



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CIRLANE RODRIGUES NOGUEIRA

**ILHAS DE CALOR URBANAS E DESIGUALDADE SOCIOESPACIAL: EFEITOS DO
USO DO SOLO E PAVIMENTAÇÃO NO MICROCLIMA**

FORTALEZA

2026

CIRLANE RODRIGUES NOGUEIRA

ILHAS DE CALOR URBANAS E DESIGUALDADE SOCIOESPACIAL: EFEITOS DO
USO DO SOLO E PAVIMENTAÇÃO NO MICROCLIMA

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Verônica T.F. Castelo
Branco, Ph.D.

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N711i Nogueira, Cirlane Rodrigues.

Ilhas de calor urbanas e desigualdade socioespacial : efeitos do uso do solo e pavimentação no microclima / Cirlane Rodrigues Nogueira. – 2026.
72 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2026.

Orientação: Profa. Dra. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.

1. Microclima urbano. 2. Ilhas de calor urbanas. 3. Desigualdade social. 4. Pavimentação. 5. Envi-met. I. Título.

CDD 620

CIRLANE RODRIGUES NOGUEIRA

ILHAS DE CALOR URBANAS E DESIGUALDADE SOCIOESPACIAL: EFEITOS DO
USO DO SOLO E PAVIMENTAÇÃO NO MICROCLIMA

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Verônica T.F. Castelo
Branco, Ph.D.

Aprovada em: 16/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Verônica T.F. Castelo Branco, Ph.D. (orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira (examinador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Marina de Almeida Gomes Soriano
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Renan Cid Varela Leite (examinador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

“Tudo é graça.”

Santa Teresinha do Menino Jesus

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho representa o encerramento de uma etapa mais importantes da minha vida e a realização de um sonho, e não teria sido possível sem o apoio de diversas pessoas.

Deixo aqui, primeiramente, a minha profunda gratidão aos meus pais, pelo apoio incondicional. Mesmo sem terem tido a oportunidade de concluir o ensino básico, sempre me ensinaram que, por meio do estudo, é possível transformar a própria realidade e alcançar lugares antes inimagináveis. Obrigada por renunciarem a tanto para me proporcionar oportunidades e por acreditarem em mim. Maria da Conceição, Francisco Crispim e Cynthia Maria, vocês são a minha maior inspiração, e este momento também é de vocês, pois cada passo dado até aqui é fruto de tudo o que fizeram por mim.

À Francisco Sobrinho, que esteve sempre ao meu lado, compartilhando cada conquista e tornando mais leves os momentos difíceis. Obrigada por ser meu porto seguro, por acreditar no meu potencial mesmo quando eu duvidei, por me apoiar com paciência, escuta e incentivo, e por me impulsionar a seguir em frente, buscando sempre dar o melhor de mim em cada desafio.

Agradeço à minha querida orientadora, Verônica Castelo Branco, por todos os ensinamentos ao longo deste percurso. Sinto-me privilegiada por tê-la como exemplo de professora, pesquisadora e mulher, cujas qualidades transcendem as barreiras acadêmicas. Obrigada por sua atenção, paciência, acolhimento e imensa generosidade.

À Marina Soriano, pela orientação, paciência e pelo apoio constante ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação e sensibilidade foram fundamentais para a realização da pesquisa.

Não posso deixar de mencionar meus queridos amigos, Allef Sandro, Alanna Sarah, Walisson Vasconcelos, Roberto Filho e Jonnata Angelo, verdadeiros presentes que a Engenharia Civil me proporcionou ao longo dessa trajetória. Sem vocês, a jornada teria sido muito mais árdua. Muito obrigada por todas as risadas, pelo suporte emocional, pelas conversas motivacionais e, em muitos momentos, por exercerem o papel de verdadeiros “psicólogos”. Agradeço também àqueles que não foram citados aqui, mas que carregam com muito carinho em meu coração.

RESUMO

O crescimento urbano acelerado nas grandes metrópoles brasileiras, como Fortaleza, tem provocado transformações na paisagem urbana, impactando diretamente o ambiente e a qualidade de vida da população. Um dos efeitos mais relevantes desse processo é a intensificação das Ilhas de Calor Urbanas (ICUs), fenômeno que decorre de diversos fatores, dentre eles podem-se citar: concentração de superfícies impermeáveis, uso de materiais com baixa refletância e escassez de vegetação. Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo verificar a influência da morfologia urbana, pavimentação e cobertura vegetal no microclima de áreas com diferentes perfis de vulnerabilidade social. Para isso, dois trechos viários localizados ao longo da linha de ônibus 052 – Grande Circular, em Fortaleza, foram utilizados como estudo de caso. Foram realizadas medições microclimáticas em campo e simulações no *software* ENVI-met, incluindo cenários reais e paramétricos com pavimento refletivo (albedo 0,25), incremento de vegetação e combinação de ambas as estratégias. Os resultados indicaram que o trecho localizado em área de menor IDH apresentou temperaturas do ar superiores às do trecho em área de maior IDH ao longo do dia, com diferenças superiores a 4°C nos horários de pico de aquecimento. Nesse mesmo período, observou-se ainda uma diferença de aproximadamente 16% nos valores de umidade relativa do ar. As simulações indicaram reduções discretas, na ordem de décimos de grau, mais evidentes no cenário híbrido, enquanto o pavimento refletivo aplicado isoladamente não gerou melhoria térmica no trecho de menor IDH. Conclui-se que as condições microclimáticas refletem desigualdades urbanas e que estratégias combinadas de vegetação e pavimentação refletiva tendem a apresentar melhor desempenho na mitigação do aquecimento urbano.

Palavras-chave: microclima urbano; ilhas de calor urbanas; desigualdade social; pavimentação; ENVI-met.

ABSTRACT

Rapid urban growth in major Brazilian metropolises, such as Fortaleza, has led to transformations in the urban landscape, directly impacting the environment and the population's quality of life. One of the most significant effects of this process is the intensification of urban heat islands (UHIs), a phenomenon resulting from several factors, including: concentration of impermeable surfaces, use of materials with low reflectance, and scarcity of vegetation. In this context, this study aims to verify the influence of urban morphology, paving, and vegetation cover on the microclimate of areas with different profiles of social vulnerability. To this end, two road sections located along the 052 bus line – Grande Circular, in Fortaleza, were used as case studies. Microclimatic measurements were carried out in the field and simulations were performed using the ENVI-met software, including real and parametric scenarios with reflective pavement (albedo 0.25), increased vegetation, and a combination of both strategies. The results indicated that the section located in an area with a lower HDI (Human Development Index) presented higher air temperatures than the section in an area with a higher HDI throughout the day, with differences exceeding 4°C during peak heating hours. During the same period, a difference of approximately 16% was also observed in relative humidity values. The simulations indicated discrete reductions, on the order of tenths of a degree, more evident in the hybrid scenario, while the reflective pavement applied in isolation did not generate thermal improvement in the section with the lower HDI. It is concluded that microclimatic conditions reflect urban inequalities and that combined strategies of vegetation and reflective paving tend to perform better in mitigating urban warming.

Keywords: urban microclimate; urban Heat Islands; social inequality; pavement; ENVI-met.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Identificação dos valores de HI de cada bairro a cada hora	22
Figura 2	– Detalhamento dos cenários dos simulados no software ENVI-met	27
Figura 3	– Fluxograma das etapas metodológicas	31
Figura 4	– Mapa da Cidade de Fortaleza.....	33
Figura 5	– Itinerário do Grande Circular (Linha 052)	35
Figura 6	– Limite do bairro Meireles e sua configuração urbana.....	37
Figura 7	– Limite do bairro Jacarecanga e sua configuração urbana.....	38
Figura 8	– Ilustração do abrigo do sensor termo-higrômetro.....	40
Figura 9	– Utilização da câmera térmica flir	41
Figura 10	– Instrumento e aplicação do método de medição de temperaturas superficiais em campo.....	42
Figura 11	– Cenários paramétricos dos trechos 10 e 17.....	46
Figura 12	– Caracterização dos Elementos Urbanos no trecho 17.....	49
Figura 13	– Caracterização dos Elementos Urbanos no trecho 10.....	50
Figura 14	– Evolução do campo térmico no Trecho 10 ao longo do dia	57
Figura 15	– Evolução do campo térmico no Trecho 17 ao longo do dia.....	58
Figura 16	– Distribuição espacial da temperatura do ar no Trecho 10 para os quatro cenários simulados, entre 10:00 e 18:00.....	64
Figura 17	– Distribuição espacial da temperatura do ar no Trecho 17 para os quatro cenários simulados, entre 10:00 e 18:00.....	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Médias dos valores obtidos para a temperatura do ar (oC) nas simulações para os diferentes cenários ao longo do dia 11 de setembro de 2018.....	28
Gráfico 2	– Médias dos valores obtidos para a umidade relativa do ar (oC) nas simulações para os diferentes cenários ao longo do dia 11 de setembro de 2018.....	28
Gráfico 3	– Temperatura dos elementos urbanos nos trechos 10 e 17 às 13 horas.....	53
Gráfico 4	– Variação horária da temperatura do ar nos cenários simulados no Trecho 10.....	60
Gráfico 5	– Variação horária da temperatura do ar nos cenários simulados no Trecho 17.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do terreno quanto ao comprimento de rugosidade.....	30
Tabela 2 – Critérios de escolha analisados para a definição dos trechos a serem estudados.....	36
Tabela 3 – Materiais utilizados para caracterizar a modelagem no ENVI-met.....	43
Tabela 4 – Perfil térmico dos elementos urbanos no trecho 10.....	51
Tabela 5 – Perfil térmico dos elementos urbanos no trecho 17.....	52
Tabela 6 – Temperatura do ar nos trechos 10 e 17.....	55
Tabela 7 – Umidade relativa do ar nos trechos 10 e 17.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEM	<i>Bias Error Mean</i>
COP	Conferência das Partes
HI	<i>Heat Index</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICU	Ilhas de Calor Urbanas
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
NWS	<i>National Weather Service</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
PCD	Pontos de Coleta de Dados
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geodésico para as Américas
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
ZEIS	Zonas Especiais de Interesse Social
ZIT	Zona de Interesse Turístico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problema e Questões Motivadoras.....	16
1.1.1	Problema Motivador.....	16
1.1.2	Questões Motivadoras.....	17
1.2	Justificativa.....	17
1.3	Objetivos.....	18
1.3.1	Objetivo Geral.....	18
1.3.2	Objetivos Específicos.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Microclima.....	19
2.1.1	Microclima da Cidade de Fortaleza.....	20
2.2	Materiais que Superaquecem as Cidades.....	23
2.3	Métodos de Resfriamento de Regiões com Formação de ICUs.....	24
2.4	Simulação Utilizando o Software Envi-met.....	26
2.4.1	Parâmetro de Calibração.....	30
3	MÉTODO.....	31
3.1	Caracterização da Área de Estudo.....	33
3.1.1	Definição das Áreas de Estudo.....	34
3.1.1.1	Trecho 17.....	37
3.1.1.2	Trecho 10.....	38
3.2	Definição Temporal e Seleção do Dia a Ser Simulado.....	39
3.3	Levantamento de Dados.....	40
3.3.1	Coleta de Dados em Campo.....	40
3.3.2	Geometria Urbana.....	43
3.4	Simulações Computacionais.....	44
3.4.1	Modelagem do Cenário Real.....	44
3.4.2	Modelagem dos Cenários Paramétricos.....	46
94	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1	Caracterização dos Elementos Urbanos Observados em Campo.....	48
4.1.1	Trecho 17.....	48

4.1.2	Trecho 10.....	50
4.2	Análise do Comportamento Térmico dos Elementos Urbanos.....	51
4.2.1	Perfil Diário e Picos de Temperatura Superficial.....	51
4.2.2	Dinâmica de Resfriamento e Amplitude Térmica.....	54
4.3	Monitoramento das Variáveis Atmosféricas.....	54
4.3.1	Variação da Temperatura do Ar nos Trechos.....	54
4.3.2	Umidade Relativa do Ar.....	55
4.3.3	Imagens Térmicas.....	56
4.4	Simulação.....	59
4.4.1	Análise das Temperaturas do Ar a Partir do Receptor.....	60
4.4.1.1	Trecho 10.....	60
4.4.1.2	Trecho 17.....	61
4.4.2	Distribuição Espacial da Temperatura do Ar nos Cenários Simulados.....	63
4.5	Diferenças Microclimáticas entre Áreas Urbanas com Distintos Níveis de IDH.....	67
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
	REFERÊNCIAS	71

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento urbano acelerado provocou transformações no espaço geográfico, sobretudo em cidades de países em desenvolvimento, onde a urbanização ocorreu de forma desordenada e não sustentável. Esse processo resultou na formação de grandes aglomerados urbanos, caracterizados pela elevada concentração populacional, pela formação de favelas e habitações irregulares, pelo aumento da poluição e pela intensa utilização dos recursos naturais (BRASIL ESCOLA, 2025).

Segundo Alves (2010), os grandes aglomerados urbanos acabam gerando um clima urbano próprio, resultado da interferência de diversos fatores que atuam sobre a camada limite da cidade e provocam alterações nas condições climáticas em escala local. Uma das manifestações mais significativas do acúmulo de calor no ambiente urbano é o fenômeno das Ilhas de Calor Urbanas (ICUs). Essas ilhas se configuram como anomalias térmicas originadas pelas diferenças no balanço de energia entre áreas urbanas e rurais, apresentando variações nas dimensões horizontal, vertical e temporal (OKE, 1982). A intensificação das ICUs está diretamente associada a características do espaço construído, tais como: escassez de vegetação, predomínio de superfícies impermeáveis, uso de materiais com baixa refletância solar e conformação da geometria urbana, o que dificulta a dissipação do calor e reduz a velocidade de circulação dos ventos (GARTLAND, 2011).

Entre os elementos que intensificam as ICUs, destacam-se a escolha e o uso de materiais de baixa refletância e elevada capacidade de absorção e retenção de calor no ambiente construído. Uma exemplificação dessa dinâmica, é o pavimento com revestimento em concreto asfáltico, muito presente em centros urbanos, que ilustra bem essa problemática. Esse material possui um albedo de cerca de 0,10, grandeza que expressa a fração da radiação solar incidente que é refletida por uma superfície, o que corresponde a baixa refletância, e capacidade de retenção térmica, podendo atingir temperaturas superiores a 65 °C sob a incidência solar durante o verão, sendo considerado um dos componentes mais quente da paisagem urbana (GARTLAND, 2011).

