uso do solo, quando o processo de produção do espaço urbano é inadequadamente planejado, forma-se um ciclo vicioso no qual se tem expansão urbana, ampliando as superfícies impermeáveis, alterando microclimas locais e intensificando ilhas de calor. Diante disso, a busca de estratégias para minimizar esses impactos tem levado profissionais a adotar estratégias bioclimáticas de projeto, em especial as passivas (Djedjig *et al.*, 2015). Nesse contexto, a configuração de pátios tem sido apontada como uma estratégia bioclimática promissora para amenizar o calor em regiões de clima quente (Rivera-Gómez *et al.*; 2019).

Os pátios são espaços que se constituem em uma zona de transição descoberta, cercada pelos cômodos da edificação, com papel no controle da radiação solar incidente, fornecimento de iluminação natural, ventilação e sombreamento (Soflaei *et al.*, 2016; Zamani *et al.*, 2018). São caracterizados como uma estratégia bioclimática passiva, com potencial para proporcionar condições microclimáticas mais amenas e, ainda, mitigar as cargas térmicas dos ambientes circundantes, devido à disposição e proporção de volumes cheios e vazios que criam no ambiente construído (Rivera-Gómez *et al.*, 2019). Nesse sentido, os ambientes dos pátios são afetados por seus atributos morfológicos (proporções entre sua altura e largura), orientação solar, aberturas existentes em seu perímetro, assim como pelas características estéticas (cores, texturas, materiais, outros) e elementos naturais (vegetação, flores, água e outros) (Teshnehdel *et al.*, 2020). Todos estes fatores são considerados elementos-chave para promover modificações no seu microclima (Callejas *et al.*, 2020).

Apesar de sua capacidade de promover arrefecimento passivo, o uso isolado dos pátios não garante conforto térmico durante todas as horas do dia, especialmente em regiões de clima tropical. De fato, o estudo conduzido por Callejas *et al.* (2020), em um pátio localizado em clima tropical, constatou por meio de medições, baixa porcentagem de horas em condições de conforto térmico. Apesar da melhoria das condições microclimáticas do pátio em relação às externas, os autores evidenciam a necessidade de estratégias complementares para ampliar o desempenho térmico desses espaços.

Uma opção é o uso de sistemas de resfriamento evaporativo direto ou indireto. No primeiro, a água é aspergida diretamente no ar ambiente, formando uma névoa

que, ao evaporar, retira calor do ar e reduz sua temperatura, com consequente aumento da umidade relativa. Já o segundo, utiliza superfícies ou trocadores térmicos para resfriar o ar sem que este entre em contato com a água, mantendo a umidade relativa constante e tornando o sistema mais adequado para ambientes internos ou sensíveis à umidade (Masiero *et al.*, 2020). Em regiões tropicais com longos períodos de seca, o resfriamento direto, como, por exemplo, por meio de aspersores, apresenta-se como uma alternativa complementar com potencial de aplicação nos pátios.

Os aspersores de água constituem sistemas de resfriamento por nebulização, cuja eficácia é comprovada em climas quentes e secos, onde o aumento da umidade relativa não compromete o conforto dos usuários (Ulpiani *et al.*, 2019). Do ponto de vista técnico-operacional, os sistemas de aspersão de água consistem em tubulações onde a água pressurizada é bombeada pela tubulação até atingir um dos pontos de saída (bicos), que são responsáveis por converter a água em uma névoa pressurizada com gotículas de água, que evaporam no ar, resultando em uma diminuição da temperatura do ar local (Vanos *et al.*, 2022). A troca de calor entre a água e o ambiente causa a redução da temperatura e a elevação da umidade do ar e, consequentemente, reduz a sensação térmica de calor não só no ambiente onde o sistema está instalado, mas, também, em seus arredores (Silva, 2004). Nesse sentido, estudos têm investigado o comportamento dos aspersores de água na perspectiva da melhora no conforto térmico e, até mesmo, como estratégia para mitigar a intensidade de ilhas de calor urbanas (Huang *et al.*, 2011).

Diante do exposto, esta pesquisa tem o objetivo de avaliar os impactos microclimáticos da instalação de sistemas de aspersão de água em um pátio de edificação implantada em clima tropical. Para isso, foi utilizada simulação computacional no programa ENVI-met, modelando o pátio com e sem presença de aspersores, com vistas a poder captar sua influência tanto no pátio quanto nos recintos circundantes.

## 2 Materiais e métodos

### 2.1 Área de estudo

A pesquisa foi realizada no município de Cuiabá (15°36'36"S; 56°11'04"W), capital do Estado de Mato Grosso, Centro-Oeste do Brasil. A cidade está localizada na área de transição entre o Pantanal e o Cerrado, no sul do estado (Figura 1). A região é caracterizada por um clima Tropical Semiúmido ou Tropical de Savana (Köppen-Geiger Aw), com duas estações distintas: uma estação chuvosa (quente e úmida, de outubro a abril) e uma estação seca (quente e seca, de maio a setembro). As temperaturas média anual, mínima e máxima são 27,9°C, 23°C e 30°C, respectivamente

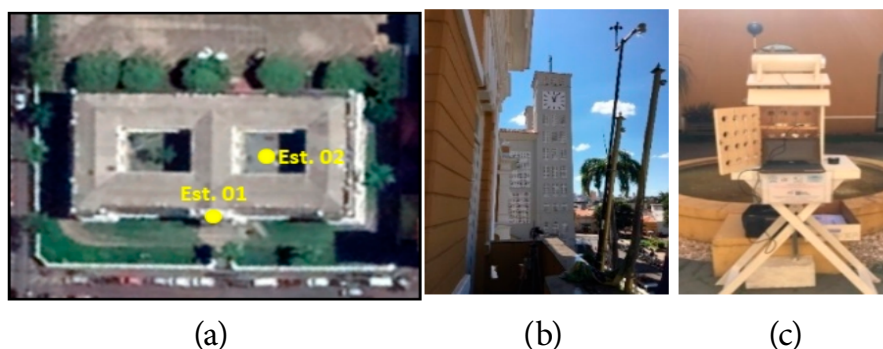
(Callejas *et al.*, 2019). A umidade relativa e a precipitação média anual são 71,6% e 1372,2 mm, respectivamente (Machado *et al.* 2015).

