



## Relationship between urban morphology and microclimate based on parameterized scenarios in a city with a tropical savannah climate

## Relação entre morfologia urbana e microclima a partir cenários parametrizados em cidade de clima tropical de savana

BRANDÃO, Luana Karla de Vasconcelos <sup>(1)</sup>; BARBOSA, Ricardo Victor Rodrigues <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> 0000-0001-5989-4502; Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas (AL), Brasil. [luana.brandao@arapiraca.ufal.br](mailto:luana.brandao@arapiraca.ufal.br)

<sup>(2)</sup> 0000-0003-4971-6037; Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas (AL), Brasil. [rvictor@fau.ufal.br](mailto:rvictor@fau.ufal.br)

O conteúdo expresso neste artigo é de inteira responsabilidade dos/as seus/as autores/as.

### ABSTRACT

The process of urbanization of cities results in a typically urban climate characterized, in most cases, by loss of quality of life due to climatic phenomena, such as urban heat islands. The urban form suitable to local climatic conditions promotes a sustainable urban environment, with outdoor thermal comfort. This research aimed to analyze the relationship between urban morphology and microclimate in scenarios parameterized by different land use and occupation parameters, taking the city of Arapiraca/AL as an object of study. Thus, four urban scenarios were elaborated from an analytical approach using computer simulation by ENVI-met software, for the typical period of summer, hot and dry. The base scenario was elaborated on a fraction of the city with a tendency to verticalization the buildings. The other scenarios differ according to the thermodynamic properties of the materials, canyon geometry, and the presence of vegetation. The results showed significant thermal effects as a function of urban morphology. The presence of high albedo materials promoted the decrease in air temperature. The streets orientation and the geometry of the urban canyon determined the solar access, the number of hours of exposure to direct solar radiation, and the use of winds. The presence of vegetation favored the thermal conditions of the microclimate. Therefore, it was evidenced the need to insert the study in the urban climate in the urban planning process of the cities, to promote quality of life for its inhabitants.

### RESUMO

O processo de urbanização das cidades conforma um clima tipicamente urbano, na maioria das vezes caracterizado pela perda da qualidade de vida em função de fenômenos climáticos, como as ilhas de calor urbano. A adequação da forma urbana às condições climáticas locais tem o potencial de compor um meio ambiente urbano sustentável, com conforto térmico ao ar livre. A presente pesquisa objetivou analisar a relação entre morfologia urbana e microclima em cenários parametrizados por diferentes parâmetros de uso e ocupação do solo, tomando a cidade de Arapiraca/AL como objeto de estudo. Para tanto, foram compostos quatro cenários urbanos a partir de uma abordagem analítica com uso de simulação computacional pelo *software* ENVI-met, para o período típico de verão, quente e seco. O cenário-base parte de uma fração da cidade com tendência à verticalização. Os demais cenários variam em função das propriedades termodinâmicas dos materiais, geometria do cânion e presença de vegetação. Os resultados indicaram efeitos térmicos significativos em função da morfologia urbana. A presença de materiais de alto albedo promoveram a diminuição da temperatura do ar. A orientação das vias e a geometria do cânion urbano determinaram o acesso solar, a quantidade de horas de exposição à radiação solar direta e o aproveitamento dos ventos. A presença de vegetação apresentou o potencial de favorecer às condições térmicas do microclima. Evidencia-se, portanto, a necessidade da inserção do estudo no clima urbano no processo de planejamento urbano das cidades, a fim de promover qualidade de vida a seus habitantes.

### INFORMAÇÕES DO ARTIGO

#### Histórico do Artigo:

Submetido: 16/06/2022

Aprovado: 27/12/2022

Publicação: 10/01/2023



#### Keywords:

Urban Climate, Urban Planning, Bioclimatic urbanism, ENVI-met, Arapiraca.

#### Palavras-Chave:

Clima Urbano, Planejamento Urbano, Urbanismo Bioclimático, ENVI-met, Arapiraca.

## Introdução

O processo de urbanização das cidades altera o ambiente físico natural, provocando alterações no balanço energético local, o que conforma um clima tipicamente urbano (Higuera, 1998). A tendência global para a rápida urbanização impõe uma ameaça ao clima urbano, devido a uma série de impactos ambientais, como o aumento da temperatura do ar, fenômeno conhecido como ilha de calor urbano (UHI), que influencia diretamente no conforto térmico ao ar livre; a qualidade do ar degradada, o aumento da demanda de energia etc. (Johansson, 2017; Emmanuel, 2005, 2016; Kravcik et al., 2008; Jauregui & Romales, 1996; Rosenfeld et al., 1995; Oke, 1988).

O planejamento e o design urbano pautados pela adoção de estratégias de adequação ao clima terão o potencial de promover cidades resilientes e sustentáveis (Xu et al., 2018; Yang et al., 2016). Tornar as cidades resilientes e sustentáveis corresponde ao 11º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU): Cidades e comunidades sustentáveis, visto que o desenvolvimento sustentável não pode ser alcançado sem transformar significativamente a maneira como construímos e gerenciamos os espaços urbanos (ONU, 2022).

A morfologia da cidade tem efeito no clima urbano, de acordo com os seguintes fatores: propriedades termodinâmicas dos materiais das superfícies, por determinar a quantidade de radiação solar a ser absorvida/refletida/emitida (Alchapar et al., 2018; Krüger & Gonzalez, 2016); orientação das vias em relação à radiação solar e à direção predominante dos ventos, pelo potencial de otimizar o aproveitamento desses recursos naturais locais (Baruti et al., 2019; Rui et al., 2019; Vasilikou & Nikolopoulou, 2019; Tork et al., 2017); geometria do cânion urbano, a partir da relação entre a altura média das edificações e a largura das vias (relação H/W) e do fator de céu visível (Muniz-Gäal et al., 2020; Nakata-Osaki et al., 2016); e presença de vegetação, que proporciona sombreamento e beneficia as condições de temperatura do ar e umidade relativa do ar (Davtalab et al., 2020; Shinzato & Duarte, 2018; Minella & Krüger, 2017). Cabe destacar, ainda, que a geometria urbana está diretamente ligada a formação das ilhas de calor urbano, pois o impacto da incidência de radiação solar próximo à superfície urbana é proporcional à relação H/W (Romero, 2001).