Segundo a *United Nations Environment Programme* (UNEP), as áreas urbanas registram aumento de temperatura em ritmo aproximadamente duas vezes superior à média

global em decorrência do processo acelerado de urbanização e da intensificação do efeito de ICU (UNEP e Cool Coalition, 2021). Nesse cenário, a dependência crescente de sistemas de climatização artificial não se apresenta como uma solução sustentável, uma vez que o uso de aparelhos de ar-condicionado e ventiladores já representa cerca de 20% do consumo total de eletricidade em edificações em escala global, além de ampliar a pressão sobre os sistemas elétricos e as emissões associadas à geração de energia (IEA, 2018).

No entanto, a infraestrutura urbana também pode ser entendida como uma das ferramentas mais eficazes para reduzir as temperaturas nas cidades, sem a necessidade de recorrer a meios artificiais, cujo uso está associado a elevados consumos de energia. Nesse sentido, o foco passa a ser a chamada infraestrutura de superfície, que reúne os espaços onde a cidade construída entra em contato direto com a atmosfera, como pavimentos, fachadas, coberturas e áreas abertas, influenciando diretamente as condições térmicas do ambiente urbano. Entre as principais soluções adotadas para promover o resfriamento urbano estão os pavimentos frios, os telhados claros, as ruas com maior presença de árvores, os pavimentos permeáveis e os corpos d'água, que contribuem para a redução das temperaturas e para a melhoria do conforto térmico nas áreas urbanas (WESLEY *et al.*, 2025).

1.1 Problema e Questões Motivadoras

1.1.1 - Problema Motivador

O avanço acelerado da urbanização em Fortaleza intensificou a impermeabilização do solo e a modificação da paisagem, impactando diretamente o equilíbrio térmico urbano. A expansão desordenada da cidade, marcada por contrastes na infraestrutura e nas condições socioeconômicas entre bairros centrais e periféricos, gera ambientes urbanos com diferentes níveis de conforto térmico. Nesses espaços, a predominância de pavimentos asfálticos e a baixa arborização favorecem a formação de ICUs, fenômeno que afeta de forma desigual as populações, acentuando vulnerabilidades sociais.

No caso de Fortaleza, a malha viária exerce papel central nesse processo, uma vez que vias e calçadas cobrem grande parte da superfície urbana e concentram materiais de alta absorção térmica. Assim, compreender de que maneira a configuração urbana e as características dos pavimentos influenciam o microclima em áreas com diferentes Índices de

Desenvolvimento Humano (IDHs) torna-se importante para identificar os fatores que ampliam o desconforto térmico e propor estratégias de mitigação.

1.1.2 - Questões Motivadoras

1. De que maneira os diferentes usos e ocupações do solo influenciam os padrões de temperatura da superfície urbana?
2. A soma dos efeitos gerados pelos pavimentos com alta refletância e a existência de vegetação urbana potencializa a mitigação do calor em áreas densamente urbanizadas?
3. A desigualdade socioespacial, mensurada pelo IDH manifesta-se em uma disparidade térmica significativa, resultando em ICUs mais intensas nos bairros de menor IDH?

1.2 Justificativa

O crescimento urbano em Fortaleza, quarta cidade mais populosa do Brasil e segunda capital mais populosa do Nordeste (IBGE, 2024), gera desafios relacionados à qualidade de vida da população, especialmente no que se refere às alterações microclimáticas. Fatores relacionados a infraestrutura viária e a mobilidade, como a densidade da malha viária e a predominância de pavimentos com alta capacidade de retenção térmica contribuem para o acúmulo de calor.

Juntamente com a escassez de áreas verdes, este cenário dificulta a dissipação térmica, aumenta a intensidade das ICUs e eleva a necessidade de climatização artificial, com impactos diretos no consumo energético e na saúde da população. Além disso, a distribuição desigual desses elementos no espaço urbano tende a acentuar as diferenças entre regiões centrais e periféricas, refletindo as desigualdades socioeconômicas.

Diante desse quadro, torna-se importante investigar de que maneira os diferentes tipos de ocupação e as características da infraestrutura urbana, como o tipo de pavimentação, contribuem para o aquecimento, uma vez que essas alterações térmicas impactam diretamente

na qualidade de vida da população. Portanto, este estudo se justifica pela necessidade de aprofundar a compreensão da relação entre ocupação urbana, pavimentação e microclima em escala local. Ao identificar padrões térmicos em diferentes trechos da cidade, o trabalho busca fornecer subsídios que possam auxiliar futuras análises e discussões relacionadas ao planejamento urbano e à melhoria das condições climáticas em Fortaleza.

1.3 Objetivos

1.3.1 - Objetivo Geral

Verificar a influência da morfologia urbana, pavimentação e cobertura vegetal no microclima de áreas com diferentes perfis de vulnerabilidade social.

1.3.2 - Objetivos Específicos

1. Analisar como as diferentes configurações morfológicas influenciam o comportamento térmico local, com base em simulações microclimáticas;
2. Verificar a influência das propriedades térmicas dos pavimentos e o papel da vegetação urbana na mitigação do calor em áreas densamente urbanizadas de Fortaleza;
3. Analisar a correlação entre os níveis de IDH e a intensidade das ICUs nos trechos estudados, a partir da comparação de dados térmicos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Microclima

De acordo com Freitas (2018), o clima urbano configura-se como um sistema dinâmico e complexo, composto por múltiplas variáveis que interagem de forma direta e indireta com o ambiente. Alterações na paisagem, adensamentos urbanos, supressão da vegetação, impermeabilização do solo (através da infraestrutura de transportes, principalmente) e intensificação do fluxo de veículos são alguns dos fatores que podem alterar o microclima de uma região (AMORIM, 2000).

Estudos, como o de Paula *et al.* (2016), que buscaram avaliar os impactos de intervenções urbanas na cidade de Cuiabá, demonstram que estas influenciaram o microclima da cidade. Essas variações nos valores de temperatura do ar e umidade foram ocasionadas pelas intervenções referentes a mobilidade urbana, tais como: alargamento e construção de novas vias, redução da dimensão de canteiros centrais, além do aumento da área edificada e ampliações de centros comerciais. Ao comparar os dados antes (2012) e após (2016) a realização das intervenções, observa-se a influência dessas alterações no aumento da temperatura do ar, com variação máxima de 1,86°C e mínima de 0,55°C em alguns pontos, e na redução da umidade relativa do ar em aproximadamente 10% no ponto máximo.

Em Recife-PE, Nóbrega e Vital (2010) analisaram quatro pontos com características distintas; são eles: i) Ponto 1 - menor quantidade de edifícios e presença de vegetação; ii) Ponto 2 - situado no cruzamento entre uma via arterial (Av. Conde da Boa Vista) e uma via coletora (Rua do Hospício), o local é cercado por edifícios com mais de 10 andares e apresenta intenso fluxo de veículos e pedestres.; iii) Ponto 3 – muito adensado, sem arborização e pouca entrada de brisa; e, iv) Ponto 4 – localizado em uma periferia arborizada. Ao final foi observado que os pontos localizados na Av. Conde da Boa Vista (pontos 1, 2 e 3) apresentaram temperaturas cerca de 20% superiores às coletadas, no período matutino, no Ponto 4. No período vespertino, foi observado equilíbrio nas temperaturas nos locais avaliados. Já em relação à umidade, o ponto 4 apresentou valores até 20% mais elevados no período matutino, enquanto o Ponto 1 registrou os maiores índices de umidade no período vespertino, alcançando diferenças de até 10% em alguns dias. Esses resultados sugerem que a vegetação presente na região contribui para a formação de uma ilha de frescor.

Para Barros e Lombardo (2012), a formação de ICUs na cidade de Recife está associada ao uso do solo, no centro urbano e nas Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS) e a morfologia da cidade. A primeira refere-se ao centro urbano, caracterizado por intensa atividade comercial, elevado fluxo de veículos de diversas categorias e presença de edificações com diferentes alturas. Enquanto a segunda, corresponde a ZEIS, são áreas planas e edificadas onde predominam habitações construídas com materiais de baixa qualidade, o que contribui para o aumento das temperaturas locais.

2.1.1 - Microclima da Cidade de Fortaleza

Lima Júnior *et al.* (2025) realizaram um estudo sobre o Índice de Calor (*Heat Index* - HI) na cidade de Fortaleza. Foram analisadas as condições de temperatura e umidade relativa do ar, considerando, para a escolha das regiões de coleta de dados, os diferentes usos e ocupações do solo, bem como as características específicas da estrutura urbana. Os dados foram obtidos por meio de sensores do tipo termohigrômetros posicionados em pontos estratégicos da cidade, selecionados de acordo com padrões distintos de uso do solo e localização geográfica, visando obter uma representação abrangente e coerente do território fortalezense (LIMA JÚNIOR *et al.*, 2025).

Foram selecionados dez Pontos de Coleta de Dados (PCDs), o que abrangeram áreas de alta densidade residencial, zonas mistas, regiões verticalizadas, áreas de preservação ambiental e bairros em expansão. Os PCDs 01 (Álvaro Wayne), 02 (Vila Velha), 08 (Mondubim), 09 (Bom Jardim) e 10 (Conjunto Ceará) concentram ocupação residencial adensada, com construções de alvenaria, coberturas cerâmicas, pouca arborização e vias asfaltadas, destacando-se o Vila Velha (pela existência de ruas estreitas) e Bom Jardim e Conjunto Ceará (pela proximidade de cursos d'água canalizados). O PCD 03 (Bairro de Fátima) apresenta ocupação mista, lotes maiores, verticalização, avenidas largas e presença de espaços abertos. O PCD 04 (Meireles) caracteriza-se pela verticalização consolidada, uso predominante de concreto e aço, pavimentação asfáltica e pouca vegetação. O PCD 05 (Parque do Cocó) corresponde a uma unidade de conservação, com alta cobertura vegetal, situada em uma área cercada por edifícios verticalizados. O PCD 06 (De Lourdes) reflete uma ocupação de alto padrão, com lotes amplos, baixo adensamento e proximidade da orla marítima. Já o PCD 07 (Lagoa Redonda) representa uma zona de expansão residencial, com baixa densidade construtiva, arborização significativa e vias tanto pavimentadas quanto não pavimentadas (LIMA JÚNIOR *et al.*, 2025).

Dessa forma, a coleta de dados ocorreu ao longo do mês de outubro de 2019, período escolhido por ser caracterizado por forte estabilidade atmosférica e altas temperaturas típicas do segundo semestre. O método empregado para o cálculo do HI se baseou em análises estatísticas de regressão que consideram a temperatura do ar e a umidade relativa, de forma a representar a sensação térmica percebida pelos indivíduos (LIMA JÚNIOR *et al.*, 2025).

Os resultados apontam um cenário de desconforto térmico generalizado em Fortaleza, com destaque para alguns bairros críticos. O Vila Velha (PCD 02) e De Lourdes (PCD 06) apresentaram os maiores valores de HI, chegando a ultrapassar o nível de perigo em períodos de onda de calor. Vila Velha caracteriza-se por alta densidade de edificações, ruas estreitas e pouca arborização, resultando em aquecimento intenso à tarde. De Lourdes, embora seja uma área de alto padrão, localiza-se sobre dunas, onde o solo exposto no período seco aquece rapidamente, elevando as temperaturas pela manhã. Outros pontos com altas médias de HI foram Álvaro Wayne (PCD 01) e Bom Jardim (PCD 09), ambos marcados pela alta densidade populacional e baixa cobertura vegetal. O Meireles (PCD 04) destacou-se pelo comportamento diferenciado: o sombreamento dos prédios reduz o HI durante o dia, mas o bairro mantém temperatura acima dos 30°C à noite (LIMA JÚNIOR *et al.*, 2025).

Em contrapartida, os bairros que apresentaram as temperaturas mais amenas foram o Parque do Cocó (PCD 05) e o Bairro de Fátima (PCD 03), onde a presença de lotes mais amplos e maior arborização contribui para a melhoria do conforto térmico. A diferença de temperatura entre os pontos mais quentes e os mais frios chegou a ultrapassar 6 °C no período vespertino, evidenciando a influência direta das características urbanas no microclima (LIMA JÚNIOR *et al.*, 2025).

Com os sensores instalados, foi possível analisar o conforto térmico de Fortaleza durante um período quente e seco. O HI, segundo os limiares do Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos (*National Weather Service* - NWS), apontou desconforto em todos os bairros, conforme apresentado na Figura 1. Mesmo nos horários mais críticos da onda de calor registrada, que corresponde ao intervalo temporal de 12h as 14h, áreas com maior infraestrutura verde, como o Parque do Cocó, demonstraram capacidade de amenizar o desconforto térmico, registrando uma variação mínima temperaturas de 0,34°C de HI (LIMA JÚNIOR *et al.*, 2025).

	00h - 02h	03h - 05h	06h - 08h	09h - 11h	12h - 14h	15h - 17h	18h - 20h	21h - 23h
PCD 01	28.95	28.34	30.83	34.75	35.75	32.63	30.20	29.59
PCD 02	28.72	28.04	30.09	36.20	38.11	33.25	29.98	29.37
PCD 03	28.80	28.11	29.09	31.47	32.24	30.75	29.57	29.27
PCD 04	29.45	29.00	29.71	33.01	33.33	31.05	30.27	29.94
PCD 05	28.54	28.02	29.07	32.12	31.90	29.78	29.04	28.93
PCD 06	28.31	28.02	32.19	35.57	36.46	32.17	28.83	28.71
PCD 07	28.77	28.08	30.25	33.39	33.69	31.25	29.42	29.20
PCD 08	28.36	27.57	29.00	33.05	33.94	31.44	29.63	29.03
PCD 09	28.55	27.80	30.08	34.23	35.30	32.51	29.81	29.20
PCD 10	28.82	28.06	29.73	33.09	34.13	32.15	30.03	29.49

Figura 1 – Identificação dos valores de HI em °C de cada PCD a cada hora. Fonte: LIMA JÚNIOR *et al.*, 2025

Complementarmente, Alvarenga e Sales (2014) analisaram o microclima de Fortaleza a partir de medições realizadas entre 2012 e 2014 em três parques urbanos: Parreão, Rio Branco e Cocó. Foram coletados dados de temperatura, umidade relativa, ventos e condições locais, comparados aos registros do INMET. Os resultados apontaram diferenças entre os parques e o espaço urbano consolidado, marcado por temperaturas mais elevadas associadas às ICUs. O Parque do Cocó, por sua maior cobertura vegetal, apresentou o microclima mais ameno, diferindo em até 1 °C dos outros parques observados as 13 horas.