## 2.2 Caracterização do objeto de estudo

Selecionou-se o edifício do Palácio da Instrução para realização da pesquisa. Construído em estilo neoclássico em 1913, abrigou uma escola na primeira metade do século XX, sendo atualmente a sede do Museu de História Natural e Antropologia e Biblioteca Pública. A edificação possui dois pavimentos com dois pátios retangulares centrais simétricos orientados ao longo do eixo NE-SO (60°) com 13,7 m de largura (L), 10 m de comprimento (W) e 11,8 m de altura (H), com fator de forma máximo ( $AR=H/W$ ) igual a 1,18 (Figura 1a e 1b). As esquadrias (portas e janelas) do edifício são de madeira, com duas folhas de abrir na condição de 90° (fator de ventilação 90%).

A partir da característica arquitetônica dos pátios, simétricos no edifício, optou-se por instalar os aspersores de água em apenas um dos pátios do edifício, o que possibilitou a análise comparativa dos impactos da adoção dessa estratégia bioclimática. Para a realização das medições e simulações, selecionou-se o pátio direito da Figura 1, o qual possui uma fonte ao centro e arbustos e grama no perímetro, cobrindo aproximadamente 13% da área do pátio (Figura 1b).

**Figura 1.** Características dos pátios internos da edificação, sendo (a) esquerdo e (b) direito



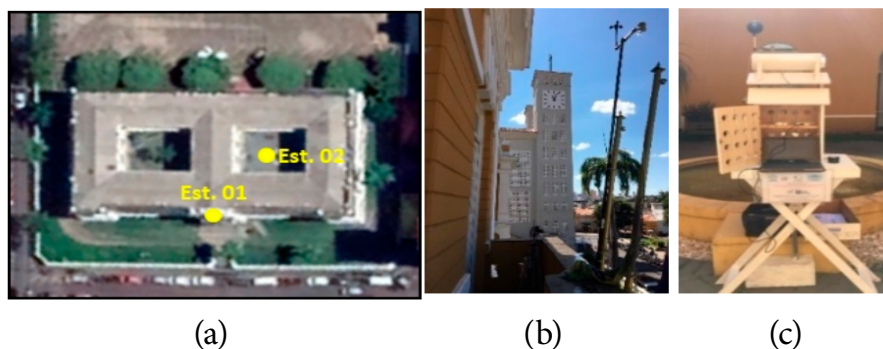
**Fonte:** Os autores.

## 2.3 Coleta de dados meteorológicos

Para calibrar o modelo computacional gerado no Envi-Met, foram instaladas estações meteorológicas (marca OnsetComp modelos Hobo U-30 e U-13) para monitorar as variáveis ambientais externas e internas ao edifício, com vistas a gerar um banco de dados microclimáticos (Figura 2). Uma delas foi posicionada na cobertura da edificação (Est. 01), a 14 metros de altura, registrando temperatura do ar ( $T_a$ ), umidade relativa do ar (UR), velocidade do ar ( $V_a$ ) e radiação solar ( $R_g$ ). A outra, no pátio direito (Est. 02), a 1,4 metros de altura, registrando temperatura e umidade

relativa do ar, bem como temperatura de globo ( $T_g$ ). Os dados foram coletados a cada 5 minutos durante os anos de 2019 e 2020. Nessa pesquisa, foram usados dados temperatura e umidade do ar coletados no dia 11 e 12/07/2019 para simular o modelo no software ENVI-met. Todos os sensores atendem às recomendações da ISO 7726 (INTERNATIONAL..., 1998) e calibrados previamente as medições.

**Figura 2.** (a) Posicionamento das estações meteorológicas na (b) cobertura (Est.01) e (c) no pátio (Est. 02)



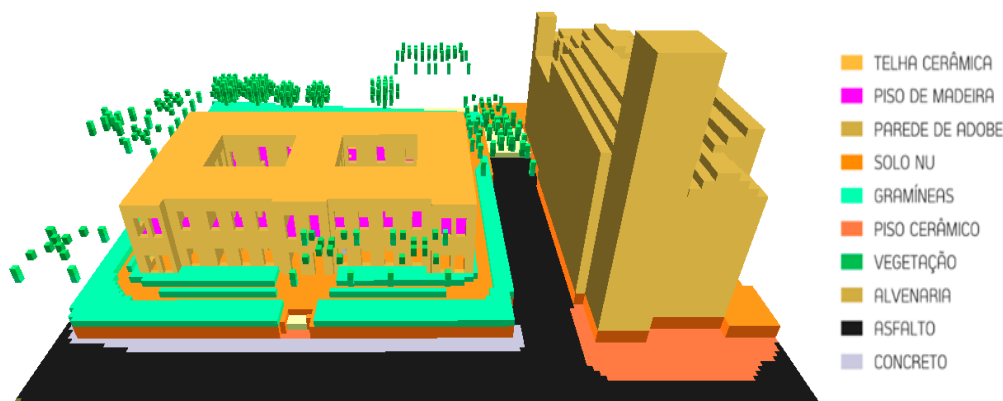
Fonte: Os autores.

## 2.4 Modelagem computacional no software ENVI-met

### 2.4.1 Determinação dos parâmetros do entorno do local pesquisado

A edificação se encontra implantada no Centro da cidade, em região com característica comercial e institucional, com presença de edificações baixas e altas (entre 2 e 10 pavimentos). O tecido urbano tem presença de vegetação espaça, sendo revestido por superfícies de concreto e asfalto, configurando-se como uma zona local climática 5 (LCZ), com rugosidade superficial classificada como 'rugosa' (comprimento de rugosidade  $z_0=0,25$ ) (Stewart; Oke, 2012).

Para a modelagem do local de estudo no software ENVI-met e posterior simulação (Figura 3), identificou-se a tipologia da edificação pesquisada a partir de planta baixa e de seu entorno imediato com auxílio de fotografias e imagens de satélite, categorizando os elementos constituintes da área a ser modelada por meio de levantamento de campo, definindo as propriedades termo físicas dos materiais construtivos e dos revestimentos existentes. Paralelamente, conduziu-se um levantamento das condições topográficas do terreno e da vegetação existente ao entorno das áreas de interesse. Ao final, os elementos constituintes foram categorizados em revestimentos (solo nu, asfalto e concreto), vegetação (forração, arbustos e arbórea), sistema de cobertura (telhas cerâmicas e forro de madeira) e sistema de vedação vertical (parede de adobe de 0,80m de espessura). Para a modelagem do cenário com a estratégia estudada, considerou-se o modelo base com a adição dos aspersores.