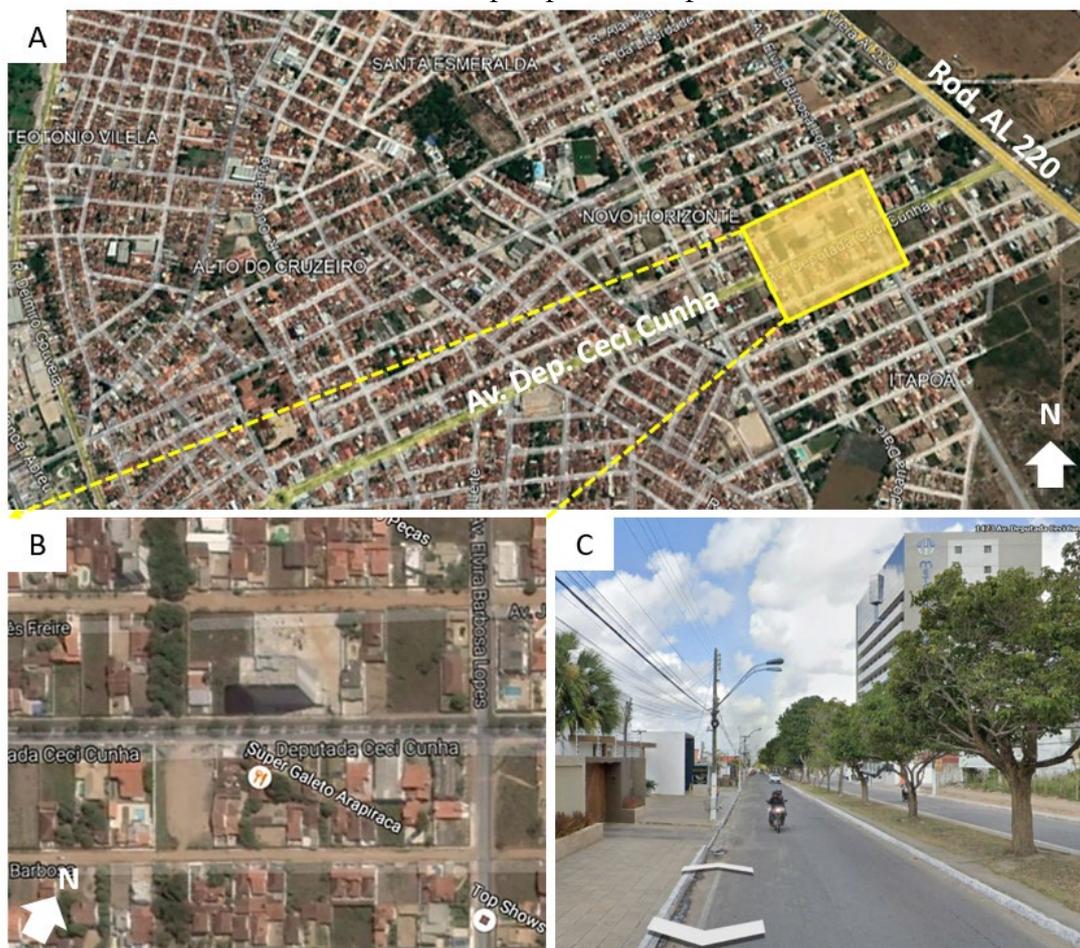
Diversos estudos utilizaram o *software* ENVI-met como ferramenta de simulação computacional para análise preditiva do comportamento térmico urbano em escala microclimática (Leal & Barbosa, 2022; Pereira, Brandão & Barbosa, 2021; Muniz-Gäal et al., 2020, entre outros). O ENVI-met corresponde a uma ferramenta computacional fundamentada em um modelo tridimensional de clima urbano que simula as relações entre a estrutura urbana e o ambiente, oferecendo várias possibilidades de aplicação e associações, permitindo a simulação do ambiente térmico urbano (Bruse, 2022). O *software* também apresenta a capacidade de estimar as condições do vento em qualquer ponto do espaço do modelo ou nas fachadas dos edifícios, considerando continuamente os efeitos das condições



A cidade possui quatro tipos morfológicos de tecido urbano, determinados por diferentes padrões de ocupação do solo urbano, com altitudes próximas e determinados pela uniformidade dos padrões construtivos. Dentre eles, o tecido Horizontal Disperso apresenta tendência à verticalização e densificação (com ocupação comercial e residencial), e pode ser encontrado nos bairros Nova Esperança, Alto do Cruzeiro, Novo Horizonte, em novos loteamentos do bairro Santa Esmeralda e em condomínios fechados como o Ouro Verde, no bairro Arnon de Melo (Torres, 2017). Contudo, a legislação municipal que trata da ocupação e uso do solo urbano não é revisada desde 2001 e nela não há qualquer parâmetro construtivo que regule o crescimento vertical da cidade, apresentando somente as indicações dos recuos mínimos iniciais (Lei Municipal nº 2.220, 2001).

A fim de estudar as possibilidades previstas na legislação de uso e ocupação do solo vigentes e seu impacto no microclima local e no conforto térmico do pedestre, foi selecionado uma fração urbana do tecido Horizontal Disperso, entre os bairros Novo Horizonte e Itapuã, região de baixa densidade e com possibilidades de adensamento e verticalização. A fração apresenta as seguintes características: lotes maiores, edificações com recuos maiores, presença de áreas verdes e algumas ruas ainda não são asfaltadas (ver Figura 2).

**Figura 2.** (A) Inserção da fração urbana selecionada (destaque amarelo) em Tecido Horizontal Disperso; (B) Fração urbana tomada como objeto de estudo; (C) Vista da Av. Ceci Cunha na perspectiva do pedestre.



Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022).

A área de estudo contempla um recorte de 340 m x 300 m (x e y), o que corresponde a 102.000 m<sup>2</sup>. A coleta de dados de campo foi feita a partir de visitas *in loco* e a partir da base cartográfica digital, concedida pela Prefeitura Municipal. A fração urbana selecionada apresenta vias com largura média de 8,0 m, passeios com 1,5 m de largura e lotes com recuo frontal de 3,0 m. A fração urbana engloba uma área verde linear denominada Área Verde Dom Constantino Lüers, com árvores de grande e médio porte; uma via central asfaltada com canteiro arborizado, enquanto as demais vias são de solo natural (permeáveis). Aproximadamente 90% dos telhados das edificações existentes são com telhas cerâmicas, 10% com telha de fibrocimento. Os passeios são de concreto e as superfícies verticais têm pinturas variadas.