Outro aspecto observado foi a baixa proporção de áreas verdes em Fortaleza, que correspondem a apenas 1,7% do território municipal, representando cerca de 3 m² por habitante, valor muito inferior ao recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS), de 12 m² por habitante. Essa deficiência acentua a vulnerabilidade da cidade ao desconforto térmico, sobretudo em áreas com alta densidade populacional e menor disponibilidade de vegetação. Diante disso, as ampliações e conservação dos espaços verdes são necessárias para mitigar os efeitos do adensamento urbano, reduzir as ICUs e promover melhores condições de qualidade ambiental e de vida para a população (ALVARENGA e SALES, 2014).

Sob essa ótica, conforme anunciado pela Prefeitura de Fortaleza em 10 de setembro de 2025, Fortaleza avançou em sua agenda ambiental com a criação de cinco novos parques urbanos, sendo eles: Lagoa do Aracapé, Lagoa do Urubu, Zeza-Olho D'Água, Zoobotânico do Passaré e Lagoa da Paupina, elevando o total de áreas verdes da cidade para 30 parques. A iniciativa foi anunciada pelo prefeito Evandro Leitão durante a conferência Diálogos Rumo à COP 30, realizada no Centro de Eventos, que reuniu representantes de todo o Brasil,

autoridades, estudiosos e ambientalistas para debater a crise climática e a sustentabilidade na cidade (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2025).

Além disso, o lançamento da primeira Política Municipal de Mudança do Clima e a criação do Observatório dos Riscos Climáticos demonstram o compromisso de Fortaleza com adaptação e mitigação dos impactos das mudanças climáticas. A política estabelece diretrizes para enfrentar eventos extremos, como ondas de calor e enchentes, enquanto o Observatório permitirá o monitoramento integrado dos riscos climáticos, fortalecendo o planejamento urbano e ambiental. Tais medidas, combinadas à participação da cidade na Rede Global C40, colocam Fortaleza entre as capitais comprometidas com soluções efetivas para a crise climática, promovendo não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também a resiliência social e urbana (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2025).

2.2 - Materiais que Superaquecem as Cidades

Mendes e Romero (2024) analisaram a influência das transformações no uso e ocupação do solo sobre o microclima urbano, destacando o papel da impermeabilização e da verticalização no aumento das temperaturas. A pesquisa, realizada nas cidades de La Serena (Chile) e Piracicaba (Brasil), utilizou imagens termais do satélite Landsat-7 referentes aos anos de 1999 e 2018, complementadas por medições *in loco* em 2019 e simulações computacionais com o modelo ENVI-met, o que permitiu uma avaliação detalhada das mudanças ocorridas em um intervalo de quase duas décadas. Os resultados apontaram um aumento médio de 1°C na temperatura de superfície a cada cinco anos, com destaque para La Serena, onde mais de dois terços do território urbano apresentaram aquecimento expressivo. A análise também revelou que superfícies asfaltadas podem atingir até 70°C, enquanto tetos de veículos escuros chegaram a 95°C, evidenciando a influência dos materiais urbanos na intensificação das ICUs. Em contrapartida, a arborização demonstrou forte potencial mitigador, reduzindo a temperatura do ar em cerca de 1°C e estabilizando superfícies na faixa de 30°C a 40°C.

Callejas *et al.* (2015) avaliaram o comportamento térmico do pavimento asfáltico e sua contribuição para o aquecimento de áreas urbanas, especialmente em regiões de clima tropical. Utilizando medições de albedo, temperaturas superficiais e fluxos de calor, os citados autores observam que o pavimento asfáltico, devido às suas características termo físicas, contribui, para a formação de ICUs nas cidades. Os resultados indicam que a temperatura

superficial do pavimento pode superar os 50°C durante o dia, o que provoca o aumento da temperatura ambiente. Além disso, o fluxo de calor armazenado no pavimento é elevado, contribuindo para o aquecimento das áreas urbanas, especialmente à noite, quando a energia térmica é liberada por radiação infravermelha e convecção. O estudo destaca a importância de considerar as propriedades térmicas dos materiais de pavimentação, sugerindo a substituição de materiais escuros e de alta absorção por alternativas mais claras, que ajudariam a reduzir os impactos negativos no ambiente urbano.

2.3 - Métodos de Resfriamento de Regiões com Formação de ICUs

Para Gartland (2011), os materiais tradicionalmente utilizados em coberturas e pavimentos urbanos, por serem geralmente escuros e compactos, absorvem e retêm calor com facilidade. A escassez de vegetação, especialmente de árvores, agrava esse cenário ao reduzir o resfriamento natural proporcionado pela evapotranspiração. Nesse contexto, estratégias como a aplicação de coberturas e pavimentos frescos, entendidos como superfícies urbanas desenvolvidas com materiais de alta refletância solar e elevada capacidade de emissão térmica, que reduzem a absorção e o armazenamento de calor, além do aumento da arborização, são apontadas como alternativas eficazes para mitigar os efeitos das ICUs nas cidades e zonas periféricas.

É sabido que os pavimentos urbanos exercem forte influência nas dinâmicas térmicas da cidade. As superfícies pavimentadas ocupam grande parte das áreas urbanas e suburbanas e desempenham um papel significativo na intensificação das ICUs. Para mitigar esse efeito, uma das soluções é o uso de pavimentos com refletância solar igual ou superior a 25%, conhecidos como pavimentos frescos. Esse desempenho não se restringe apenas à adoção de superfícies de coloração clara, mas está relacionado à funcionalização do material e da estrutura do pavimento, por meio da incorporação de tecnologias que aumentam a refletância, a emissividade térmica e reduzem o armazenamento de calor. Nessa categoria incluem-se, por exemplo, pavimentos com revestimentos reflexivos, pavimentos com agregados claros e pavimentos permeáveis, cuja capacidade de infiltração favorece o resfriamento evaporativo e contribui para a redução das temperaturas superficiais (GARTLAND, 2011).

Castro (2015) realizou um estudo onde avaliou novos materiais "frios" para pavimentação urbana, compostos por concreto com adição de talco e mica, minerais abundantes no Brasil e com propriedades reflexivas e emissivas. Para testar o desempenho

térmico, foram confeccionadas amostras, incluindo materiais convencionais como misturas asfálticas, granito, lajota, pedra São Tomé e *paver*, além dos novos materiais, tais como: concreto com talco (Material A) e concreto com mica (Material B). Os corpos de prova, com dimensões de $200 \times 100 \times 80$ mm, foram submetidos a ensaios de radiação artificial, utilizando um painel com 35 lâmpadas de 100W, e a exposição à luz solar direta por seis horas.

Ao final, os testes mostraram que os novos materiais apresentaram reduções de temperatura superficial em até $12,8^{\circ}\text{C}$, o que representa uma diminuição de, aproximadamente, 30% em relação ao pavimento asfáltico convencional. Destaca-se, entre eles, o concreto com adição de talco, que proporcionou uma economia de energia de 16,03% ao reduzir a transferência de calor para o ambiente. Para calcular a radiação térmica, foi utilizada a equação de Stefan-Boltzmann, mostrada na equação 1, que considera a temperatura absoluta elevada à quarta potência. Como materiais mais quentes irradiam mais calor, essa abordagem permitiu comparar com precisão o desempenho térmico dos diferentes materiais analisados (CASTRO, 2015).

$$Q_{\text{radiação}} = \sigma AT^4$$

Equação 1

Onde: $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$ Constante de Stefan-Boltzmann

A= Área (m^2)

T = Temperatura absoluta (K)

Uma pesquisa foi desenvolvida com o intuito de avaliar o impacto de diferentes tipos de pavimentos sobre o microclima da cidade de Fortaleza. Foi realizada uma simulação com o uso do *software* ENVI-met, considerando três tipos de pavimentos, sendo o primeiro o cenário real, com pavimento com blocos de concreto intertravado, o segundo usando pavimento asfáltico e o terceiro com pavimento asfáltico termocromático (RIBAS, 2023).

Com relação a temperatura do ar, o modelo simulado no ENVI-met foi capaz de representar de forma satisfatória as condições de temperatura do ar do local de estudo, diferente dos dados de temperatura de superfície, que apresentaram um desvio de até 38,3% quando comparado o valor medido em campo com o simulado. Assim, ao final da pesquisa, os cenários simulados não apresentaram diferenças significativas, com variações de apenas

0,12 °C na temperatura do ar e 0,4 °C na temperatura de superfície. Uma das possíveis explicações foi o tamanho da área pavimentada utilizada na simulação, que correspondia apenas a cerca de 18% da área total avaliada (RIBAS, 2023).

2.4 - Simulação Utilizando o *Software* Envi-met

As simulações computacionais são, frequentemente, usadas como forma de adquirir conhecimento sobre algo, uma vez que elas tornam possível testar diferentes alternativas em um ambiente controlado, sem interferir nas operações do sistema real. Além disso, destaca-se a capacidade dos modelos de simulação de condensar tempo e espaço, permitindo que os tomadores de decisão visualizem, em um curto intervalo, os impactos de longo prazo decorrentes de suas ações e das dinâmicas do sistema como um todo (GAVIRA, 2003).

Nesse contexto, destaca-se o uso do *software* ENVI-met, utilizado em pesquisas microclimáticas, por sua capacidade de simular o comportamento atmosférico em áreas urbanas a partir de condições reais. O ENVI-met opera com modelos tridimensionais voltados à análise das interações térmicas em microescala no cenário urbano. Ele incorpora cálculos baseados na dinâmica dos fluidos computacional (do inglês, CFD – *Computational Fluid Dynamics*) para avaliar aspectos como o fluxo de ar, além de simular os processos termodinâmicos que ocorrem entre as diferentes superfícies urbanas, incluindo a vegetação. O modelo também contempla radiações de ondas curtas (direta, difusa e refletida) e de ondas longas (emitida por superfícies e pela atmosfera) com base em parâmetros como albedo, emissividade, sombreamento e posição solar. A partir desses dados, é possível determinar a Temperatura Radiante Média (do inglês, *Mean Radiant Temperature* – MRT), que expressa a média ponderada da radiação térmica recebida por um ponto no espaço, sendo este um dos principais indicadores do conforto térmico ao ar livre (BRUSE, 2007).

Almeida e Lomardo (2025) realizaram simulação usando o ENVI-met com foco na análise dos efeitos da vegetação sobre o microclima em uma rua do bairro do Flamengo, na cidade do Rio de Janeiro. A partir da modelagem, foi possível reproduzir o cenário real e projetar outros sete cenários distintos, nos quais foram consideradas diferentes quantidades e espécies arbóreas, além da inserção de fachadas e coberturas vegetadas e, em alguns casos, a alteração da geometria das vias, com pavimentos asfálticos, avaliadas.

Os resultados da simulação podem ser observados na Gráfico 1, que apresenta cortes transversais da rua avaliada por Almeida e Lomardo (2025) comparando o cenário base

(cenário 1) com os demais, assim como apresentado na Figura 2. Verificou-se que os cenários com vegetação em fachadas (cenários 3 e 6) apresentaram as maiores reduções de temperatura do ar, especialmente próximas ao nível do solo, com diferenças pontuais de até 1,2°C. Já nos cenários compostos apenas por árvores (4, 7 e 8), a redução térmica foi mais concentrada na altura das copas das árvores, alcançando até 0,9°C.

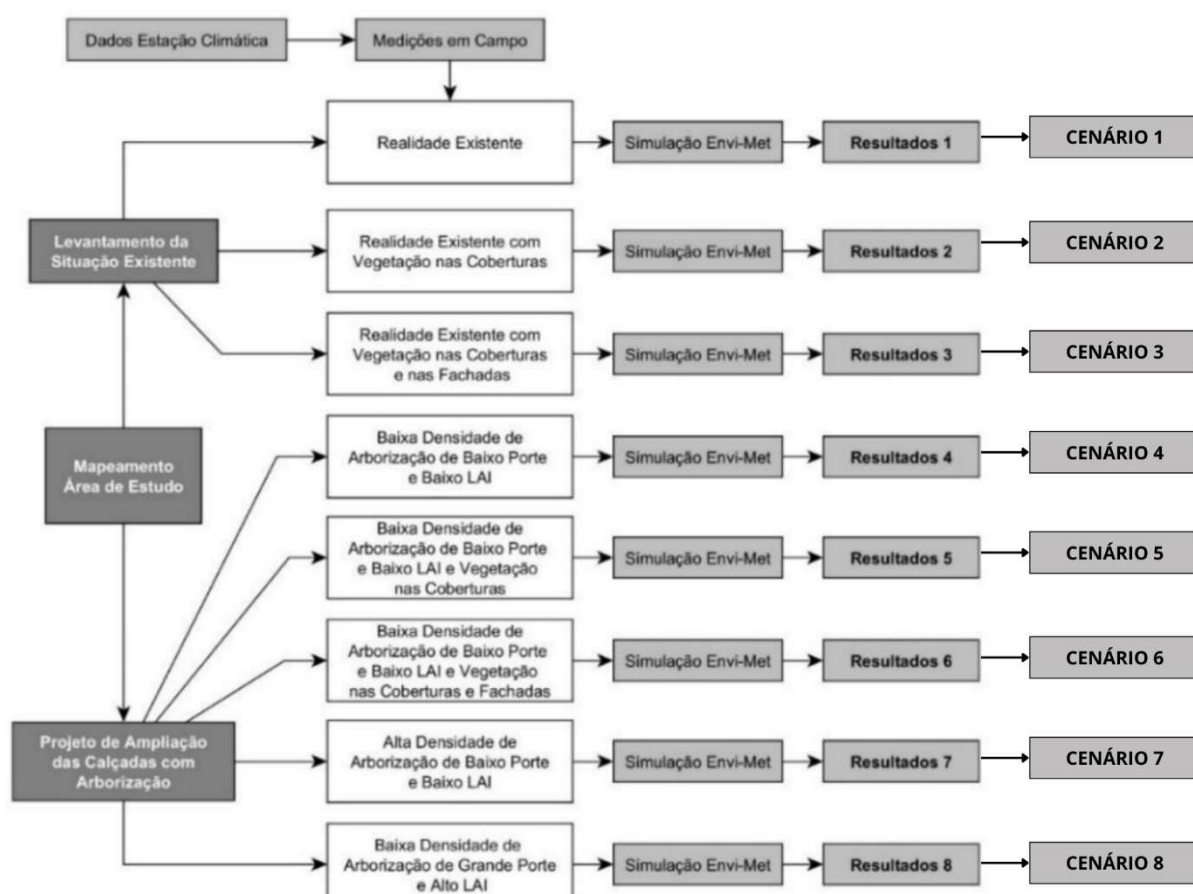


Figura 2. Detalhamento dos cenários dos simulados no *software* ENVI-met. Fonte: Almeida e Lomardo (2025).