**Figura 3.** Modelagem 3D da edificação estudada e seu entorno no software ENVI-met

Fonte: ENVI-met 5.5.1. Adaptado pelos autores.

As propriedades físicas e térmicas dos materiais identificados na área da pesquisa, principalmente aquelas dos sistemas de vedações verticais e de cobertura das edificações foram obtidas conforme NBR 15.220 (ABNT, 2005). Para os demais materiais, como solo, revestimento asfáltico e concreto, utilizou-se os valores padrões disponibilizados no banco de dados do software ENVI-met. Para captar a influência microclimática do entorno no edifício, considerou-se parâmetros de modelagem (Tabela 1), contando com o grid de 142x103x55 (x,y,z) e 5 grids de alinhamento (nesting grids). Estabeleceu-se grid unitário de 1x1x1m para a representação tridimensional das edificações e das superfícies existentes a ser modeladas.

Optou-se na modelagem por manter todas as aberturas da edificação (portas e janelas) na condição de abertas, uma vez que o enfoque é identificar a extensividade do impacto da estratégia para além do pátio, junto aos corredores e salas adjacentes. Foi considerada a rotação de -54° da edificação em relação ao norte, a partir da localização obtida por meio do Google Earth (Latitude: -15.60 | Longitude: -56.10).

Além disso, nesta região, a vegetação estabelecida dentro e ao redor da área do edifício foi identificada em características taxonômicas e dendrológicas. O parâmetro de entrada para a vegetação no ENVI-met é a densidade da área foliar (DAF), expressa em  $\text{m}^2/\text{m}^3$ . Os valores de DAF foram obtidos a partir de um índice de área foliar (IAF) obtido em uma pesquisa anterior conduzida para exemplares locais de árvores na região (Rosseti *et al.*, 2019; Callejas *et al.*, 2014). As árvores estabelecidas foram classificadas em termos de DAF, seguindo três categorias: a) baixa densidade –  $\text{DAF} \leq 3,45 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , b) densidade média –  $3,5 \text{ m}^2/\text{m}^3 < \text{DAF} \leq 4,9 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , e c) alta densidade –  $\text{DAF} > 4,9 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Os valores de DAF e as características dendrológicas de cada árvore (altura do tronco e da copa, por exemplo) foram ajustados no banco de dados de plantas para representar cada exemplar existente no local.

**Tabela 1.** Descrição dos parâmetros de modelagem utilizados no software ENVI-met

| Parâmetros                            | Dados      |
|---------------------------------------|------------|
| Número de grids totais                | 142x103x55 |
| Tamanho do grid unitário              | 1x1x1m     |
| Nesting grids                         | 5          |
| Rotação do modelo em relação ao norte | -54°       |

**Fonte:** Os autores.

#### 2.4.2 Determinação dos parâmetros de aspersão de água

Para a simulação do impacto dos aspersores no software ENVI-met, adotou-se como referência o sistema de climatização evaporativa disponibilizado comercialmente do tipo pedestal (Figura 4), considerando duas unidades instaladas no pátio direito. Os dispositivos foram modelados conforme especificações técnicas do fabricante (Tabela 2), além de posicionados a 6,0 metros das paredes e 4,0 metros entre si, instalados a 2,0 metros de altura do piso.

A taxa de aspersão do equipamento foi transformada para a unidade requerida pelo Envi-met (g/s), com o funcionamento programado das 6h às 20h (emission profile), simulando o padrão de uso da edificação pesquisada. A modelagem considera o mecanismo de evaporação, através da produção de micro gotículas, que são inseridas no ar no local e altura definidos para o posicionamento dos aspersores no modelo tridimensional idealizado (Figura 5). Segundo o fabricante, o alcance frontal do equipamento é de 15m de distância. De acordo com Campos *et al.* (2008), a redução da temperatura do ar por resfriamento evaporativo é dependente do tipo de clima e das condições atmosféricas, com maior potencial ocorrendo no período quente e seco, alcançando até 6,0°C.

**Figura 4.** (a) Modelo do aspersor de água escolhido para a simulação e (b) equipamento em funcionamento

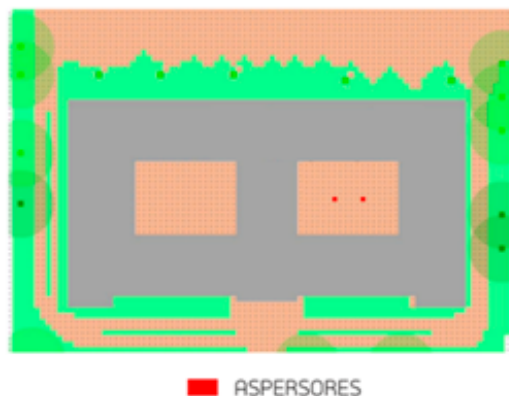


**Fonte:** Disponível em: <https://www.joape.com.br/>.

**Tabela 2.** Características do aspersor de água

| Taxa de aspersão          | Tipo de aspersão (Souce Geometry) | Identificação especial no software | Altura da aspersão |
|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| 18 litros por hora (5g/s) | Pontual                           | 2                                  | 2,0 metros         |

Fonte: Os autores.

**Figura 5.** Posicionamento dos aspersores no interior do pátio e configuração

Fonte: ENVI-met 5.5.1. Adaptado pelos autores.

## 2.5 Procedimento de calibração do modelo simulado

Para a execução da simulação, foi utilizado o ENVI-guide, incorporando as abas “Configurações Gerais” e “Forçamento Completo”. Na primeira etapa, foram estabelecidas as configurações iniciais para o período de simulação, bem como as condições atmosféricas observadas no dia anterior à data desejada para a simulação (Tabela 3).