### ***Simulação Computacional***

As simulações computacionais foram realizadas com base no uso do software ENVI-met 4.0. O programa ENVI-met é uma ferramenta desenvolvida para estudo e previsão do microclima urbano que simula as interações entre as superfícies urbanas, vegetação e atmosfera (Bruse & Fleer, 1998). Os principais dados climáticos foram adotados do arquivo meteorológico local.

A análise foi feita durante um dia quente de verão com o fito de analisar uma situação climática típica do período quente e seco, com elevada temperatura do ar combinada com baixa umidade relativa do ar durante o período diurno. Os dados de entrada para simulação consideraram as condições de tipo de tempo do dia 01/01/2017 que apresentou temperatura do ar máxima de 32,4 °C às 15 h, e mínima de 21,4 °C às 6 h, temperatura do ar média de 26,9 °C, umidade relativa do ar média de 72,4%, com mínima de 41,4% às 15 h e máxima de 94,6% às 6 h. A velocidade do vento a 10 m foi de 3m/s.

Os dados climáticos foram coletados a partir do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para Arapiraca, no dia selecionado para simulação computacional. A respeito da umidade específica do ar a 2500 m, foi possível coletar os dados coletados da região mais próxima de Arapiraca, em Recife-PE (82900), que correspondeu a 8.53 (g/kg)<sup>2</sup>, a partir do site do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de Wyoming, Estados Unidos. A simulação no programa ENVI-met requer dois arquivos principais: um de configuração climática, que contém todos os valores de inicialização e horários; e o outro de configuração urbana, em que é modelada a área de estudo (incluindo localização dos edifícios, vegetação, solo e superfícies). Os dados de entrada para simulação ENVI-met são mostrados no Quadro 1.

**Quadro 1.** Dados de entrada para simulação no ENVI-met.

Parâmetros	Dados	Parâmetros	Dados
Data do Início da Simulação	01/01/2017	Área do Modelo Principal	x:170, y:150, z:20
Hora do Início da Simulação	21:00 h	Nº de <i>nesting grids</i>	5
Total de Horas Simuladas	48 h	Perfil do solo para <i>nesting grids</i>	solo A: 00, solo B: 00
Velocidade do vento a 10 m (m/s)	3 m/s*	Tamanho do <i>grid</i>	dx: 2m, dy: 2m, dz: 2m
Rugosidade	0,1	método de geração de rede vertical	equidistante
Norte	320°	propriedades padrão de parede/telhado	Parede: C2 (concreto claro), telhado R1(cerâmico)
Latitude/ Longitude	-9.75/ -35.60	Fuso Horário de Referência	CET/ UTC-3
Referência ao Nível do Mar	264	Longitude de Referência	45

\* Dados do INMET para Arapiraca/AL (2022).

Fonte: Autores (2022).

### Cenários de Estudo

Os materiais utilizados na modelagem da área de estudo e nos cenários propostos foram baseados nos materiais default do programa ENVI-met 4.0. A fim de aproximar a representação da área real, buscou-se no banco de dados padrão do modelo os tipos de vegetação que mais se assemelhavam à vegetação encontrada na fração urbana. As propostas para os cenários de estudo se basearam em aspectos da legislação urbanística que trata da ocupação e uso do solo: Código de Obras e Edificações de Arapiraca (Lei Municipal nº 2.220, 2001), que prevê somente os recuos mínimos iniciais; e o Código de Urbanismo e Edificações da capital Maceió (Lei Municipal nº 5.593, 2007), para extrair a fórmula do recuo progressivo para uma zona residencial (ver Quadro 2).

**Quadro 2.** Parâmetros urbanísticos do Código de Obras e Edificações de Arapiraca (2001) e do Código de Urbanismo e Edificações de Maceió (2007) adotados nos cenários.

Recuo Mínimo Inicial Frontal	3,0 m
Recuo Mínimo Inicial Lateral com Abertura	1,5 m
Recuo Mínimo Inicial Posterior	1,5 m
Recuo Progressivo	$R_i + (n-2)/2$

Legenda:

R<sub>i</sub>: recuo inicial

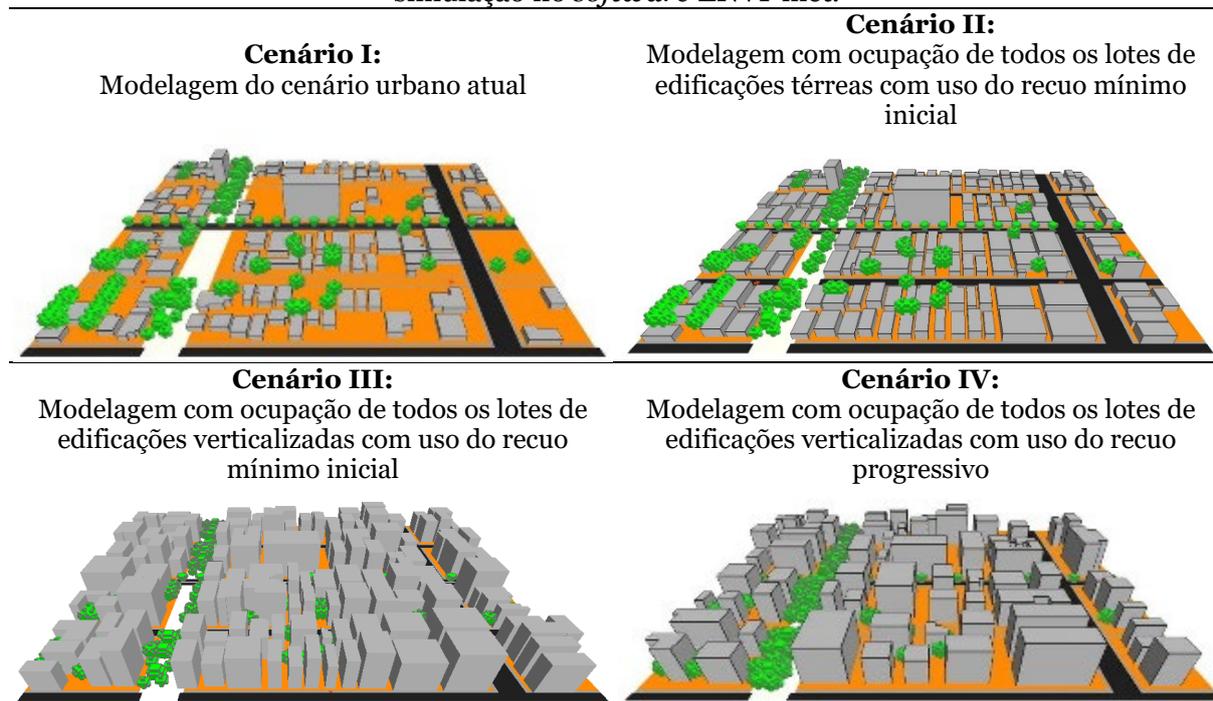
n: nº de pavimentos

Fonte: Autores (2022).