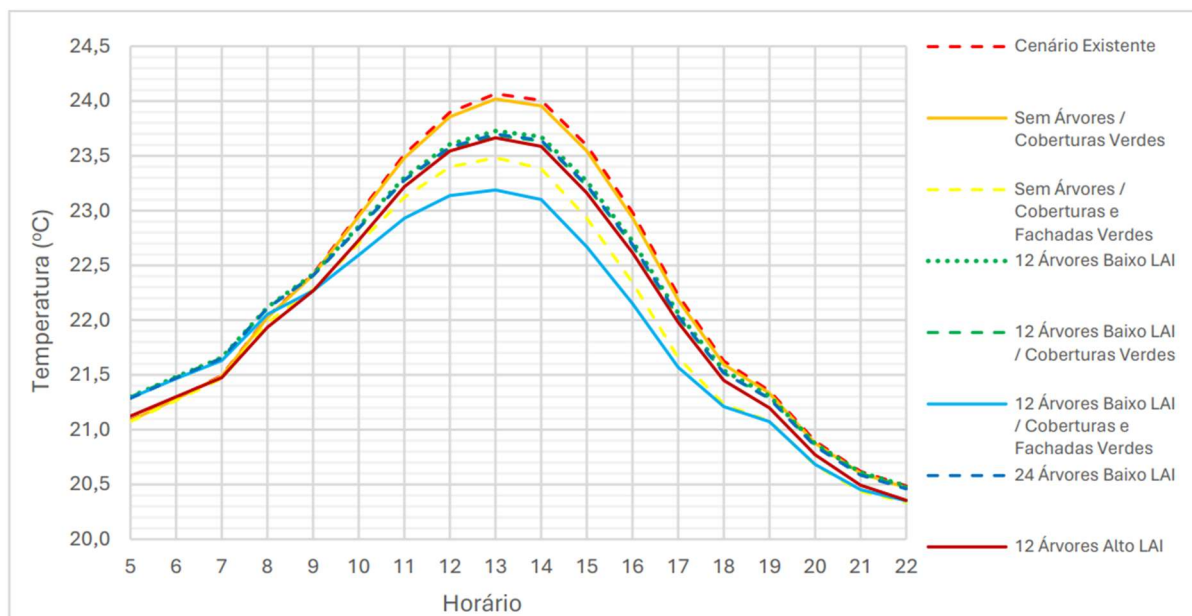


Gráfico 1. Médias dos valores obtidos para a temperatura do ar (oC) nas simulações para os diferentes cenários ao longo do dia 11 de setembro de 2018. Fonte: Almeida e Lomardo (2025).

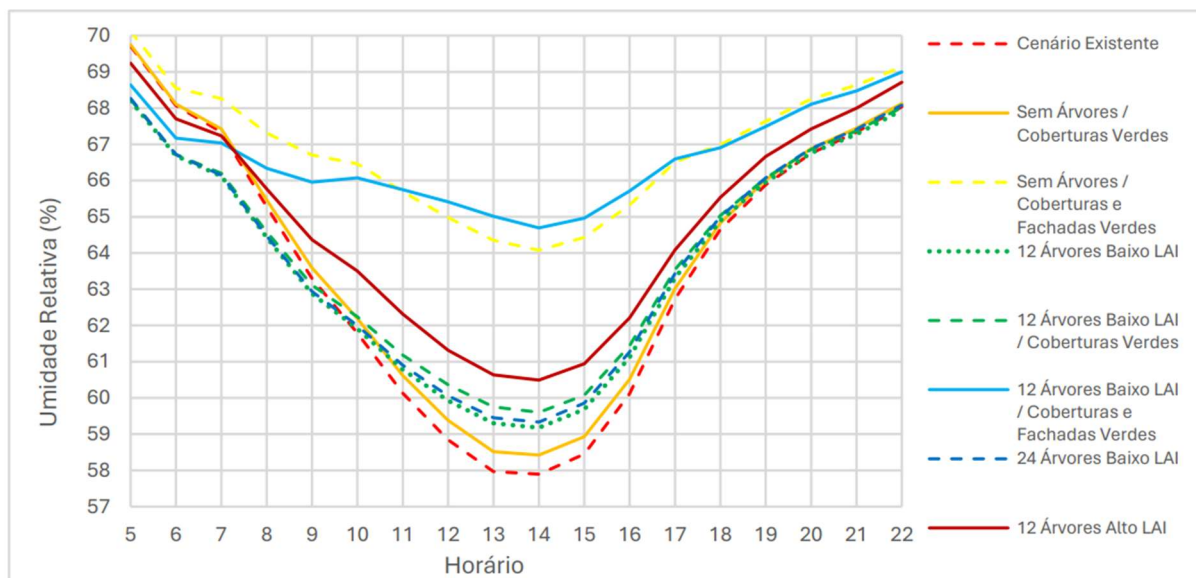


Gráfico 2. Médias dos valores obtidos para a umidade relativa do ar (oC) nas simulações para os diferentes cenários ao longo do dia 11 de setembro de 2018. Fonte: Almeida e Lomardo (2025).

Ao final, ao comparar os dados do cenário real com os outros sete cenários, observou-se que a presença de árvores, especialmente as de grande porte com alto índice de área foliar (LAI, do inglês *Leaf Area Index*), proporcionou reduções na temperatura do ar (de até 0,9°C) e aumento na umidade relativa (de até 12%). As fachadas vegetadas, que cobrem as paredes dos edifícios e atuam diretamente no ambiente ao nível do solo, se destacaram quando comparadas com as coberturas verdes, como as mais eficazes na melhoria do microclima para

os pedestres, proporcionando sombra, umidade e conforto térmico. Já as coberturas verdes, localizadas nos telhados, tiveram menor impacto no microclima ao nível do pedestre, pois sua ação ocorre principalmente em um nível superior, distante da circulação direta das pessoas. Também foi observado que trechos com edificações mais elevadas (60m e 48m) e redução de área com vegetação apresentaram menor variação climática, com uma diferença média de 0,4°C com relação a temperatura do ar e de 6% na umidade relativa do ar, evidenciando a influência da morfologia urbana na eficácia dessas estratégias (ALMEIDA e LOMARDO, 2025).

Um estudo desenvolvido em Balneário Camboriú (SC), cidade litorânea em região de clima subtropical, teve como objetivo analisar o microclima urbano a partir da influência da geometria e da refletância solar das superfícies construídas. A metodologia combinou medições em campo e simulações computacionais com o uso do ENVI-met 4.4.6, aplicadas em duas áreas centrais com geometrias contrastantes. A Área A é caracterizada por edificações adensadas e altas, altura média de 31,06 m e taxa de ocupação de 0,51, configurando cânions urbanos profundos. Já a Área B que possui vias mais largas, variando de 12 metros até 26 metros e construções mais baixas, registrou altura média de 6,30 m e taxa de ocupação de 0,32, representando um espaço urbano mais aberto. As medições em campo indicaram que a intensidade média das ICUs variou em até 1,0 °C à noite e 2,5 °C durante o dia, revelando diferenças entre os padrões térmicos das áreas analisadas (PEREIRA, 2022).

As simulações realizadas com o uso do ENVI-met, calibradas com base em dados meteorológicos locais e com razoável desempenho estatístico (R^2 entre 0,96 e 0,99), permitiram testar 12 cenários paramétricos de refletância. Os resultados demonstraram que a geometria urbana foi o fator predominante para a definição do microclima, uma vez que a Área A apresentou temperaturas noturnas mais elevadas, enquanto a Área B registrou maior aquecimento diurno pela maior exposição solar. Embora a refletância solar tenha se mostrado relevante na redução da temperatura do ar, seu efeito foi secundário em relação à geometria, com variação máxima de 0,58 °C entre os cenários extremos. Além disso, constatou-se que os cânions urbanos profundos, caracterizados por edificações altas dispostas de forma contínua e com reduzido espaçamento entre si (elevada razão entre a altura das edificações e a largura das vias), apresentam maior sensibilidade às alterações de refletância, reforçando a centralidade da configuração espacial no comportamento térmico urbano (PEREIRA, 2022).

Esses resultados demonstram o potencial das simulações computacionais como ferramentas interessantes para antecipar impactos e avaliar diferentes cenários. Sua aplicação possibilita tomadas de decisão mais assertivas e um melhor planejamento urbano ao permitir intervenções mais precisas e contextualizadas.

2.4.1 – Parâmetro de Calibração

No processo de calibração de modelos microclimáticos, a definição adequada de alguns parâmetros, como o comprimento de rugosidade (z_0), é fundamental. Esse parâmetro corresponde a uma medida aerodinâmica das irregularidades da superfície, relacionada à redução da velocidade do vento próximo ao solo. Seu papel é central por expressar a influência da vegetação, das edificações e das irregularidades do terreno na desaceleração do escoamento atmosférico. Nesse contexto, a classificação proposta por Wieringa (1992) constitui uma das referências mais amplamente utilizadas na literatura, por atualizar e detalhar a antiga tabela de Davenport a partir de evidências empíricas obtidas em diferentes tipos de terrenos.

A Tabela 1 sintetiza essa classificação, apresentando valores típicos de z_0 que variam desde superfícies extremamente lisas, como o mar aberto ($z_0 = 0,0002$ m), até ambientes urbanos densamente construídos, nos quais a complexidade geométrica e a presença de edificações altas elevam a rugosidade para valores iguais ou superiores a 2 m. Observa-se, ainda, uma progressão intermediária que inclui terrenos planos sem obstáculos ($z_0 = 0,005$ m), áreas com vegetação rasteira e poucos obstáculos isolados ($z_0 = 0,030$ m), além de superfícies com culturas altas, arbustos ou múltiplos elementos dispersos (z_0 entre 0,1 e 0,5 m).

Descrição do terreno	Z_0 (m)
Mar aberto	0,0002
Terrenos planos, sem vegetação, sem obstáculos e neve	0,005
Terreno plano aberto, grama, obstáculos isolados	0,03
Culturas baixas, grandes obstáculos isolados	0,1
Culturas altas, obstáculos espalhados	0,25
Parque, arbustos, inúmeros obstáculos	0,5
Cobertura regular de grandes obstáculos (florestas regulares ou cidades homogêneas)	1
Centro urbano com edifícios altos e baixos	≥ 2

Tabela 1. Classificação do terreno quanto ao comprimento de rugosidade. Fonte: Adaptado de WIERINGA (1992).

3. MÉTODO

Neste capítulo, apresenta-se o método adotado para o desenvolvimento do estudo, conforme o fluxograma ilustrado na Figura 3.

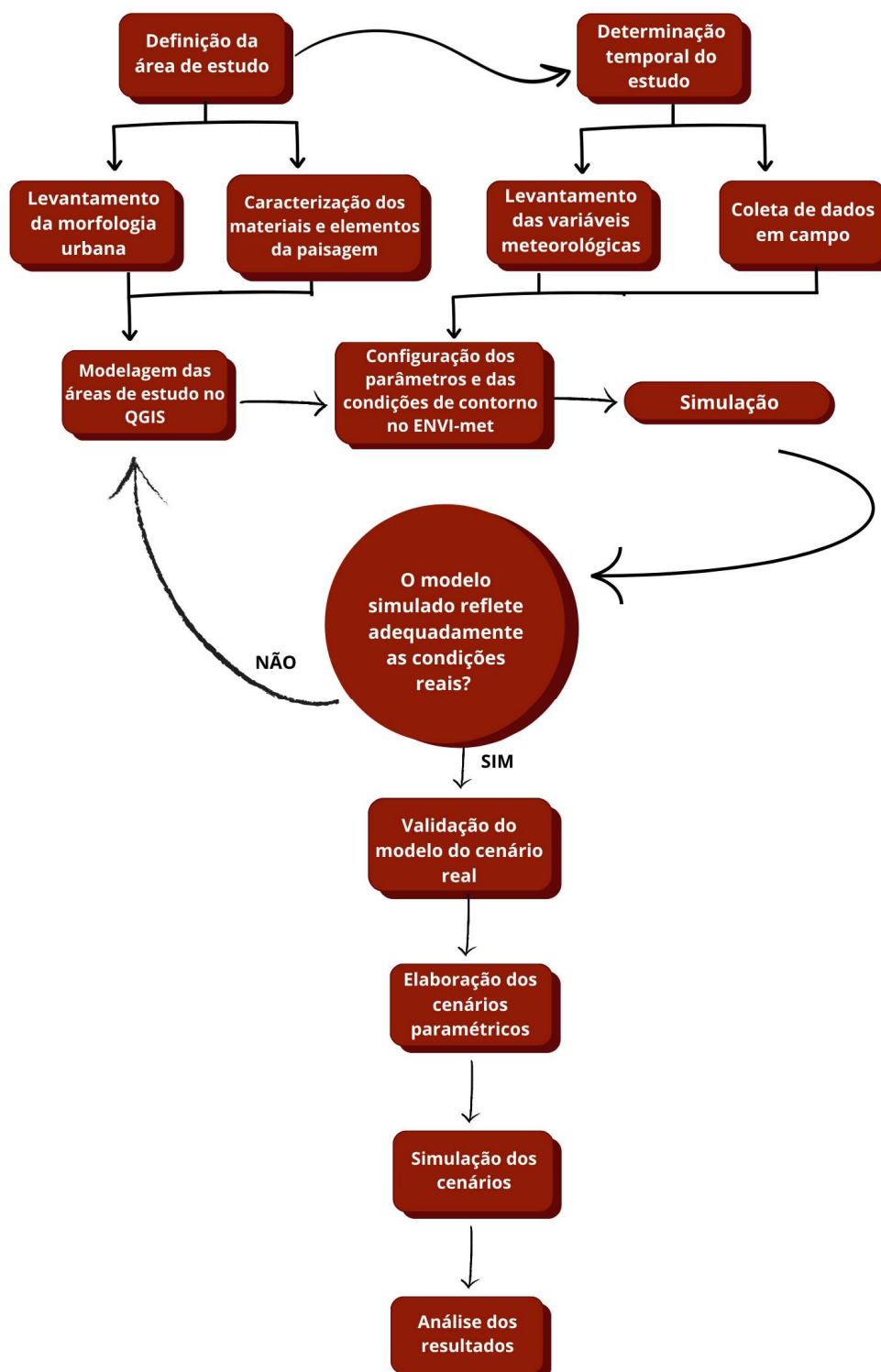


Figura 3. Fluxograma das etapas metodológicas.