Os dias selecionados (11 a 12/11/2019) apresentam condição sinóptica padrão para o período pesquisado (céu aberto, sem interferências de nebulosidade). Na aba seguinte, são introduzidos dados meteorológicos de temperatura e da umidade do ar observados, visando “forçar” os dados simulados a se aproximarem daqueles medidos. Incorporou as variáveis de temperatura e umidade do ar coletados dentro do pátio a 1,5 metros de altura para conduzir o procedimento de calibração. Estes dados foram comparados com os simulados dentro do pátio, com vistas a validar o procedimento de simulação.

**Tabela 3.** Parâmetros de entrada para simulação no software ENVI-met

| Parâmetros                           |            |
|--------------------------------------|------------|
| Data de início da simulação          | 11/07/2019 |
| Hora de início da simulação          | 20h00min0s |
| Duração total                        | 28 horas   |
| Intervalo de registro                | 60 min     |
| Velocidade do vento a 10m            | 1,94 m/s   |
| Direção do vento                     | 317°       |
| Rugosidade z0 no ponto de referência | 0,1        |
| Temperatura inicial da atmosfera     | 27,24°C    |
| Umidade específica a 2500m           | 7,36 g/kg  |
| Umidade relativa a 2m                | 50%        |

Fonte: Os autores.

Inicialmente, foi conduzido um procedimento de calibração por meio da simulação do modelo existente. Para a validação, realizou-se uma análise estatística entre os dados simulados e os observados in loco, utilizando-se o Erro Absoluto Médio (EAM) (Equação 1), que calcula a média dos desvios absolutos entre as variáveis simuladas e observadas; a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) (Equação 2), que quantifica o erro quadrático médio entre as mesmas variáveis; e o Índice de Concordância (d) (Equação 3), uma medida descritiva que avalia a congruência entre os dados simulados e observados (Willmott, 1982). Destaca-se que, quanto menores forem os valores de EAM e REQM, maior será a proximidade entre os dados simulados e observados, enquanto um valor de d mais próximo de 1 indica maior concordância entre eles.

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{N} \quad (1)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2)}{N}} \quad (2)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}) + |O_i - \bar{O}|^2} \right] \quad (3)$$

Nas equações,  $P_i$  indica valor simulado (denominado de previsto);  $O_i$ , o valor medido (observado);  $\bar{O}$ , o valor médio medido (observado) no intervalo de tempo da calibração; e,  $N$ , o número de medições realizadas.

## 2.6 Avaliação dos impactos proporcionados pela instalação de aspersores de água

Considerado calibrado o modelo computacional, passou-se à simulação do modelo com a instalação da estratégia bioclimática. Para quantificar os benefícios da

estratégia de uso de aspersores de água sobre as variáveis ambientais - temperatura do ar ( $T_a$ ), umidade relativa do ar (UR), temperatura radiante média ( $T_{rm}$ ) e velocidade do ar ( $v_a$ ) - foram confeccionados mapas temáticos cromáticos das diferenças entre simulações, permitindo avaliações quantitativas e qualitativas das alterações observadas e possibilitando a identificação da extensão espacial da influência da estratégia. Os mapas foram gerados à altura de 1,5 metros, correspondente ao nível médio da altura humana em posição sentada e em pé, conforme a norma ISO 7726 (International..., 1998). Os horários e frequências das observações microclimáticas selecionadas para a produção dos mapas seguiram as prescrições da Organização Meteorológica Mundial (OMS, 2008): às 6h, 14h e 20h, em hora local.

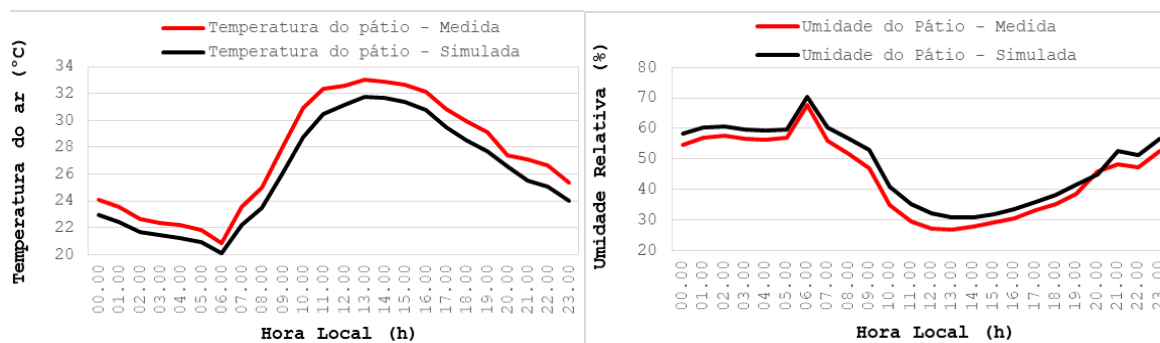
Complementarmente, elaborou-se o mapa de diferença para o índice de Temperatura Equivalente Fisiológica (PET) (Matzarakis *et al.*, 1999), derivado por meio do software Bio-MET, disponibilizado pelo ENVI-met. Para o cálculo do índice, consideraram-se, nos dados pessoais, os valores de altura, peso e idade referentes ao homem médio e à mulher média, conforme estabelecido pela norma ISO 8896 (International..., 2004), além de vestimenta correspondente a um traje de verão e atividade metabólica padrão equivalente à 80 W/m<sup>2</sup>, conforme os procedimentos definidos pelo software. Buscou-se, assim, avaliar a influência dos aspersores de água no conforto térmico no interior do pátio e nos ambientes adjacentes.

### 3 Resultados

#### 3.1 Validação da simulação

O modelo idealizado no ENVI-met é capaz de representar adequadamente a variação diária da temperatura e umidade do ar na Estação 02, conforme ilustrado na Figura 6. Apesar da similaridade, a curva da temperatura do ar simulada apresentou valores subestimados, comportamento também observado por Forouzandeh (2018), que atribuiu em parte às diferenças devido à incidência de radiação solar nos abrigos que alojam os instrumentos de medição. De forma contrária, a curva da umidade relativa do ar simulada apresentou valores superestimados em relação a curva medida. As diferenças médias entre os dados medidos e simulados para temperatura e umidade do ar são de 1,33°C e 3,67%, respectivamente. As diferenças máximas para temperatura do ar e umidade relativa são, respectivamente, -2,17°C às 10h e 6,09% às 9h.