A fim de analisar a influência da morfologia urbana no microclima, foram definidos quatro modelos computacionais, variando os seguintes parâmetros: Cenário I: modelagem do cenário urbano atual; Cenário II: modelagem com ocupação de todos os lotes de edificações térreas com uso do recuo mínimo inicial; Cenário III: modelagem com ocupação de todos os lotes de edificações verticalizadas com uso do recuo mínimo inicial; Cenário IV: modelagem com ocupação de todos os lotes de edificações verticalizadas com uso do recuo progressivo.

As edificações verticalizadas foram implantadas considerando o remembramento de até quatro lotes de 10 m x 30 m. Com relação às propriedades termodinâmicas dos materiais que constituem a superfície urbana, no cenário I foi considerado vias de solo natural, por corresponder ao cenário atual, porém nos demais cenários hipotéticos foram considerados vias asfaltadas, por corresponder a uma tendência futura. Quanto à geometria urbana, a relação H/W variou entre 0,17 (cenários I e II); 1,76 (cenário III); e 1,2 (cenário IV). A presença de vegetação foi mantida em todos os cenários conforme a realidade atual observada em visita *in loco*. Os cenários são apresentados no Quadro 3.

**Quadro 3.** Fração urbana selecionada com os quatro cenários parametrizados para simulação no *software* ENVI-met.



Fonte: Autores (2022).

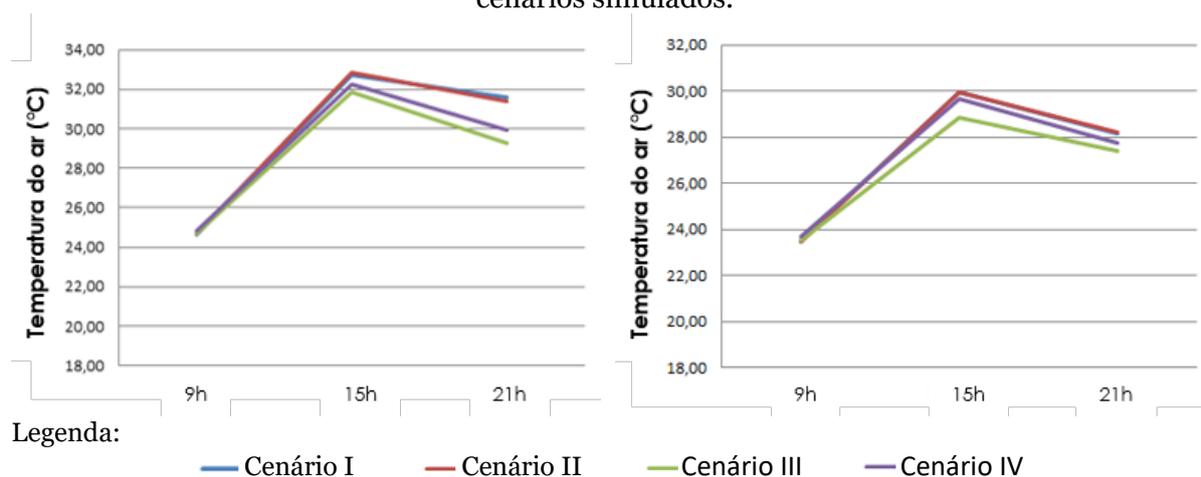
### **Análise dos Resultados**

A análise da influência da morfologia urbana nos diferentes parâmetros microclimáticos deu-se com base nos resultados simulados do ambiente externo a partir dos dados de temperatura do ar e velocidade e direção dos ventos.

#### **Temperatura do ar**

A partir das simulações computacionais foi possível extrair os dados de temperatura do ar máxima e mínima dos cenários nos horários às 9 h, 15 h e 21 h, para análise da variação da temperatura do ar (Figura 3).