A primeira fase corresponde à definição do objeto de estudo, etapa em que foram determinados locais e períodos de análise. A seleção das áreas representativas ocorreu na cidade de Fortaleza (CE), tomando como referência o trajeto da linha de transporte público 052 (Grande Circular), que atravessa regiões com diferentes características urbanas e socioeconômicas. Dessa forma, foram escolhidos trechos com IDH contrastantes, possibilitando a análise comparativa dos efeitos do adensamento urbano e das condições de infraestrutura sobre o microclima local.

Na etapa de levantamento de dados, foram analisadas a geometria urbana e a composição dos materiais das áreas escolhidas ao longo do trajeto da linha 052, em Fortaleza. A seleção dos trechos de estudo teve como ponto inicial a análise da condição superficial das vias realizada por Penha (2025), que avaliou esse mesmo percurso e classificou o estado do pavimento ao longo da rota. A partir dessa referência preliminar, outros critérios foram incorporados para a definição final das regiões a serem investigadas, considerando tipo de pavimentação, espaçamento entre as edificações, IDH, presença de vegetação e predominância de edificações verticalizadas ou horizontalizadas. Somente após a avaliação conjunta desses fatores é que os trechos específicos destinados à coleta de dados da presente pesquisa foram definidos.

Essa fase teve como objetivo caracterizar os elementos que influenciam o comportamento térmico local, considerando fatores, tais como: composição do pavimento, altura das edificações e cobertura vegetal. Além disso, foram realizadas medições em campo de temperatura de superfície e umidade relativa do ar em pontos localizados nas regiões selecionadas.

Com base nos dados coletados em campo e nos parâmetros definidos para o *software* ENVI-met, foi construído o modelo tridimensional das áreas de estudo, refletindo suas características reais. Os resultados obtidos foram comparados às medições de campo, garantindo a calibração adequada do modelo. Em seguida, realizaram-se simulações paramétricas, a fim de identificar os elementos que geram impacto no microclima urbano.

3.1 Caracterização da Área de Estudo

O município de Fortaleza, capital do estado do Ceará, é localizado no Nordeste do Brasil (Figura 4). Fortaleza está situada, no sistema de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*), no Fuso 24 Sul (S), com coordenadas centrais de aproximadamente 556.998 m (E) e 9.587.016 m (N), utilizando o Datum SIRGAS 2000, ocupando uma área de 312,4km². Limita-se ao Norte com o Oceano Atlântico e é contornada pelos municípios de Caucaia, Maracanaú, Pacatuba, Itaitinga, Eusébio e Aquiraz (IPECE, 2025).

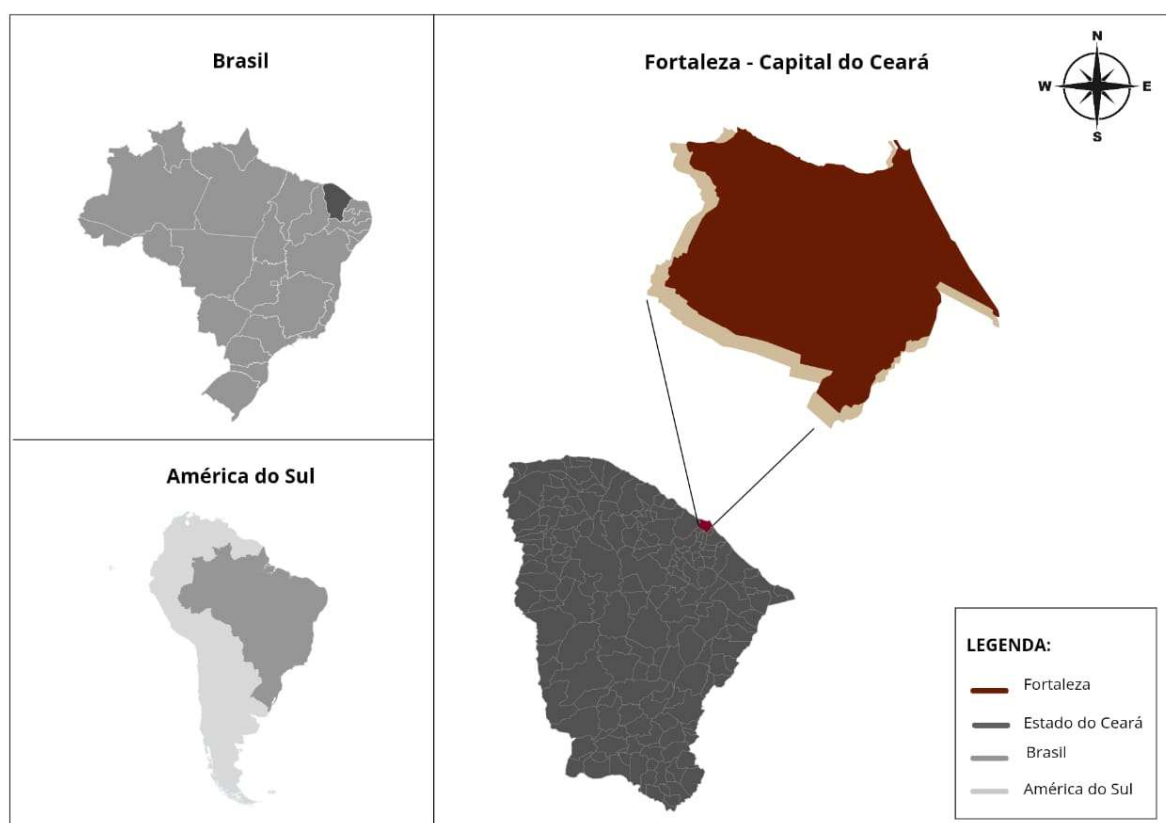


Figura 4. Mapa da Cidade de Fortaleza. Fonte: MapChar. Elaborado pela autora

O clima da cidade é do tipo tropical quente subúmido, classificado como As segundo a classificação de Köppen-Geiger, caracterizando-se por temperaturas elevadas ao longo de todo o ano. Apresenta uma pré-estação chuvosa entre os meses de dezembro e janeiro, uma quadra chuvosa concentrada entre fevereiro e maio e uma pós-estação chuvosa entre junho e julho, com temperatura média anual em torno de 27 °C. O litoral de Fortaleza possui cerca de 34 km de extensão, abrangendo um total de 15 praias, que contribuem para a regulação térmica e a ventilação natural da cidade. A vegetação predominante é litorânea, composta por áreas de mangue e restinga. As restingas concentram-se nas proximidades das dunas ao sul da cidade e

nas fozes dos rios Ceará, Cocó e Pacoti, enquanto as formações de mangue se desenvolvem ao longo dos leitos fluviais, configurando-se como as principais áreas verdes da capital, protegidas por lei. Dentre essas áreas, destaca-se o Parque do Cocó, que compreende 1.155,2 hectares de manguezal preservado, constituindo o maior fragmento de vegetação nativa da capital fortalezense (IPECE, 2025).

Segundo o Censo Demográfico de 2022, Fortaleza possui cerca de 2,4 milhões de habitantes (IBGE, 2023), configurando-se como o município mais populoso do Nordeste e o quinto do país. A economia é baseada nos setores de serviços e comércio, além da crescente atividade da construção civil. A distribuição populacional é heterogênea, com concentração de renda e infraestrutura nas áreas litorâneas e centrais, contrastando com regiões periféricas de menor IDH. O traçado urbano apresenta densidade elevada, pavimentação impermeável e escassez de áreas verdes em diversos bairros, condições que favorecem a formação de ICUs. Nas áreas centrais e próximas à orla, observa-se maior grau de verticalização, enquanto os bairros mais afastados mantêm, predominantemente, edificações horizontais.

Administrativamente, Fortaleza está dividida em 12 Secretarias Regionais, que abrangem 121 bairros distribuídos ao longo de seu território. Essa organização reflete o processo histórico de expansão urbana da capital cearense, cujas antigas vilas e municípios vizinhos foram sendo incorporados ao longo do tempo, acompanhando o crescimento populacional e a consolidação das áreas periféricas (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2024). Além de seu dinamismo urbano, Fortaleza destaca-se também como um dos principais destinos turísticos do Brasil, sendo atualmente o mais procurado no Nordeste por turistas estrangeiros, conforme levantamento do Kayak, uma das maiores plataformas de busca de viagens do mundo (URBNEWS, 2025).

3.1.1 Definição das Áreas de Estudo

A seleção das áreas de estudo foi realizada a partir do percurso da linha de ônibus 052, nomeada de Grande Circular, devido à sua abrangência territorial e representatividade dentro da malha urbana de Fortaleza. O itinerário da linha tem mais de 55 km de extensão e tempo médio de percurso de 2 horas e 45 minutos, a linha atravessa diversos bairros da capital, incluindo áreas comerciais, residenciais, industriais e logísticas, além de interligar quatro dos sete terminais integrados da cidade: Antônio Bezerra, Papicu, Messejana e Siqueira, conforme

ilustrado na Figura 5 (PENHA, 2025). Essa abrangência confere ao seu trajeto um caráter transversal, permitindo a observação de realidades urbanas contrastantes ao longo de sua extensão.

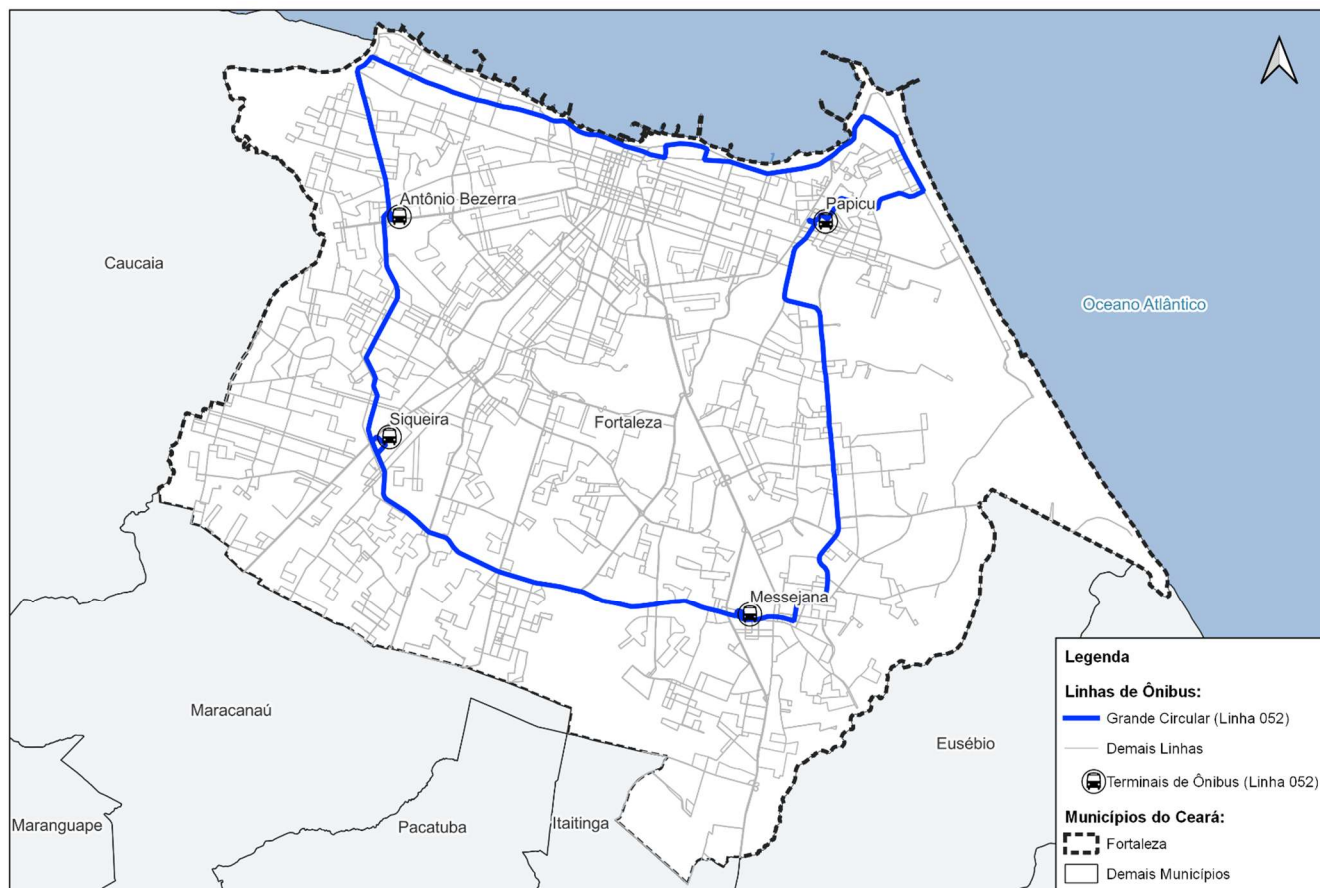


Figura 5. Itinerário do Grande Circular (Linha 052). Fonte: (PENHA, 2025).