**Figura 6.** Curso da temperatura e umidade do ar medidas (vermelho) e simuladas (preto)



Fonte: Os autores.

A partir dos dados obtidos, realizou-se a análise estatística entre os dados medidos e simulados, onde estimou-se baixos valores para o EAM e REQM e elevado índice de concordância (Tabela 4). Assim, as simulações apresentam precisão aceitável na área do pátio, conforme estudos similares sobre o tema (Haseh *et al.*, 2018; Sandrin, 2023; Callejas *et al.*, 2022). Portanto, o modelo idealizado no ENVI-met reproduz com confiança o microclima do pátio, possibilitando simulações a partir de cenários hipotéticos.

**Tabela 4.** Indicadores de desempenho da calibração

| Variáveis | EAM  | REQM | d    |
|-----------|------|------|------|
| Ta (°C)   | 1,00 | 1,37 | 0,97 |
| UR (%)    | 0,99 | 3,85 | 0,98 |

Fonte: Os autores.

### 3.2 Benefícios da instalação de aspersores de água para a ambiência da edificação

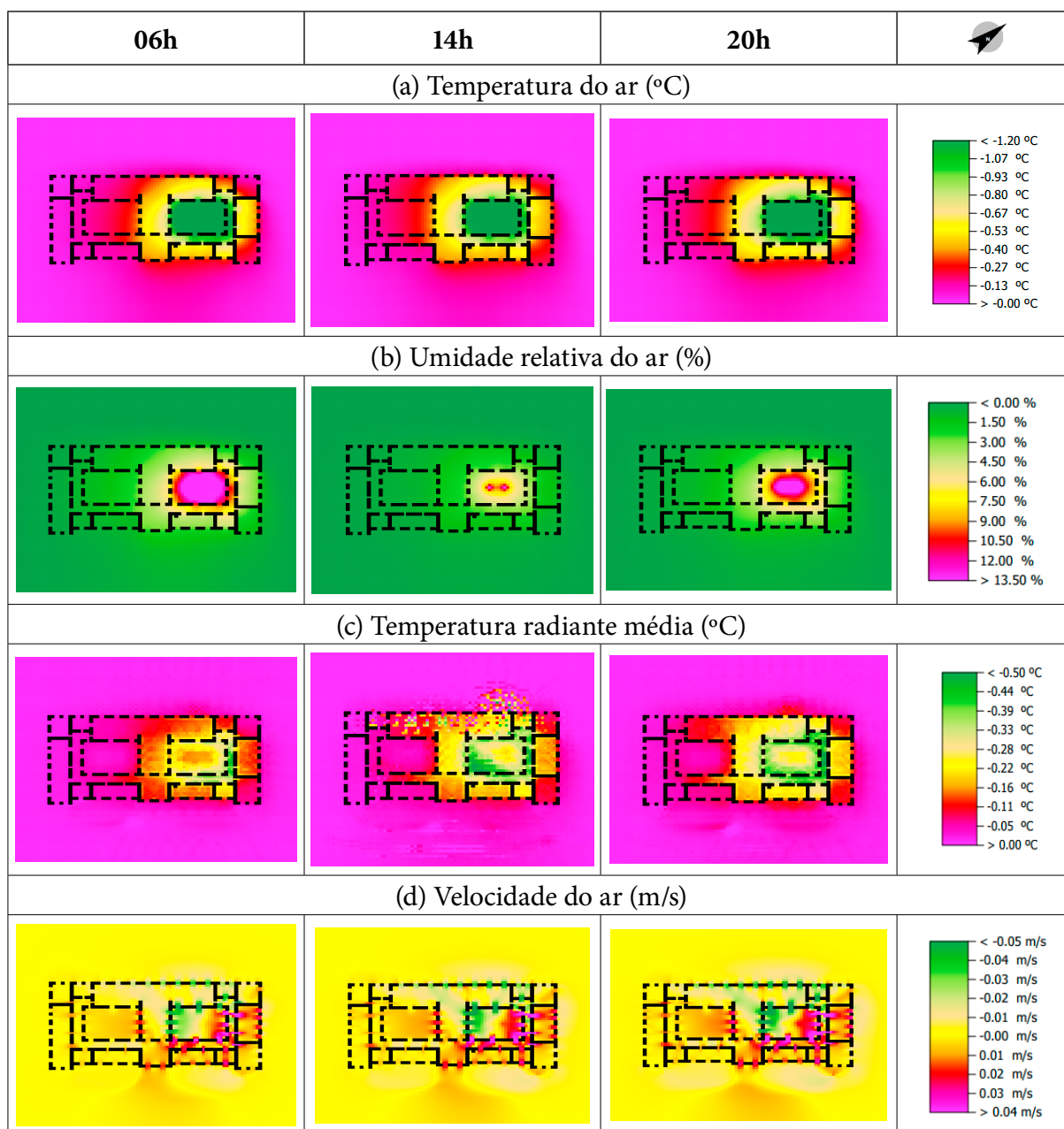
A análise dos mapas cromáticos do pátio, corredores e salas internas (Figura 7) evidencia que a instalação dos aspersores de água afeta as variáveis ambientais de maneira distinta. Nos mapas, valores negativos indicam redução e valores positivos, aumento nas variáveis analisadas: temperatura do ar ( $T_a$ ), umidade relativa (UR), temperatura média radiante ( $T_{rm}$ ), velocidade do ar ( $V_a$ ) e índice de Temperatura Equivalente Fisiológica (PET).

Com relação à temperatura do ar ( $T_a$ ), observa-se um efeito de arrefecimento evaporativo decorrente da estratégia, com impacto positivo tanto no pátio quanto nos corredores e salas adjacentes, em todos os horários analisados. As reduções foram mais expressivas no pátio (até -1,20 °C), enquanto nas salas inferiores e corredores, a redução foi de até -1,0°C (Figura 7a). Ainda que menos intenso (-0,20°C), observa-se que o resfriamento foi parcialmente transferido do pátio direito para o esquerdo, especialmente às 6h. Nota-se também a propagação do efeito para a calçada e via adjacente, localizadas ao sudeste do edifício, resultado do fluxo de ar gerado pela

ventilação cruzada, viabilizada pela modelagem com portas e janelas abertas.