**Figura 3.** Gráficos de curva térmica - temperatura do ar máxima e mínima dos quatro cenários simulados.

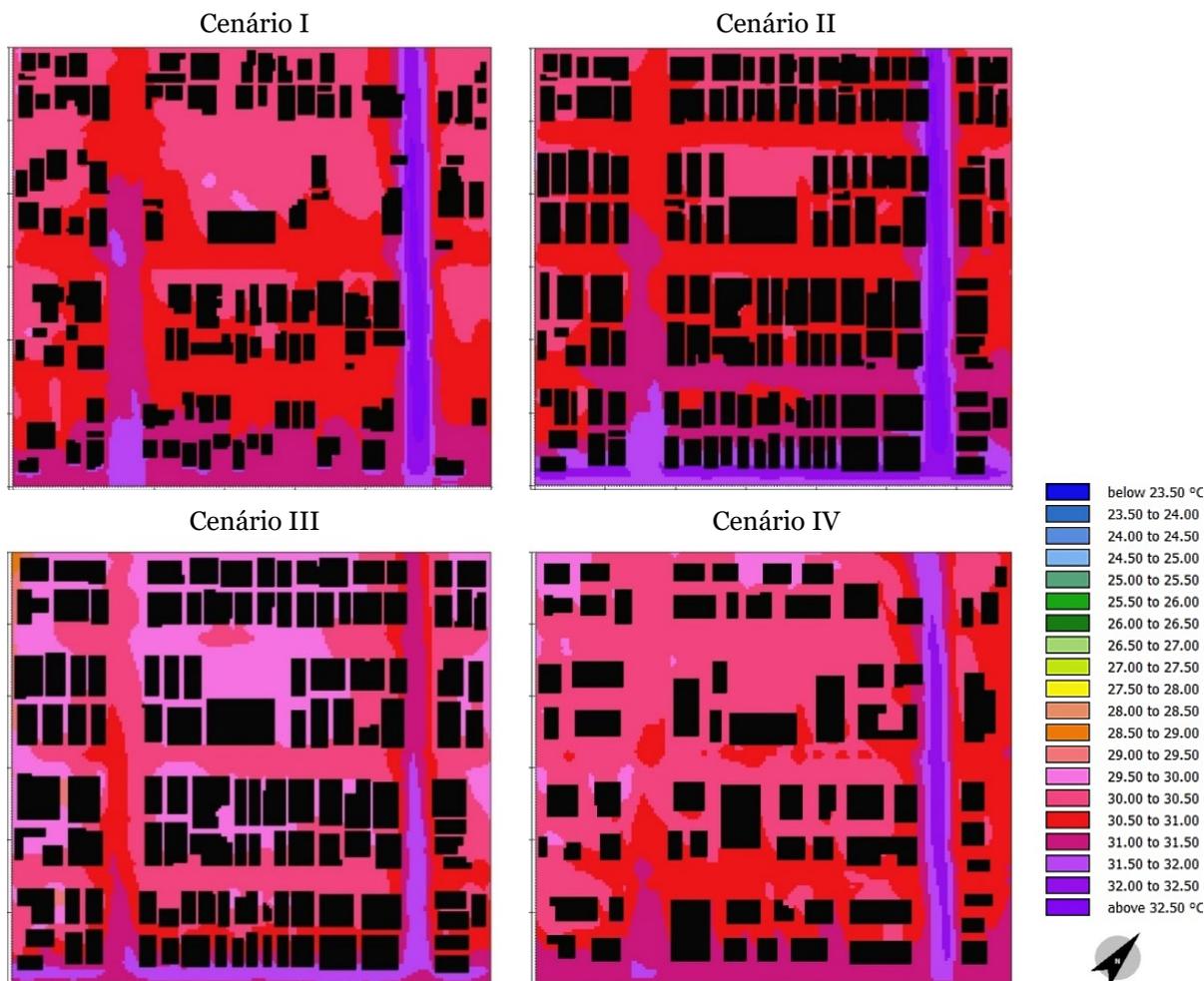


Pode-se verificar que os Cenários I e II apresentaram valores de temperatura do ar mais elevados no horário de aquecimento (às 15 h). Os Cenários III e IV apresentaram diferença de  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  em comparação aos outros cenários especialmente devido ao sombreamento gerado pelas edificações verticalizadas que diminuiu a carga térmica absorvida pela cidade, amenizando seu ganho de calor, contribuindo para o conforto térmico humano. O Cenário III apresentou os valores de temperatura do ar mais baixos, pois o uso do recuo mínimo inicial permitiu que a edificação ocupasse uma maior área do lote, o que gerou maiores áreas de sombra ao comparada ao cenário com uso do recuo progressivo.

Além dos dados quantitativos, a interface Leonardo, vinculado ao *software* ENVI-met, possibilitou realizar análise quali-quantitativa, com a identificação dos pontos mais e menos aquecidos nos cenários simulados em corte a 1,4 m do solo às 15 h, subsidiando a compreensão dos fatores determinantes das condições climáticas locais. Os mapas 2D dos cenários apresentam a influência da morfologia urbana com relação à temperatura do ar (Figura 4).

No Cenário I, a variação de temperatura do ar às 15 h foi de  $29,96\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $32,73\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A disposição das edificações térreas permitiu um maior acesso solar. Assim, as superfícies abertas absorveram maior quantidade de radiação de ondas curtas e refletiram a radiação de ondas mais longas, aumentando a temperatura do ar (Darbani et al., 2021). Com relação às propriedades termodinâmicas dos materiais, os valores máximos de temperatura se distribuíram nas vias asfaltadas de direção noroeste-sudeste e nordeste-sudoeste. A orientação da via influenciou na parcela de radiação solar que penetrou no espaço externo, provocando maior acúmulo de calor. Em contrapartida, no perímetro com presença de vegetação, ocorreu uma diminuição da temperatura do ar em função do sombreamento gerado pelas copas das árvores, além da presença de solo natural (permeável).

**Figura 4.** Mapas 2D de temperatura do ar (°C) nos quatro cenários parametrizados na fração urbana estudada.



Fonte: Autores (2022).

Às 15 h, no Cenário II, a temperatura mínima foi de 29,94 °C e a máxima foi de 32,84°C. O modelo de morfologia urbana aberta ao céu, com edificações térreas, contribui para condições térmicas mais estressantes, corroborando com os estudos de Yahia et al. (2017) e De & Mukherjee (2018). Os valores máximos de temperatura do ar continuam distribuídos nas vias de direção noroeste-sudeste e nordeste-sudoeste, devido à presença de asfalto. Vale ressaltar que a via de sentido sudeste-noroeste, à direita, apresentou altas temperaturas do ar, alcançando 32.5 °C, enquanto a outra via, à esquerda, apresentou temperaturas do ar mais amenas, possivelmente devido à presença de pavimento asfáltico na primeira via, ao passo que na segunda via a cobertura ainda é de solo natural e pela proximidade com espaços arborizados (Área Verde linear Dom Constantino Lüers).

O Cenário III, às 15h, apresentou temperatura mínima de 28,86 °C e máxima de 31,88°C – com resultados mais ameno que os cenários anteriores, devido ao sombreamento causado pelas edificações verticalizadas que amenizou o ganho de calor, diminuindo a temperatura do ar no ambiente e gerando melhores condições de conforto térmico ao ar livre. Esses resultados estão de acordo com Jamei et al. (2016) e Yildirim (2020) que demonstraram

que os cânions mais profundos apresentam menor temperatura do ar em comparação aos cânions urbanos rasos. As vias com revestimento asfáltico permaneceram como pontos onde as temperaturas do ar são mais elevadas, principalmente na via sentido noroeste-sudeste. Também foi possível observar que no interior das quadras as temperaturas chegaram a atingir 31,5 °C, enquanto as quadras próximas a área verde apresentaram temperaturas mais amenas, cerca de 29 °C, evidenciando a importância da adoção de espaços verdes na cidade.