Assim, a escolha dos dois trechos analisados, na presente pesquisa, ao longo do percurso da linha 052 foi orientada inicialmente pelas condições superficiais das vias descritas por Penha (2025), sendo posteriormente complementada por critérios que possibilitassem comparar distintas configurações urbanas mantendo, entretanto, características viárias equivalentes. Foram utilizados sete critérios de escolha, sendo eles: IDH, configuração das edificações (verticalizada ou horizontal), espaço entre as edificações (coladas ou espaçadas), índice de vegetação, classificação da via, material utilizado no pavimento e condição superficial da via quanto a serventia e ocorrência de defeitos. As informações referentes a configuração das edificações, espaço entre as edificações, material do pavimento e índice de vegetação, foram coletadas por meio de observação das imagens do *Street View*, enquanto a classificação das vias foi coletada no site da prefeitura de Fortaleza, chamado de Fortaleza em

Mapas. Por fim, incorporou-se a análise da condição superficial da via conforme o estudo desenvolvido por Penha (2025).

Conforme a divisão proposta por Penha (2025), o trajeto foi segmentado em 58 trechos. A partir dessa subdivisão, foram selecionados os Trechos 10 e 17 para a realização das análises do atual estudo. Como apresentado na Tabela 2, esses dois trechos apresentam características opostas em relação ao IDH, à condição superficial da via, à configuração das edificações e ao espaçamento entre elas, ao mesmo tempo em que apresentam semelhanças quanto à presença de vegetação, ao material utilizado na superfície do pavimento e à classificação da via. Essa seleção foi realizada de modo a possibilitar uma comparação controlada, permitindo avaliar como diferentes características físicas e sociais influenciam o comportamento microclimático do ambiente urbano.

Crítérios	Trecho 10 Jacarecanga	Trecho 17 Meireles
IDH	0,4482	0,9531
Espaço entre as edificações	Coladas	Espaçadas
Configuração das edificações	Horizontalizada	Verticalizada
Vegetação	Pouco Arborizada	Pouco Arborizada
Material do revestimento do pavimento	Asfáltico	Asfáltico
Classificação da via	Arterial I	Arterial I
Condição superficial da via quanto aos defeitos	Alta Severidade	Baixa Severidade

Tabela 2. Critérios de escolha analisados para a definição dos trechos a serem estudados. Fonte: Elaborado pela autora

3.1.1.1 Trecho 17

O Trecho 17 localiza-se no bairro Meireles, situado na zona leste de Fortaleza, Ceará, abrangendo parte de sua orla marítima. Reconhecida como uma das áreas mais valorizadas da cidade, o Meireles apresenta o maior IDH municipal, estimado em 0,953 (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2022), e concentra o metro quadrado mais caro da capital. O bairro caracteriza-se por uma intensa verticalização residencial de alto padrão, aliada à presença do principal polo hoteleiro e turístico de Fortaleza, especialmente em sua faixa litorânea, o que lhe confere uma configuração urbana densa.



Figura 6. Limite do bairro Meireles e sua configuração urbana. Fonte: F4map. Elaborado pela autora

O recorte espacial selecionado para a coleta de dados corresponde ao segmento da Avenida da Abolição foi aquele compreendido entre os números 2.828 (ponto inicial) e 3.808 (ponto final), classificado por Penha (2025) como o Trecho 17. A Avenida da Abolição se destaca por funcionar como uma das principais vias que conecta a orla a outras partes da cidade. Consequentemente, apresenta intenso fluxo de veículos particulares, transporte público e pedestres. O uso do solo, ao longo da via, é classificado pela Lei Complementar nº 236/2017 como Zona de Interesse Turístico (ZIT), o que favorece a presença de hotéis, *flats*, restaurantes e serviços vinculados ao turismo, coexistindo com edifícios residenciais multifamiliares.

A Avenida Abolição é classificada como Arterial 1, apresentando pavimentação asfáltica e três faixas de rolamento em cada sentido, sendo uma delas exclusiva para ônibus. As edificações que a margeiam são, predominantemente, residenciais multifamiliares de médio e alto padrão, com espaçamento entre as edificações, apresentando também uma limitação de áreas permeáveis e vegetação no entorno. A vegetação é limitada e distribuída de forma descontínua, restrita a canteiros centrais, jardins privados e pequenas praças. A estação de coleta foi posicionada na Avenida da Abolição, nº 3.273, aproximadamente no centro do trecho analisado, de modo a representar adequadamente as características morfológicas predominantes.

3.1.1.2 Trecho 10

O Trecho 10, definido no levantamento realizado ao longo do percurso da linha 052 (PENHA, 2025). Ela se localiza no bairro Jacarecanga, situado na zona oeste de Fortaleza, em uma área tradicional e de ocupação consolidada. Em contraste com a Área A, caracterizada por alta verticalização e elevados indicadores socioeconômicos, o bairro Jacarecanga apresenta IDH de 0,4482, considerado baixo para o contexto municipal (PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA, 2022).

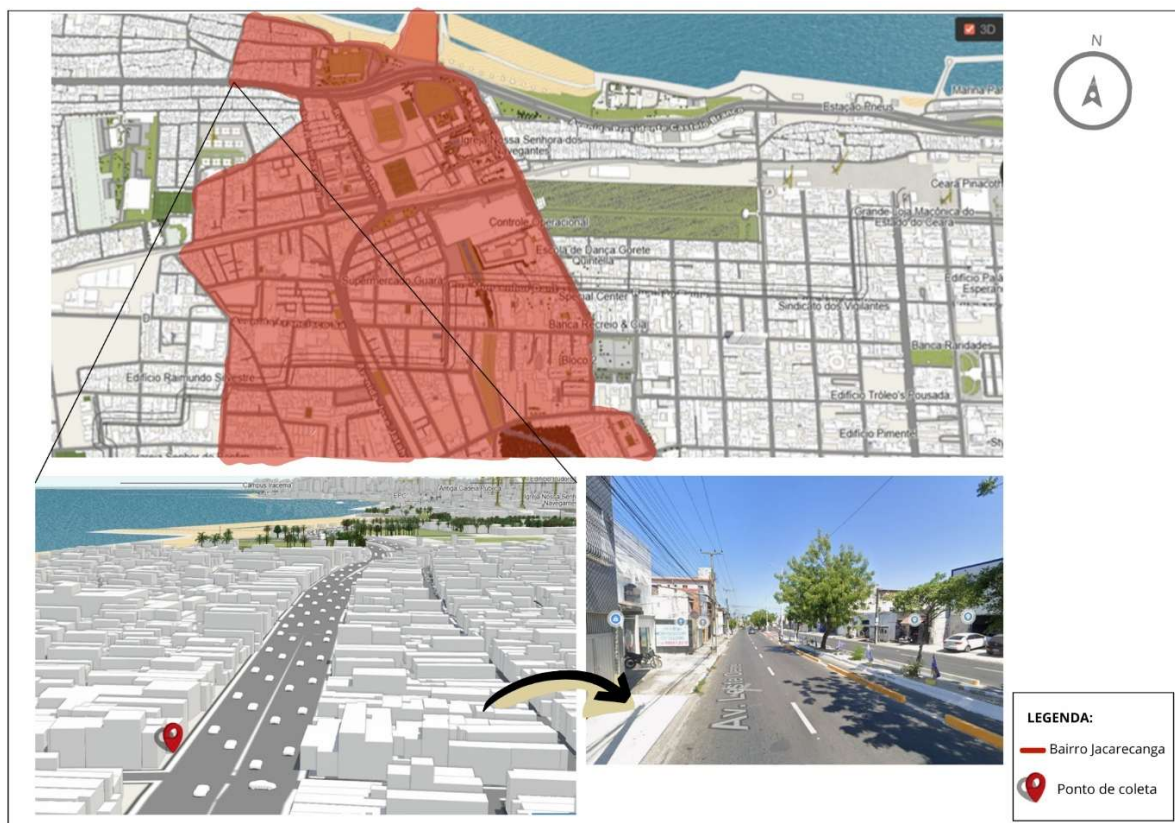


Figura 7. Limite do bairro Jacarecanga e sua configuração urbana. Fonte: F4map. Elaborado pela autora

A configuração urbana dessa área é marcada por residências unifamiliares, pequenos comércios, oficinas e equipamentos institucionais. Sua configuração urbana caracteriza-se por uma trama predominantemente horizontal e praticamente sem espaçamento entre as edificações, conforme apresentado na Figura 7.

O recorte espacial desta área compreende um trecho da Avenida Presidente Castelo Branco, entre os números 2.315 e 1.377, onde também foi posicionada a estação de coleta, aproximadamente, na altura do número 2.222. O uso do solo ao longo do trecho é heterogêneo, refletindo uma composição urbana diversa e distinta da paisagem verticalizada observada no Meireles (Trecho 17). A densidade construtiva é baixa, e o padrão de ocupação apresenta uma configuração onde as edificações em sua maioria são construídas junto ao alinhamento do lote.

A avenida apresenta pavimentação asfáltica e duas faixas de rolamento por sentido, além de calçadas estreitas e descontínuas em alguns pontos. As edificações que margeiam o trecho são térreas ou com até dois pavimentos, evidenciando a predominância de construções de baixo gabarito. A vegetação presente, está distribuída em árvores isoladas nas calçadas e pequenos canteiros.

3.2 Definição Temporal e Seleção do Dia a Ser Simulado

A definição do período de análise considerou o elevado custo computacional do *software* ENVI-met e que eventuais falhas podem vir a reiniciar o processo, resultando na perda dos dados. Dessa forma, optou-se por realizar a simulação de apenas um dia, escolhido durante a estação da primavera, período caracterizado em Fortaleza por temperaturas mais elevadas, baixa nebulosidade e maior incidência de radiação solar, condições favoráveis para a realização de medições em campo e simulações microclimáticas. A escolha de um dia com céu predominantemente limpo visa assegurar maior estabilidade atmosférica e confiabilidade nos resultados, reduzindo interferências externas e facilitando a calibração do modelo.

3.3 Levantamento de Dados

3.3.1 Coleta de Dados em Campo

A metodologia para a coleta de dados de temperatura de superfície e umidade relativa do ar foi concebida com o objetivo de captar a heterogeneidade térmica do espaço urbano da capital cearense. Dentro da extensão das áreas analisadas, foram selecionados os pontos de coleta localizados no Trecho 10 e no Trecho 17, conforme apresentado nas Seções 3.1.1.1 e 3.1.1.2. Dessa forma, tornou-se possível analisar como as variações morfológicas e de uso do solo influenciam o comportamento térmico local.

Para o registro das variáveis microclimáticas, foi utilizado um termohigrômetro digital configurado para realizar leituras automáticas de temperatura e umidade do ar em intervalos regulares de 1 minuto em 1 minuto. O sensor foi instalado dentro de um abrigo, conforme ilustrado na Figura 8, a fim de evitar a incidência direta da radiação solar e reduzir interferências externas. O equipamento foi posicionado a aproximadamente 2 metros de altura em relação ao solo, garantindo condições adequadas de ventilação e diminuindo a influência de superfícies aquecidas. Essa configuração assegurou maior precisão às medições realizadas ao longo das 10 horas de coleta contínua.



Figura 8. Ilustração do abrigo do sensor termo-higrômetro. Fonte: Elaborado pela autora

Além disso, foi utilizada uma câmera termográfica compacta FLIR, para capturar imagens térmicas do entorno em intervalos de 1 hora entre cada imagem, permitindo a análise espacial da distribuição de temperatura ao longo do dia no ponto de coleta de cada trecho. Complementarmente, utilizou-se uma pistola infravermelha de medição de temperatura para aferir pontualmente a temperatura dos diferentes elementos urbanos, tais como calçada, fachada, pavimento e vegetação, possibilitando comparar o comportamento térmico dos materiais presentes no ambiente construído.



Figura 9. Utilização da câmera térmica FLIR. Fonte: Elaborado pela autora



Figura 10. Instrumento e aplicação do método de medição de temperaturas superficiais em campo. Fonte: Elaborado pela autora

As medições foram efetuadas no dia 27 de novembro de 2025, em condições atmosféricas estáveis, caracterizadas por céu claro e ventos fracos de 5,1 m/s, assegurando a representatividade dos dados para períodos de forte radiação solar. A coleta teve início às 9h da manhã e foi finalizada às 18h, permitindo abranger diferentes condições térmicas ao longo do dia. Após a aquisição, os dados coletados em campo foram integrados às demais camadas de informação espacial, de modo a subsidiar a modelagem no *software* ENVI-met. A associação direta entre os dados empíricos e as características espaciais das duas regiões analisadas foi utilizada tanto para a calibração do modelo quanto para uma análise do comportamento microclimático urbano.

3.3.2 Geometria Urbana

A análise das áreas construídas, foi iniciada com a obtenção de dados geoespaciais oficiais, fornecidos pela Prefeitura de Fortaleza (2024), na forma de um arquivo *shapefile*. A escolha por esta fonte de dados primária se justifica pela sua alta precisão e atualidade, o que garante a confiabilidade das informações referentes à malha urbana. Este arquivo, importado para o ambiente do Sistema de Informação Geográfica (QGIS), permitiu não apenas visualizar as edificações existentes, mas também extrair seus atributos detalhados, como a geometria precisa e a altura de cada estrutura. A partir desses dados, tornou-se possível realizar uma avaliação pormenorizada da densidade construtiva da cidade.

Com o objetivo de focar a pesquisa nas duas áreas de interesse, Trecho 10 e Trecho 17, o perímetro de estudo foi delimitado no QGIS por meio da criação de um polígono vetorial. Este procedimento é fundamental para otimizar o processamento computacional e evitar a inclusão de dados periféricos que não contribuem para a investigação. Para gerenciar a complexidade do ambiente urbano, os dados foram estruturados em camadas distintas, segregando as informações em edificações, superfícies do solo (como vias e calçadas) e cobertura vegetal. A divisão dos componentes urbanos em camadas resultou em um controle modular, que permitiu o tratamento individualizado de cada elemento do cenário.