A umidade relativa do ar (UR) apresentou comportamento semelhante. A inserção dos aspersores elevou a UR tanto no pátio quanto nos corredores e salas internas, criando um ambiente ligeiramente mais úmido (Figura 7b). As maiores elevações ocorreram no pátio (acima de 13,5%), enquanto as salas e corredores registraram aumentos inferiores a 5%. O efeito de umidificação também foi transferido para ambos os pátios, especialmente às 20h, evidenciando a importância de projetar edificações permeáveis, que permitam a difusão da umidade entre os ambientes internos e externos.

**Figura 7.** Mapas cromáticos (gerados a 1,5 metros do piso) com a distribuição das diferenças provocadas pela instalação de aspersores de água nas variáveis ambientais analisadas



Fonte: Os autores.

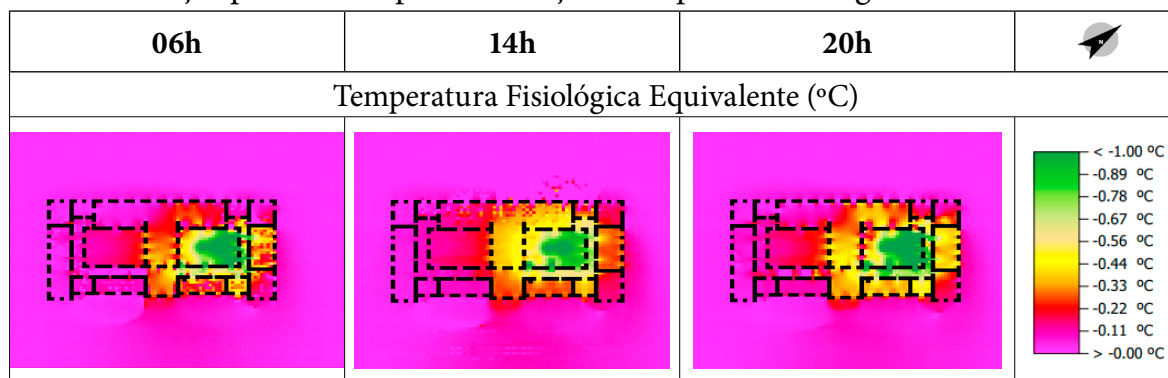
A temperatura média radiante ( $T_{rm}$ ) foi a proporcionalmente menor afetada, com maiores efeitos dentro do pátio, principalmente às 14 e 20h, com reduções superiores a 0,5 C (Figura 7c). Por sua vez, nos corredores, em função do fluxo de ar que se estabelece dentro do edifício, os impactos são em média inferior aos observados dentro do pátio, porém existindo regiões onde se verifica reduções similares as encontradas de dentro do pátio, principalmente próximo as aberturas das varandas. As salas são em geral menos impactadas com reduções inferiores a -0,20 C em todos os horários pesquisados. Especialmente, os impactos são mais perceptíveis às 14 e 20h, com influencia em todas os ambientes adjacentes.

A estratégia também influenciou a dinâmica do ar, ao aumentar a rugosidade superficial do edifício (Figura 7d). Nas regiões de barlavento, houve redução da velocidade do ar na entrada do edifício e do pátio, notadamente nas aberturas da fachada superior externa. Já nas áreas de sotavento, observou-se aumento da velocidade, sobretudo nas fachadas inferior e direita e nas aberturas adjacentes ao corredor do pátio. Embora as variações tenham sido de baixa magnitude (inferiores a 0,05 m/s), elas demonstram que as aberturas funcionam como canais de direcionamento do fluxo de ar, favorecendo a propagação do efeito de resfriamento e contribuindo para a retirada de calor dos ambientes internos.

### **3.3 Benefícios da instalação de aspersores de água para o conforto térmico da edificação**

Nota-se variação espacial do índice PET pela instalação dos aspersores, indicando melhorias na sensação térmica, não apenas no interior do pátio, mas também nos corredores e salas adjacentes (Figura 8). As maiores reduções ocorreram no pátio central, com até -1,0°C de diminuição no índice PET. Nos corredores, a variação foi inferior a -0,5°C, e nas salas adjacentes, em torno de -0,2°C. Verificou-se ainda um leve efeito no pátio adjacente esquerdo, com redução de até -0,15°C. Essas diferenças evidenciam a capacidade da estratégia de influenciar positivamente o microclima em áreas além do ponto de instalação. Ressalta-se que o índice PET está fortemente associado à temperatura média radiante, principal variável relacionada ao desconforto térmico (Middel *et al.*, 2020). Portanto, a estratégia de resfriamento por aspersores apresenta potencial para reduzir o estresse térmico em ambientes semiabertos e internos, nas proximidades do pátio.

**Figura 8.** Mapas cromáticos (gerados a 1,5 metros do piso) com a distribuição das diferenças provocadas pela instalação de aspersores de água no índice PET



Fonte: Os autores.

## 4 Discussões

A elevação da temperatura do ar imposta pelas mudanças climáticas impõe a necessidade pela busca por estratégias complementares de arrefecimento para as edificações, especialmente para aquelas implantadas em regiões de clima tropical, em especial a pesquisada, onde se projeta elevação de até 5,7°C até o final do século XXI (Da Guarda *et al.*, 2019). Nessa perspectiva, o interesse por sistemas de aspersão de água tem sido investigado uma vez que esta estratégia se configura como uma alternativa aos tradicionais sistemas de ar condicionado em razão do menor consumo de energia e ao fato de não utilizarem refrigerantes prejudiciais ao meio ambiente (Farnham, 2019; Wai *et al.*, 2021).