No Cenário IV, às 15 h, a temperatura do ar máxima foi de 29,64 °C e a mínima de 32,23 °C, com valores menores que os Cenários I e II, mas superior ao Cenário III. Esse resultado deve-se possivelmente ao uso do recuo progressivo que gerou uma relação H/W de 1,2, aumentando o acesso solar e diminuindo a área de sombra gerada pelas edificações. A respeito das propriedades termodinâmicas dos materiais, foi possível observar que os maiores valores de temperatura do ar se concentram nos pontos caracterizados pelo revestimento do solo com presença de asfalto e concreto. O perímetro com cobertura de solo natural e presença de vegetação apresenta 30,5 °C de temperatura do ar, o que corresponde a -2°C em comparação da via de mesmo sentido com cobertura de asfalto e sem vegetação, apresentando condições mais favoráveis ao conforto térmico. Assim, torna-se importante optar por revestimentos com melhor albedo e preservar os espaços com vegetação, de forma a garantir conforto térmico na malha urbana.

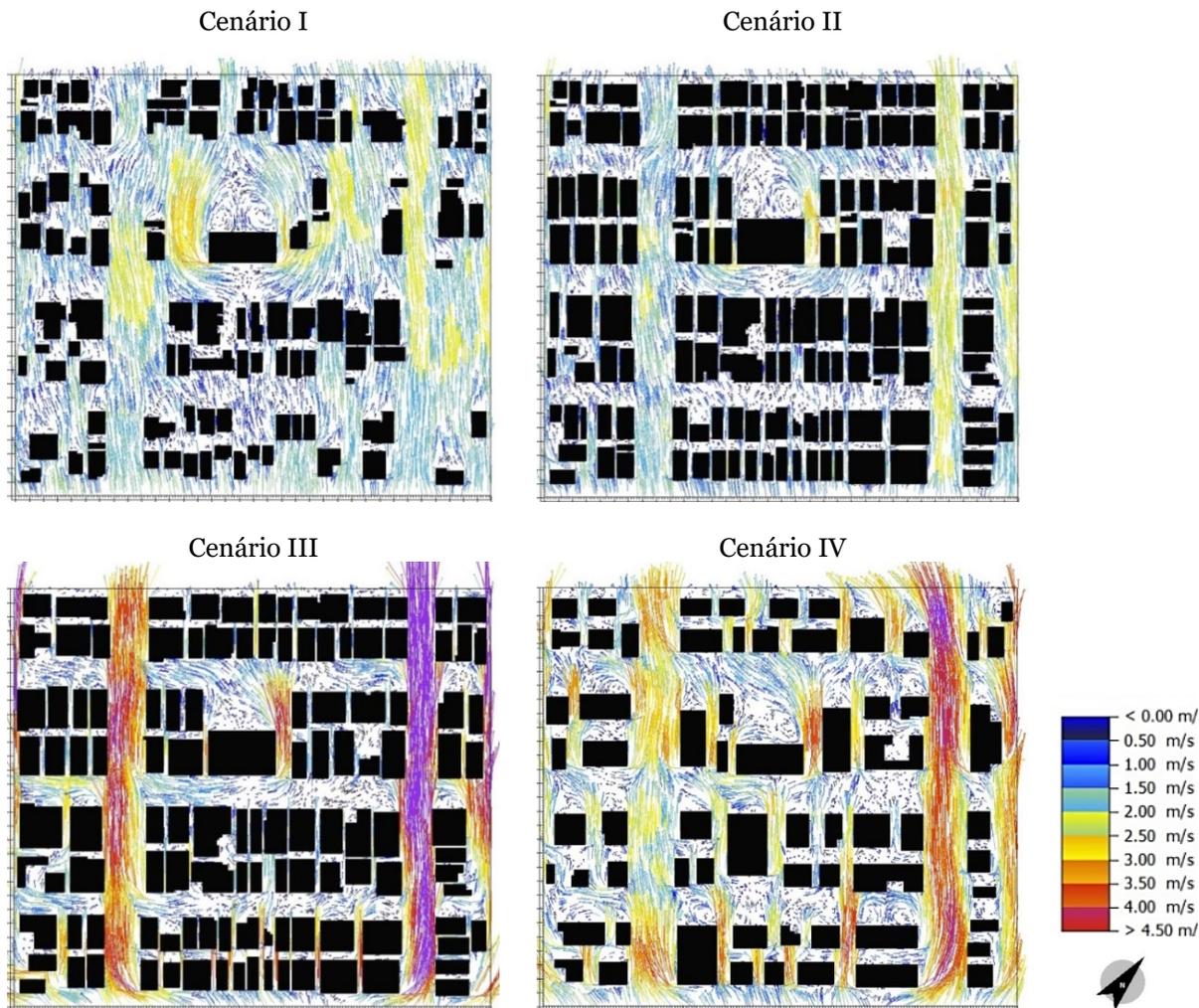
### **Velocidade dos Ventos**

Os resultados de velocidade dos ventos não apresentaram diferenças significativas ao longo do dia, uma vez que a entrada dos dados de vento no modelo se apresenta de maneira constante durante toda simulação, representando uma limitação da versão do *software* usada no estudo. Assim, para análise dos mapas 2D dos modelos simulados foi considerado o horário que corresponde às 15 h por ser o período mais quente do dia (Figura 5).

No Cenário I, observou-se que nas vias de sentido noroeste-sudeste, paralela à direção predominante da ventilação natural, a velocidade dos ventos atingiu 3,0 m/s, visto que a morfologia urbana da fração simulada apresenta baixa rugosidade por apresentar edificações térreas e diversos lotes vazios, resultado em conformidade com Oke (1996). À sotavento das edificações foi possível visualizar diversas áreas com sombra de vento e a velocidade foi praticamente nula.

O Cenário II apresentou um padrão de comportamento dos ventos semelhantes, com algumas modificações. Devido à ocupação de todos os lotes urbanos por edificações térreas, na via de sentido noroeste-sudeste, à direita ocorreu a canalização dos ventos, gerando o aumento da velocidade, contudo, ocasionando estagnação do ar no interior das quadras e nas vias orientadas para o eixo nordeste-sudeste. Observou-se, ainda, significativa perda de velocidade nas áreas à sotavento e a formação de áreas de estagnação de ar devido ao uso do recuo mínimo inicial.

**Figura 5.** Mapas 2D de velocidade do vento (m/s) nos quatro cenários parametrizados na fração urbana estudada.



Fonte: Autores (2022).