Após a estruturação do ambiente urbano em camadas temáticas, procedeu-se à modelagem e à atribuição das propriedades físicas correspondentes a cada material representado. Essa etapa baseou-se em observações de campo, que possibilitaram a identificação das características construtivas e dos revestimentos predominantes nas áreas analisadas, assegurando maior coerência entre o modelo e a realidade física. Os materiais das edificações, das pavimentações e as espécies de vegetação aplicadas nas coberturas e fachadas vegetadas foram selecionados a partir da biblioteca do próprio ENVI-met, conforme apresentado na Tabela 3.

Composição ENVI-met	
Alvenaria	0200B2 - <i>Brick wall (burned)</i>
Cobertura	0100R2 - <i>Roofing: terracotta</i>
Vegetação	020027 - <i>Pine tree</i>
Pavimento Asfáltico	0200ST - <i>Asphalt Road</i>
Pavimento Refletivo	0200PP - <i>Pavement (concrete)</i>

Tabela 3. Materiais utilizados para caracterizar a modelagem no ENVI-met. Fonte: Elaborado pela autora

No caso das edificações, um dos materiais foi ajustado quanto à espessura do elemento de alvenaria, adequando-o às condições construtivas predominantes na cidade, adotando-se o valor de 15 cm. Por fim, os dados foram integrados ao modelo e submetidos à verificação de compatibilidade, garantindo a correta importação do arquivo para o software ENVI-met.

3.4 Simulações Computacionais

3.4.1 Modelagem do Cenário Real

Para a investigação do comportamento microclimático urbano, a modelagem foi conduzida utilizando o *software* ENVI-met, versão 5.9.0. A escolha deste programa se justifica pela sua robustez e capacidade de simular, em três dimensões, as complexas interações entre os elementos urbanos e a atmosfera. A modelagem computacional no ENVI-met possibilita criação e análise de múltiplos cenários, permitindo uma compreensão mais aprofundada da influência de diferentes estratégias de intervenção sobre o clima local.

A construção do modelo digital das áreas de estudo foi um processo que integrou dados provenientes de diferentes etapas. As informações sobre as edificações foram importadas do *shapefile* da Prefeitura de Fortaleza (2024), enquanto a caracterização dos materiais e da vegetação foi baseada nos dados de campo coletados nos pontos de estudo do trajeto da linha de ônibus 052 Grande Circular nas regiões escolhidos para análise, sendo elas os Trecho 10 e Trecho 17. As duas regiões de estudo foram representadas em um domínio de $50 \times 50 \times 40$ *grids*, com resolução espacial de 3 m nas direções x, y e z. Nessa configuração, cada célula do modelo corresponde a um volume de 3 m, de modo que variações espaciais menores que essa escala não são representadas de forma explícita, mas são consideradas adequadas para capturar as particularidades de cada área, incluindo a densidade construtiva e a cobertura vegetal.

Para alimentar o modelo no ENVI-met, foi necessário realizar o tratamento prévio dos dados obtidos em campo e em fontes externas. As medições de temperatura e umidade relativa foram registradas pelo termohigrômetro em intervalos de um minuto, gerando uma base de alta resolução temporal. Entretanto, como o ENVI-met exige que os dados de entrada sejam fornecidos hora a hora, os valores coletados foram convertidos em médias horárias, compatibilizando o intervalo original de coleta (minuto a minuto) com o formato requerido pelo *software*. As informações de direção e velocidade do vento foram obtidas a partir das bases do ENVI-met, sendo incorporadas como condições atmosféricas iniciais para cada

simulação. Antes da etapa de processamento, procedeu-se à verificação das propriedades físicas atribuídas aos materiais e das camadas modeladas no QGIS, assegurando que cada superfície apresentasse especificações coerentes com sua composição real.

Antes do início da simulação, foram calibrados dois parâmetros adicionais necessários para o correto funcionamento do modelo no ENVI-met. O primeiro corresponde ao comprimento de rugosidade do solo (z_0), variável importante para representar o atrito do vento com a superfície urbana e, conseqüentemente, a dinâmica do escoamento atmosférico no entorno construído. Com base na tabela 01 apresentada por Wieringa (1992), adotou-se o valor $z_0 = 1$ para o Trecho 10, caracterizado pela morfologia predominantemente horizontal o que reduz a resistência ao fluxo de ar. Já o Trecho 17 deveria ser enquadrado em uma condição de maior rugosidade aerodinâmica, com valor de $z_0 = 2$, em função da elevada verticalização e da maior obstrução ao escoamento do ar. Entretanto, devido à limitação da versão utilizada do ENVI-met, que restringe o valor máximo de rugosidade a $z_0 = 1$, esse valor foi adotado tanto para o Trecho 17 quanto para o Trecho 10.

O período simulado foi de 9 horas, correspondente ao dia 27 de novembro de 2025, e o processamento da simulação teve duração aproximada de 5 horas para cada trecho. O tempo de execução reflete o elevado esforço computacional exigido pelo modelo, em razão da complexidade das interações e da resolução espacial adotada. Para a validação da modelagem do ambiente real desenvolvida no *software* ENVI-met, foram adotados como referência estudos que avaliaram a capacidade do modelo em reproduzir condições microclimáticas observadas em diferentes contextos urbanos. No contexto brasileiro, Gusson e Duarte (2016) realizaram a validação do modelo em duas áreas na cidade de São Paulo e observaram valores de RMSE (*Root Mean Square Error*) entre 1,6 °C e 1,9 °C, MAE (*Mean Absolute Error*) entre 1,4 °C e 1,8 °C, e índice de concordância variando de 0,85 a 0,92. O RMSE representa o erro quadrático médio entre os valores simulados e observados, enquanto o MAE expressa o erro absoluto médio entre essas mesmas medidas. Já o índice de concordância avalia o grau de aderência entre os dados observados e os simulados, variando entre 0 e 1, sendo valores mais próximos de 1 indicativos de melhor desempenho do modelo. Esses resultados reforçam a confiabilidade do ENVI-met para estudos em ambientes urbanos complexos. Em escala internacional, Wang *et al.* (2016) também verificaram o desempenho satisfatório do modelo, registrando diferença máxima de 3,2 °C entre a temperatura do ar observada em campo e a simulada, valor considerado compatível com aplicações em análise microclimática urbana.

Os resultados apresentaram comportamento e distribuição espacial das variáveis microclimáticas coerentes com as condições observadas em campo, indicando que o modelo reproduziu de forma satisfatória a realidade local. Assim, considera-se que o desempenho obtido atende aos objetivos propostos, permitindo o prosseguimento para a etapa seguinte de simulação dos cenários paramétricos.

3.4.2 Modelagem dos Cenários Paramétricos

Uma vez que os modelos das Áreas de Estudo (Trechos 10 e 17) foram validados, representando as configurações reais atuais das regiões, foram desenvolvidos três cenários paramétricos de intervenção. Considerando que não é possível modificar a configuração física das edificações nos bairros estudados, as simulações concentraram-se em variáveis manipuláveis dentro do *software* ENVI-met, permitindo avaliar estratégias de mitigação térmica sem alterar a estrutura das áreas. Assim como na simulação do cenário real, os cenários paramétricos foram executados para o dia 27 de novembro de 2025, com início às 9h e término às 18h. Em todas as simulações, foi posicionado um receptor fixo no mesmo ponto utilizado na etapa de validação, de modo a permitir a comparação direta e pontual entre os diferentes cenários.

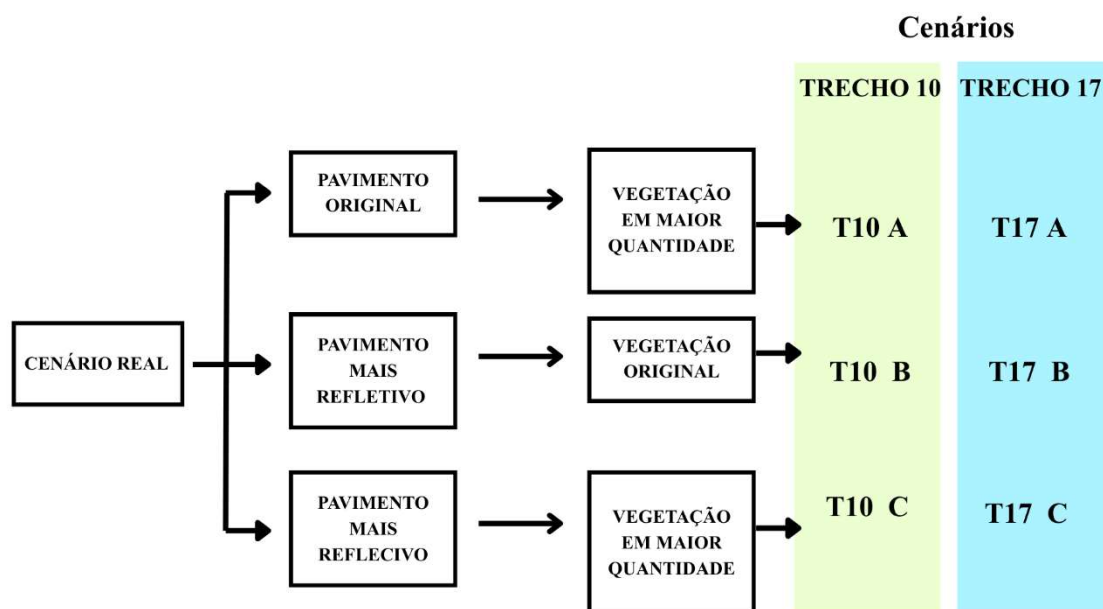


Figura 11. Cenários paramétricos dos Trechos 10 e 17. Fonte: Elaborado pela autora

Visando analisar tanto os efeitos individuais de cada intervenção, quanto os efeitos cumulativos da combinação das estratégias, os cenários foram desenvolvidos conforme

apresentado na Figura 11. Na primeira simulação paramétrica, foi realizado apenas o incremento da vegetação, com a inclusão de quatro novas árvores em cada trecho, sem qualquer alteração no pavimento existente. Essa configuração permitiu analisar o efeito isolado do sombreamento e da evapotranspiração sobre o microclima local.

Na segunda simulação, foi modificada exclusivamente a característica do pavimento, substituindo-se o material original por um pavimento de maior refletância, adotando-se valor de albedo igual a 0,25. Pavimentos convencionais, como o asfalto, apresentam, em geral, albedos inferiores a 0,15, enquanto materiais mais claros, como o concreto e pavimentos refletivos, tendem a registrar valores entre 0,20 e 0,35. Assim, o valor de 0,25 adotado neste estudo situa-se dentro da faixa reportada para pavimentos de maior refletância (GARTLAND, 2008). Nesse cenário, a vegetação existente no trecho foi mantida inalterada.

Por fim, a terceira simulação correspondeu ao cenário de dupla intervenção, no qual foram aplicadas simultaneamente as duas estratégias anteriores: aumento da vegetação e adoção do pavimento refletivo. Essa abordagem permitiu verificar se a combinação das intervenções resultaria em efeitos aditivos ou sinérgicos na mitigação térmica. Dessa forma, foram realizadas três simulações adicionais para cada trecho (Trecho 10 e Trecho 17), totalizando seis cenários paramétricos, além das simulações referentes ao cenário real previamente validado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo da pesquisa, desde a análise dos dados provenientes das medições realizadas em campo até a avaliação dos cenários simulados no ENVI-met, de modo a evidenciar os principais padrões, comportamentos e implicações observadas.

4.1 Caracterização dos Elementos Urbanos Observados em Campo

A caracterização detalhada dos elementos urbanos presentes nos trechos analisados foi aprofundada durante a etapa de coleta em campo, permitindo confirmar e complementar as informações previamente observadas por meio de imagens do *Street View* utilizadas na seleção dos locais, conforme descrito na seção 3.1.1. No local, foi possível identificar, com maior precisão, o tipo de material empregado nas calçadas, os revestimentos presentes nas fachadas e as condições da vegetação local, registrando cada elemento por meio de fotografias. Essa verificação *in loco* proporcionou uma compreensão mais acurada das condições físicas reais, fundamentais para a adequada interpretação dos valores de temperatura e umidade obtidos nas medições.

4.1.1 Trecho 17

Nesse trecho, o revestimento do pavimento é asfáltico, característica previamente identificada por meio das imagens do *Street View* na etapa de seleção e confirmada durante a visita a campo. A via possui três faixas de rolamento por sentido, das quais uma é exclusiva para o transporte coletivo (ônibus), conforme ilustrado na Figura 12A. Por sua vez, a calçada (passeio público) é composta por dois tipos de revestimento: uma área minoritária executada em piso intertravado e outra, predominante, em pedra portuguesa, conforme ilustrado na Figura 12B. Este material contribui para a identidade visual do trecho, embora demande manutenção constante.

As fachadas das edificações e muros lindeiros são predominantemente revestidos por cerâmica, conforme detalhado na Figura 12C. Esse acabamento é comum em Fortaleza por oferecer boa durabilidade e exigir pouca manutenção, consolidando-se como uma escolha recorrente na paisagem urbana local.