A presente pesquisa evidenciou que os aspersores instalados dentro do pátio, auxiliados pelos fluxos de ar que se estabelecem dentro do edifício em razão das aberturas, configuram-se como estratégia capaz de impactar o ambiente térmico. Os maiores efeitos de resfriamento evaporativo ocorrerem no ambiente do pátio. Tal comportamento se adere ao evidenciado na pesquisa conduzida por Dhariwal *et al.* (2019), onde os pesquisadores avaliaram o efeito de resfriadores evaporativos instalados externamente a edificação em um pátio público localizado em região de clima quente e árido dos Emirados Árabes Unidos. Tais dispositivos conseguiram reduzir o nível de estresse térmico expresso pelo UTCI de muito forte para moderado estresse térmico. No presente estudo, as reduções foram mais modestas, alcançando dentro do pátio redução máxima de 1°C.

Por meio da análise espacial, evidenciou-se que os efeitos dos aspersores se estendem a todas as salas adjacentes, alcançando reduções bem menores (de no máximo 0,2°C), inferiores as aquelas observadas dentro do pátio. Isso indica que o uso de estratégias bioclimáticas isoladas pode não ser suficiente para adequar o nível de estresse em região de climas quentes. Em razão disso, a busca por soluções integradas

representam uma alternativa a ser considerada na busca pela sustentabilidade dos espaços edificados. Diz-Mellado *et al.* (2024) estudaram a aplicação de estratégias complementares dentro do pátio, com a aplicação de aspersores e do uso de tela de sombreamento do tipo ‘sombrites’. A pesquisa revelou que as condições térmicas internas do pátio em relação às externas foram aperfeiçoadas, conseguindo-se elevar a quantidade de horas de conforto. Nesse sentido, o uso de estratégias integradas representa um meio alternativo para reduzir os elevados níveis de estresse térmico que estarão sujeitos os usuários das edificações em dias com condições extremas ou em decorrência da mudança do clima.

## 5 Conclusão

A estratégia impactou para a melhoria do conforto térmico na região do pátio e nos ambientes adjacentes, especialmente durante os períodos mais quentes do dia. O efeito de resfriamento evaporativo decorrente da aspersão favorece não apenas a redução da temperatura do ar, mas também o aumento da umidade relativa, resultando em um microclima mais agradável. Esse efeito tende a ser ampliado em edificações com projetos que favoreçam a permeabilidade, por meio do posicionamento adequado das aberturas, permitindo a circulação e a distribuição da umidade para os demais ambientes internos.

Os benefícios dos aspersores de água não se limitam ao pátio onde estão instalados, mas alcançam corredores e salas adjacentes, promovendo uma melhoria mais abrangente do microclima, embora quantitativamente mais reduzida. Apesar dos efeitos se propagarem além do pátio direito, os ambientes localizados na ala oposta apresentaram menor influência da estratégia, possivelmente devido ao padrão de ventilação que se estabelece internamente.

Em síntese, a utilização de sistemas de aspersão em pátios mostrou-se promissora como estratégia de atenuação térmica. Os achados reforçam a relevância do pátio como elemento arquitetônico facilitador da ventilação cruzada e da regulação térmica no interior das edificações. Assim, a associação entre aspersores e a morfologia dos pátios apresentam-se como estratégias bioclimáticas complementares, com potencial para mitigar o desconforto térmico tanto nos ambientes internos quanto nas áreas adjacentes à edificação.

Apesar disso, reconhecem-se algumas limitações da pesquisa. No presente estudo, não foram quantificados os impactos associados ao gasto energético do uso do sistema implantado, nem considerado a frequência do uso dos aspersores, aspectos importantes em regiões com restrições de recursos hídricos. Tais fatores podem influenciar na viabilidade e na sustentabilidade da aplicação em maior escala da estratégia. A necessidade de manutenção do sistema é algo que também merece atenção uma vez que

a qualidade e a pureza da água podem impactar na viabilidade do uso da técnica. Muito embora o procedimento de calibração tenha indicado adequada concordância com os dados simulados e observados em campo, recomenda-se a realização de campanhas experimentais na edificação com o uso dos aspersores, a fim de validar mais o modelo na condição de uso dos aspersores, aumentando a confiabilidade das simulações.

Para trabalhos futuros, recomenda-se explorar a eficácia da técnica sob diferentes faixas de umidade relativa do ar, considerando a possível saturação ambiental e seus efeitos sobre a redução de temperatura do ar e nas outras variáveis. Avaliações de longo prazo, que incluam a sazonalidade, além da diversificação de modelos do sistema de umidificação, com diferentes intensidades e formas de aspersão, podem contribuir para um entendimento mais sistêmico da aplicabilidade da estratégia em regiões de clima tropical.

### *Agradecimentos*

Esta pesquisa foi financiada pela Universidade Federal de Mato Grosso/Brasil por meio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

### **Referências**

- ARTAXO, P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*. v. 34, n.100, p.53–66, 2020. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.34100.005>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15220-2: Desempenho Térmico de Edificações - Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*. Rio de Janeiro, Brasil, p. 1-10, 2005.
- CALLEJAS, I. J. A.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; DURANTE, L. C.; DE ALMEIDA LOBO, F. Patterns of energy exchange for tropical urban and rural ecosystems located in Brazil central. *Journal of Urban & Environmental Engineering*, v. 13, n.1, 2019. <https://doi.org/10.4090/juee.2019.v13n1.069079>
- CALLEJAS, I. J. A.; GÁLAN-MARIN, C.; DURANTE, L. C.; AMARANTE, L. M.; GUARDA, E. L. A.; MORAIS, M. L. C.; DIZ-MELLADO, E.; RIVERA-GÓMEZ, C. Contrasting the passive cooling effect produced by courtyards located in the tropical and Mediterranean climates. *In: PLANNING POST CARBON CITIES: 35TH PLEA CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE*, A Coruña, 1st-3rd September 2020: Proceedings. Universidade da Coruña, 2020. p. 1686-1691.
- CALLEJAS I. J. A.; DURANTE L. C.; NOGUEIRA M. C. J. A.; NOGUEIRA, J. M. C. J. A. Diversity arboreal and vegetation indices in environment school. *REGET*, v. 18, v.1, p. 454-466, 2014. <http://dx.doi.org/10.5902/2236117012537>