O Cenário III apresentou o pior desempenho quanto ao aproveitamento e permeabilidade dos ventos na estrutura urbana. A verticalização das edificações com uso do recuo mínimo inicial formou nas vias de sentido noroeste-sudeste verdadeiros canais de ventilação urbana, com velocidade superior a 4,5 m/s, provocando estagnação do ar no interior das quadras e redução da velocidade dos ventos nas vias com orientação nordeste-sudoeste. Nesse cenário, ficou evidente o efeito da vegetação na via de sentido noroeste-sudeste à esquerda.

A adoção do recuo progressivo nas edificações verticalizadas interferiu diretamente na geometria do cânion urbano que se conforma a partir da verticalização das edificações às margens das vias (Nicholson, 1975). O maior espaçamento entre as edificações gerou condições favoráveis para o desempenho da ventilação natural na fração urbana, com resultado semelhante ao obtido no estudo de Ramyar et al. (2019). O efeito da canalização dos ventos nas vias de sentido nordeste-sudoeste diminuiu significativamente. Quanto à permeabilidade dos ventos no interior das quadras, observou-se menores zonas de sombra de vento. De &

Mukherjee (2018) afirmaram que a maior velocidade do vento melhora as condições de conforto térmico exterior e a ventilação passiva dos edifícios, contribuindo para a dispersão de poluentes pela mistura do ar.

### **Considerações Finais**

A fim de obter cidades resilientes e sustentáveis é imprescindível a aplicação dos princípios do urbanismo bioclimático no processo de planejamento urbano. Em regiões de clima tropical de savana, com predominância de períodos quentes, a importância de analisar o impacto da morfologia urbana no microclima torna-se ainda mais imprescindível, devido às altas temperaturas.

A análise dos cenários simulados a partir de uma fração urbana com tendência à verticalização na cidade de Arapiraca, possibilitou a compreensão de como a morfologia urbana pode interferir no microclima e, conseqüentemente, no conforto térmico ao ar livre. As propriedades termodinâmicas dos materiais influenciaram diretamente na temperatura do ar, regulando os ganhos de calor. Com o aquecimento do ar, ocorre também alterações nos fenômenos de trocas térmicas (Krüger & Gonzalez, 2016).

A orientação das vias interferiu na temperatura do ar devido ao acesso solar e à quantidade de horas de exposição à radiação solar direta e na velocidade dos ventos, com relação à direção predominante dos ventos que determinou o grau de permeabilidade da forma urbana e a velocidade dos ventos nas vias do traçado viário local. Para estudos futuros, seria importante a adição de como a orientação da ventilação perpendicular ao traçado viário pode influenciar no desempenho do microclima.

A relação H/W também apresentou influência na temperatura do ar, devido ao sombreamento gerado pelas edificações verticalizadas, assim como o grau de permeabilidade dos ventos. Em realidade de clima tropical de savana ficou claro que, na hierarquia das estratégias bioclimáticas locais, o sombreamento tem maior impacto no microclima e no conforto térmico ao ar livre, o que corrobora com o estudo de Yahia et al. (2017). Contudo, torna-se importante o aprofundamento do presente estudo a fim de equilibrar a aplicação das duas estratégias: sombreamento e ventilação natural.

Por fim, pode-se ainda destacar que a vegetação surgiu como elemento atenuante das altas temperaturas por apresentar condições mais favoráveis quanto às propriedades termodinâmicas, como também pelo favorecimento do sombreamento ao nível do pedestre, sem interferir significativamente na permeabilidade dos ventos. Assim, destaca-se a importância do estudo do microclima urbano com relação à morfologia das cidades, a fim de proporcionar qualidade ambiental para os habitantes da urbe.

## REFERÊNCIAS

- Alchapar, N. L., Pezzuto, C. C. & Correa, E. N. (2018). Parámetros urbanos morfo-materiales y su correlación con las temperaturas de aire en verano. *Ambiente Construído*, 18 (4), 199-213. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000400301>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M. & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22 (6), 711-728. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Baruti, M. M., Johansson, E. & Astrand, J. (2019). Review of studies on outdoor thermal comfort in warm humid climates: challenges of informal urban fabric. *Int J. Biometeorol.*, 63 (10), 1449-1462. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01757-3>
- Bruse, M. & Fleer, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three-dimensional numerical model. *Environmental Software and Modelling*, 13 (3-4), 373-384. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)
- Bruse, M. (2022). ENVI-met Website. <http://www.envi-met.com>
- Darbani, E. S., Parapari, D. M., Boland, J. & Sharifi, E. (2021). Impacts of urban form and urban heat island on the outdoor thermal comfort: a pilot study on Mashhad. *International Journal of Biometeorology*, 65, 1101-1117. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02091-3>
- Davtalab, J., Deyhimi, S.P., Dessi, V., Hafezi, M.R. & Adib, M. (2020). The impact of green space structure on physiological equivalent temperature index in open space. *Urban Clim.*, 31, 100574. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100574>
- De, B. & Mukherjee, M. (2018). Optimisation of canyon orientation and aspect ratio in warm-humid climate: Case of Rajarhat Newtown, India. *Urban Climate*, 24, 887-920. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.11.003>
- Emmanuel, R. (2005). *An urban approach to climate sensitive design: Strategies for the tropics*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.4324/9780203414644>
- Emmanuel, R. (2016). *Urban climate challenges in the tropics*. In: Emmanuel, R. (Ed.), *Urban climate challenges in the tropics: Rethinking planning and design opportunities*. Imperial College Press.
- Higueras, E. (1998). *Urbanismo bioclimático: Criterios medioambientales en la ordenación de asentamientos*. Cuadernos de Investigación Urbanística, Instituto Juan de Herrera.
- IBGE. (2010). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Alagoas. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/panorama>
- Jamei, E., Rajagopalan, P., Seyedmahmoudian, M. & Jamei, Y. (2016). Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Energy Rev.*, 54, 1002-1017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.104>
- Jauregui, E. & Romales, E. (1996). Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmos. Environ.*, 30 (20), pp. 3383-3389. [http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310\(96\)00041-6](http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310(96)00041-6)
- Johansson, E. (2017). Outdoor thermal comfort in public space in warm-humid Guayaquil, Ecuador. *Int. J. Biometeorol.* <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-017-1329-x>
- Kravicik, M., Pokorný, J., Kohutiar, J., Kovác, M. & Tóth, E. (2008). Water for the Recovery of the Climate- a new Water Paradigm. 1-94. [http://www.waterparadigm.org/download/Water\\_for\\_the\\_Recovery\\_of\\_the\\_Climate\\_A\\_New\\_Water\\_Paradigm.pdf](http://www.waterparadigm.org/download/Water_for_the_Recovery_of_the_Climate_A_New_Water_Paradigm.pdf)
- Krüger, E. L. & Gonzalez, D. E. G. (2016). Impactos da alteração no albedo das superfícies no microclima e nos níveis de conforto térmico de pedestres em cânions urbanos. *Ambiente Construído*, 16 (3), 89-106. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300094>
- Leal, L. P. S. & Barbosa, R. V. R. (2022). Conforto térmico em cânions urbanos verticalizados de cidade litorânea em clima tropical quente e úmido. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC, 19, 2022, Canela. <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2063/1893>
- Lei Municipal nº 2.220 (2001). Código de Obras e Edificações no Município de Arapiraca. [https://web.arapiraca.al.gov.br/wp-content/uploads/2019/03/LEI22202001INSTITUIOCODIGODEOBRASEEDIFICAESNOMUNICIPIODEARAPIRACA\\_1.pdf](https://web.arapiraca.al.gov.br/wp-content/uploads/2019/03/LEI22202001INSTITUIOCODIGODEOBRASEEDIFICAESNOMUNICIPIODEARAPIRACA_1.pdf)
- Lei Municipal nº 5.593 (2007). Código de Urbanismo e Edificações do Município de Maceió. [http://www.sedet.maceio.al.gov.br/servicos/pdf/codigo\\_edificacoes/00\\_lei\\_municipal\\_5593.pdf](http://www.sedet.maceio.al.gov.br/servicos/pdf/codigo_edificacoes/00_lei_municipal_5593.pdf)
- Minella, F. C. O. & Krüger, E. L. (2017). Proposição do índice “fração vegetada” e sua relação com alterações na temperatura do ar e no conforto térmico no período diurno e em situação de

- verão para Curitiba. *Ambiente Construído*, 17 (1), 353-371. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100139>
- Muniz-Gaal, L. P., Pezzuto, C. C., Carvalho, M. F. H. de & Mota, L. T. M. (2020). Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate. *Building and Environment*, 169, 106547. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106547>
- Nakata-Osaki, C. M., Souza, L. C. L. de & Rodrigues, D. S. (2016). Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. *Ambiente Construído*, 16 (3), 73-87. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300093>
- Nicholson, S. E. (1975). A pollution model for street level air. *Atmospheric Environment*, 9 (1), 19-31.
- Oke, T. R. (1996). *Boundary layer climates*. (2ª ed.). Routledge.
- Oke, T.R. (1988). The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, 2 (4), 1988, 471- 508.
- ONU (2022). Organização das Nações Unidas. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>
- Pereira, J. D. S.; Brandão. L. K. de V. & Barbosa, R. V. R. (2021). Análise da distribuição espacial de áreas verdes urbanas na qualidade térmica em região de clima semiárido. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 7, 12019-01, 2021. <https://doi.org/10.18540/jcecvl7iss1pp12019-01-09e>
- R. Ramyar, A. Ramyar, Kialashaki, Y., Bryant, M. & H. Ramyar. (2019). Exploring reconfiguration scenarios of high-density urban neighborhoods on urban temperature-The case of Tehran (Iran). *Urban Forestry & Urban Greening*, 44, 126398. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126398>
- Romero, M. A. B. (2001). *Arquitetura bioclimática do espaço público*. Brasília, Editora UnB.
- Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B.L., Kurn, D.M., Sailor, D.J. & Taha, H. (1995). Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energ. Build.*, 22 (3), 255-265. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00927-P](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(95)00927-P).
- Rui, L., Buccolieri, R., Gao, Z., Gatto, E. & Ding, W. (2019). Study of the effect of green quantity and structure on thermal comfort and air quality in an urban-like residential district by ENVI-met modelling. *Build Simul.*, 12 (2), 183-194. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0498-9>
- Shinzato, P. & Duarte, D. H. S. (2018). Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera. *Ambiente Construído*, 18 (2), 197215. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000200250>
- Silva, M. F. da, & Barbosa, R. V. R. (2022). Regime de ventos em cidades de diferentes regiões geográficas de Alagoas a partir de dados meteorológicos recentes. *Revista Brasileira de Climatologia*, 31(18), 509-538. <https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15606>
- Silva, M. F. da. (2019). *Estratégias bioclimáticas para seis cidades alagoanas: contribuições para a adequação da arquitetura ao clima local*. [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Alagoas]. Repositório Institucional da UFAL. <http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/5791>
- Tork, L. D., Tibiriçá, A. C. G. & Tibiriçá, Á. M. B. (2017). Análise da ventilação natural conforme planos diretores: resultados de pesquisa em Belém, PA. *Ambiente Construído*, 17 (1), 329-351. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100138>
- Torres, S. C. (2017). *Forma e Conforto: estratégias para (re)pensar o adensamento construtivo urbano a partir dos parâmetros urbanísticos integrados à abordagem bioclimática*. [Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco]. Repositório Digital da UFPE. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/22459>
- Vasilikou, C. & Nikolopoulou, M. (2019). Outdoor thermal comfort for pedestrians in movement: thermal walks in complex urban morphology. *Int J Biometeorol* (Special Issue: Subjective approaches to thermal perception), 64, 277-291. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01782-2>
- Xu, M., Hong, B., Mi, J. & Yan, S. (2018). Outdoor thermal comfort in an urban park during winter in cold regions of China. *Sustain Cities Soc.*, 43, 208-220. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.034>
- Yahia, M.W., Johansson, E., Thorsson, S., Lindberg, F. & Rasmussen, M.I. (2017). Effect of urban design on microclimate and thermal comfort out-doors in warm-humid Dar es Salaam, Tanzania. *Int J Biometeorol*, 62, 373-385. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1380-7>
- Yang, S.-R. & Lin, T.-P. (2016). An integrated outdoor spaces design procedure to relieve heat stress in hot and humid regions. *Building and Environment*, 99, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.001>
- Yıldırım, M. (2020). Shading in the outdoor environments of climate-friendly hot and dry historical streets: the passageways of Sanliurfa, Turkey. *Environ Impact Assess Rev.*, 80, 106318. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106318>