- CALLEJAS, I. J. A.; SANTOS, F. A. S.; SILVA, D. T.; DURANTE, L. C.; ROSSETI, K. A. C. Espécimes arbóreos em pátio interno: benefícios termohigrométricos para a edificação. *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, v. 19, p. 1-13, 2022. <https://doi.org/10.46421/entac.v19i1.2120>
- CAMPOS, A. T.; KLOSOWSKI, E. S.; GASPARINO, E.; & CAMPOS, A. T. de. Estudo do potencial de redução da temperatura do ar por meio do sistema de resfriamento adiabático evaporativo na região de Maringá, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 24, p. 1575-1581, 2008. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v24i0.2424>
- DA GUARDA, E. L. A.; GABRIEL, E.; DOMINGOS, R. M. A.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A.; SANCHES, J. C. M.; & ROSSETI, K. D. C. (2019). Adaptive comfort assessment for different thermal insulations for building envelope against the effects of global warming in the mid-western Brazil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 32, 012057, 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/329/1/012057>
- DHARIWAL, Jay *et al.* Evaluating the effectiveness of outdoor evaporative cooling in a hot, arid climate. *Building and Environment*, v. 150, p. 281-288, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.016>
- DJEDJIG, R.; BELARBI, R.; BOZONNET, E. Experimental Study of a Green Wall System Effect in Urban Canyon Scene. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, v. 10, 2015.
- DIZ-MELLADO, E.; LÓPEZ-CABEZA, V. P.; RIVERA-GÓMEZ, C. ; NABONI, E.; GALÁN-MARÍN, C. Optimizing a courtyard microclimate with adaptable shading and evaporative cooling in a hot Mediterranean climate. *Journal of Building Engineering*, v. 88, 109167, 2024.
- FARNHAM, C. Applications of Evaporative Cooling for Thermal Comfort. In: Proceedings of the 1st International Conference on: Comfort at the Extremes: Energy, Economy and Climate, 10th – 11th April 2019, Heriot Watt University, Dubai. 2019.
- FOROUZANDEH, A. Numerical modeling validation for the microclimate thermal condition of semi-closed courtyard spaces between buildings. *Sustainable Cities and Society*, 36, p. 327–345, 2018.
- HASEH, R. H.; KHAKZAND, M.; OJAGHLOU, M. Optimal Thermal Characteristics of the Courtyard in the hot and Arid Climate of Isfahan. *Buildings*, v. 8, p. 1-22, 2018.
- HUANG, C.; YE, D.; ZHAO, H.; LIANG, T.; LIN, Z.; YIN, H.; & YANG, Y. The research and application of spray cooling technology in Shanghai Expo. *Applied Thermal Engineering*, 31(17–18), 3726-3735, 2011.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities*. Geneva, 1998.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 8896: Ergonomics of the thermal environments: determination of thermal metabolic rate*. Genebra, 2004.
- MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S.; QUERINO, C. A. S.; DANELICHEN, V. H. M.; VELASQUE, M. C. S. Seasonal and interannual pattern of meteorological variables in Cuiabá, Mato Grosso state, Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 33, n. 3, 477-488, 2015.

- MASIERO, E.; OLIVEIRA, D. K.; COSTA, O. P. da; VECCHIA, F. A. da S. Estudo experimental de condicionamento ambiental com resfriamento evaporativo direto. *AMBIENTE CONSTRUÍDO*, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 151-173, 2020.
- MATZARAKIS, A.; MAYER, H.; IZIOMON, M. G. Applications of a universal thermal index: Physiological Equivalent Temperature (PET). *International Journal of Biometeorology*, v. 43, p. 76–84, 1999.
- MIDDEL, A.; TURNER, V. K.; SCHNEIDER, F. A.; ZHANG, Y.; STILLER, M. Solar reflective pavements-A policy panacea to heat mitigation? *Environ. Res. Lett.*, v.15, 064016, 2020.
- RIVERA-GÓMEZ, C.; DIZ-MELLADO, E.; GALÁN-MARÍN, C.; LÓPEZ-CABEZA, V. Tempering potential-based evaluation of the courtyard microclimate as a combined function of aspect ratio and outdoor temperature. *Sustainable Cities and Society*, v. 51, 101740, 2019.
- ROSSETI, K. 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. *Engineering and Science*, v.2, n.8, p. 35-46, 2019. <https://doi.org/10.18607/ES201988566>
- SANDRIN, G. M. *Aspersores de água em pátios internos: benefícios para a ambiência térmica dos espaços de transição e internos de um edifício localizado em clima tropical*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2023.
- STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 93, p. 1879–1900, 2012. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.
- SILVA, A. C. S. B. *Simulação de resfriamento evaporativo por microaspersão d'água*. 215p. Tese (Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2004.
- SOFLAEI, F.; SHOKOUHIAN, M.; SHEMIRANI, S. M. M. Traditional Iranian courtyards as microclimate modifiers by considering orientation, dimensions, and proportions. *Frontiers of Architectural Research*, v. 5, n. 2, p. 225-238, 2016.
- TESHNEHDEL, S.; MIRNEZAMI, S.; ANIS, S.; POURZANGBAR, A.; OLABI, A. G. Data-driven and numerical approaches to predict thermal comfort in traditional courtyards. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 37, p. 100569, 2020.
- ULPIANI, G.; DI GIUSEPPE, E.,; DI PERNA, C.; D’ORAZIO, M.; ZINZI, M. Thermal comfort improvement in urban spaces with water spray systems: Field measurements and survey. *Building and Environment*, 156, 46-61, 2019.
- UNITED NATIONS. *Report of the United Nations Conference on Human Settlements (Habitat II): Istanbul*, p.03-14 June 1996. New York: United Nations, 1996.
- UNITED NATIONS. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3, 2022.

VANOS, J. K.; WRIGHT, M. K.; KAISER, A.; MIDDEL, A.; AMBROSE, H.; HONDULA, D. M. Evaporative misters for urban cooling and comfort: effectiveness and motivations for use. *Int International Journal of Biometeorology*, v.66, p.357–369, 2022.

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

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

ZAMANI, Z.; HEIDARI, S.; HANACHI, P., Reviewing the thermal and microclimatic function of courtyards. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 93, p. 580-595, 2018.

WAI, K.M.; XIAO, L.; TAN, T.Z. Improvement of the Outdoor Thermal Comfort by Water Spraying in a High-Density Urban Environment under the Influence of a Future (2050) Climate. *Sustainability*, v. 13, 7811, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13147811>