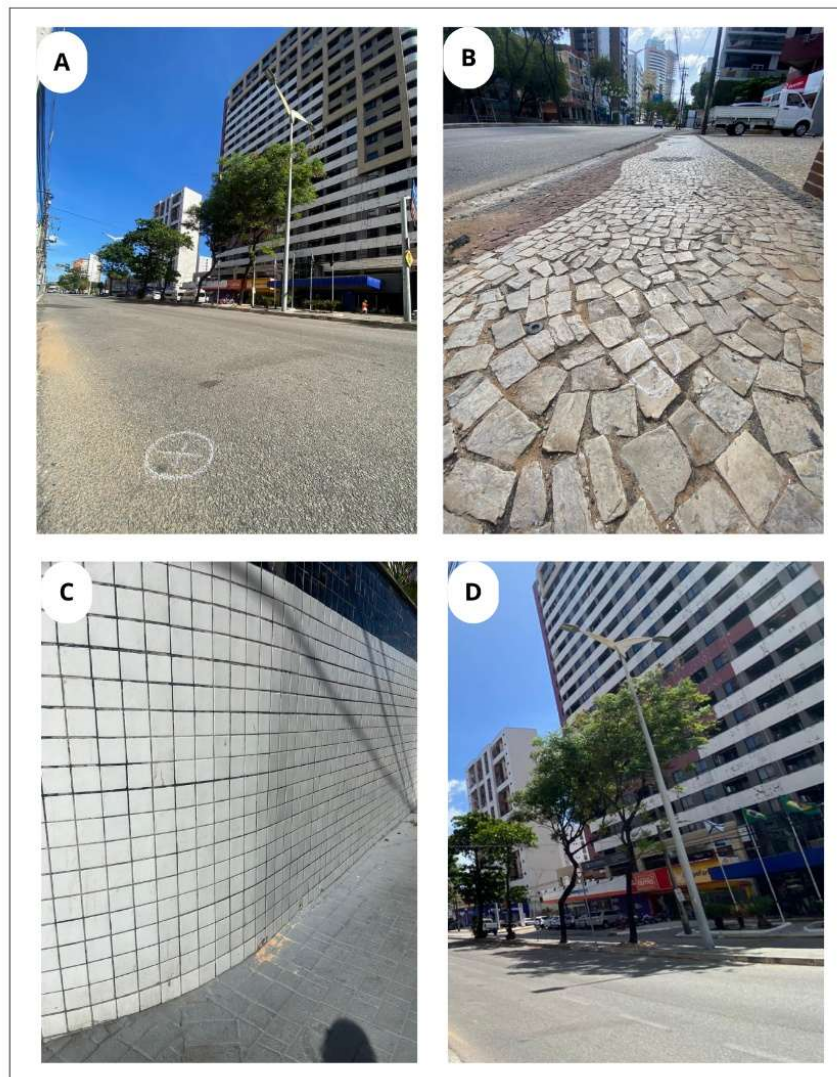


Figura 12. Caracterização dos Elementos Urbanos no Trecho 17. Fonte: Elaborado pela autora

Quanto à vegetação, sua presença está concentrada, sobretudo, no canteiro central e em alguns jardins privados. Conforme se observa na Figura 12D, as árvores localizadas no canteiro apresentam portes de médio a grande, com tronco único e copa elevada. Essa morfologia oferece sombreamento parcial ao leito carroçável e, simultaneamente, preserva a visibilidade transversal entre os dois lados da avenida.

4.1.2 Trecho 10

No Trecho 10 observou-se que, assim como no Trecho 17, que a via é composta por pavimento com revestimento asfáltico, aspecto já identificado pelas imagens do *Street View* e confirmado pela visita *in loco*, conforme ilustrado na Figura 13A. A imagem evidencia ainda a configuração funcional do logradouro, que dispõe de duas faixas de rolamento por sentido e conta com uma ciclovia implantada junto ao canteiro central. No entanto, diferentemente do trecho anterior, a calçada é executada em concreto (piso cimentado), como detalhado na Figura 13B. A imagem evidencia que este pavimento apresenta texturas irregulares e marcas de desgaste.



Figura 13. Caracterização dos Elementos Urbanos no Trecho 10. Fonte: Elaborado pela autora

A paisagem construída apresenta, em sua maioria, fachadas revestidas por cerâmica, como apresentado na Figura 13C, característica que se assemelha ao observado no Trecho 17. Contudo, também há trechos onde o acabamento é composto por reboco seguido de pintura, conferindo uma variação no aspecto visual das edificações.

A vegetação, por sua vez, permanece concentrada no canteiro central, onde se observam árvores de porte pequeno a médio, como ilustrado nas Figuras 13A e D. Com tronco único e copas que se projetam parcialmente sobre a via, esses exemplares, embora menores em comparação aos do Trecho 17, fornecem sombreamento ao leito viário, sobretudo sobre a faixa da ciclovia.

4.2 Análise do Comportamento Térmico dos Elementos Urbanos

Esta seção apresenta os resultados obtidos através das medições de temperatura superficial realizadas *in loco*, abrangendo o período das 09:00 às 18:00hrs. A análise busca correlacionar as variações térmicas observadas com as características materiais e morfológicas identificadas nos Trechos 10 e 17.

4.2.1 Perfil Diário e Picos de Temperatura Superficial

A análise temporal dos dados de temperatura revela um padrão de aquecimento característico de superfícies urbanas, com elevação progressiva das temperaturas durante o período matutino e declínio ao final da tarde. Observa-se que a geometria urbana e a exposição à radiação solar direta ditaram os momentos de pico térmico, que variaram entre 12:00 e 13:00hrs, como apresentado nas Tabelas 4 e 5.

Coleta de Temperatura (°C) dos Elementos Urbanos - Trecho 10

HORÁRIO	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
PAVIMENTO	47,0	48,1	52,9	54,9	55,3	48,3	48,6	41,1	24,9	24,8
CALÇADA	43,9	43,0	49,9	51,2	52,7	47,8	48,6	38,5	25,2	25,1
FACHADA	38,5	38,8	41,1	42,5	45,8	41,8	41,7	37,0	24,9	24,6
VEGETAÇÃO	35,2	36,6	37,8	39,0	39,4	36,3	38,0	37,0	24,6	24,6

Tabela 4. Perfil térmico dos elementos urbanos no Trecho 10. Fonte: Elaborado pela autora

Coleta de Temperatura (°C) dos Elementos Urbanos - Trecho 17

HORÁRIO	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
PAVIMENTO	43,8	43,6	51,6	53,5	50,7	49,5	48,0	41,0	35,1	34,0
CALÇADA	40,9	40,8	46,5	49,4	46,1	46,0	45,8	42,6	34,5	33,6
FACHADA	34,1	34,2	37,9	38,9	38,2	37,0	40,6	40,1	34,0	32,1
VEGETAÇÃO	37,0	36,1	35,8	36,0	34,8	33,4	34,6	34,4	30,6	30,3

Tabela 5. Perfil térmico dos elementos urbanos no Trecho 17. Fonte: Elaborado pela autora

No Trecho 17, o pico de temperatura do pavimento asfáltico ocorreu às 12:00, atingindo 53,5°C. Já no Trecho 10, esse pico foi registrado ligeiramente mais tarde, às 13:00, alcançando uma temperatura máxima superior, de 55,3°C. Essa diferença sugere uma maior incidência de radiação ou menor capacidade de dissipação de calor no Trecho 10 durante o período de máximo aquecimento diário, possivelmente associada a configuração urbana mais adensada presente nessa região, caracterizada pela inexistência de espaçamento entre as edificações. Essa disposição reduz a eficiência do escoamento de ar e dificulta a ventilação local, retardando a dissipação do calor sensível acumulado ao longo do dia.

Esse comportamento térmico também se manifesta nas calçadas, que responderam de forma semelhante ao aquecimento do leito viário ao longo do período analisado. No Trecho 10, a calçada cimentada atingiu seu pico térmico às 13:00, registrando 52,7°C, em sincronia com a máxima do pavimento asfáltico. Tal convergência sugere que, ao longo do intervalo crítico do dia, ambos os elementos absorvem e acumulam calor de maneira comparável, o que pode intensificar as condições térmicas percebidas no nível do pedestre. Em contraste, no Trecho 17, a calçada revestida com pedra portuguesa alcançou sua temperatura máxima ao meio-dia, com 49,4°C, apresentando uma defasagem térmica em relação ao pavimento com revestimento asfáltico, cuja temperatura no mesmo horário foi aproximadamente 4,1°C superior.

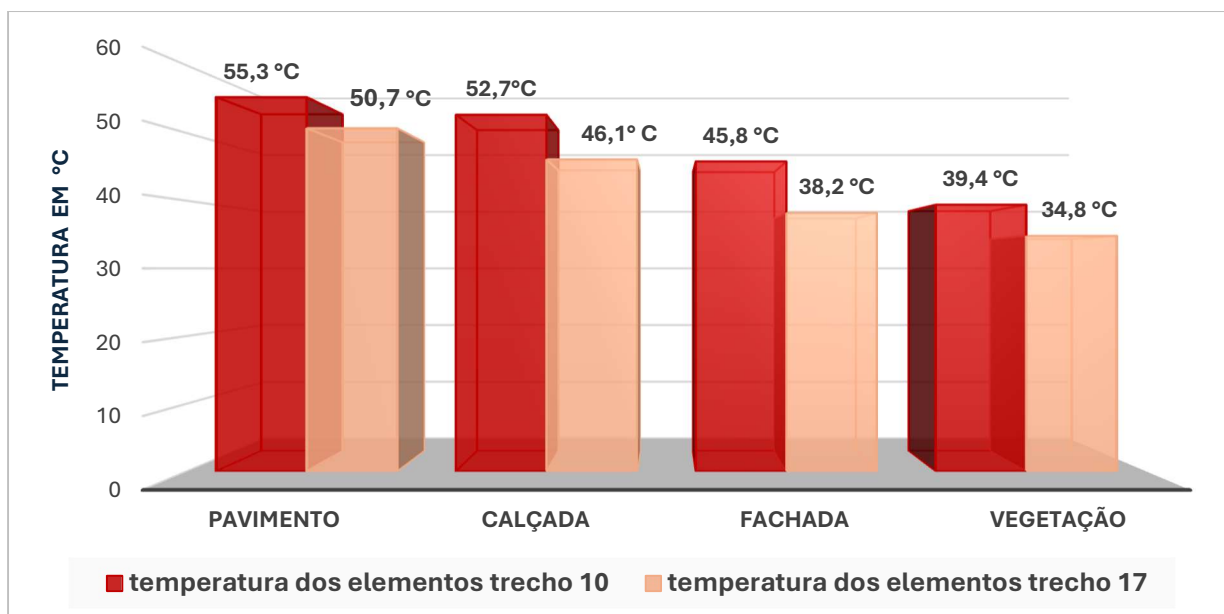


Gráfico 3. Temperatura dos elementos urbanos nos trechos 10 e 17 às 13 horas. Fonte: Elaborado pela autora

Ao realizar um recorte temporal específico para as 13:00, momento em que o Trecho 10 atinge seu pico térmico máximo, torna-se evidente a disparidade microclimática entre as duas regiões. Neste horário, observa-se que todos os elementos urbanos do Trecho 10 apresentaram temperaturas superiores às registradas no Trecho 17, assim como apresentado no gráfico 3, com uma elevação mínima de 4,6°C em todas as superfícies comparadas. As discrepâncias mais acentuadas ocorreram nos elementos verticais e de circulação de pedestres: a fachada do Trecho 10 registrou 7,6°C acima de sua correspondente no Trecho 17 (45,8°C contra 38,2°C), enquanto a calçada cimentada superou a de pedra portuguesa em 6,6°C.

Por fim, a vegetação manteve-se como o elemento mais estável e fresco das regiões analisadas. Mesmo no horário mais crítico do Trecho 10, a vegetação registrou 39,4°C, cerca de 15,9°C a menos que o pavimento, evidenciando sua capacidade de regulação microclimática frente às superfícies construídas. Ao se observar o Trecho 17 no mesmo horário, o desempenho da vegetação foi ainda superior, uma diferença de 4,6°C mais fria em relação ao Trecho 10. Esse comportamento corrobora a caracterização morfológica apresentada anteriormente, onde o porte de médio a grande e as copas elevadas das árvores do Trecho 17 demonstram maior eficiência na manutenção de temperaturas amenas do que os exemplares de menor porte encontrados no Trecho 10.

4.2.2 Dinâmica de Resfriamento e Amplitude Térmica

A análise do período final da coleta, entre 17:00 e 18:00 horas, evidencia comportamentos distintos de dissipação de calor nos dois trechos, que podem estar relacionados à geometria urbana e às condições de sombreamento do entorno. No Trecho 10, observa-se um resfriamento acentuado entre as 16:00 e 17:00 horas, quando a temperatura do pavimento caiu de 41,1°C para 24,9°C em apenas uma hora, correspondendo a uma redução de 16,2°C, por exemplo. As observações realizadas em campo indicam que, nesse horário, o trecho encontrava-se completamente sombreado pelas edificações adjacentes, bloqueando assim a incidência de radiação solar direta. Sendo essa uma das alternativas que justificaria o comportamento térmico com alteração

Em contraste, o Trecho 17 apresentou um processo de resfriamento mais gradual e contínuo. Às 17:00, o pavimento ainda registrava 35,1°C, permanecendo mais de 10°C acima da temperatura observada no Trecho 10 no mesmo horário. Esse comportamento sugere que a configuração espacial do Trecho 17 permite uma exposição mais prolongada à radiação solar, ou que os materiais presentes nesse trecho retêm o calor por mais tempo, retardando sua liberação ao ambiente.

4.3 Monitoramento das Variáveis Atmosféricas

4.3.1 Variação da Temperatura do Ar nos Trechos

Os dados apresentados na Tabela 6, evidenciam uma disparidade térmica atmosférica consistente entre os dois cenários, corroborando a tendência de aquecimento observada nas superfícies. O Trecho 10 apresentou-se sistematicamente mais quente que o Trecho 17 durante todo o período de medição. A média das temperaturas no Trecho 10 manteve-se elevada, iniciando o dia já com seu valor máximo registrado de aproximadamente 35,2°C às 09:00 e sustentando-se acima de 34°C até as 14:00.

Temperatura do Ar (°C)

Horário	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Trecho 17	30,91	31,18	31,34	30,92	30,67	30,31	30,04	29,15	28,11	28,08
Trecho 10	35,29	34,82	34,96	34,95	35,15	34,06	33,86	32,28	30,54	29,86

Tabela 6. Temperatura do ar nos Trechos 10 e 17. Fonte: Elaborado pela autora

Em contraste, o Trecho 17 apresentou um perfil térmico mais ameno. Sua temperatura máxima foi de 31,34°C às 11:00, declinando suavemente ao longo da tarde. Ao comparar os trechos no horário de 13:00, a diferença na temperatura do ar chega a 4,48°C, com o Trecho 10 registrando 35,15°C contra 30,67°C do Trecho 17. Essa diferença de quase 4,5°C confirma a formação de um microclima com temperaturas mais elevadas no Trecho 10, resultado associado à configuração urbana mais adensada e com reduzido espaçamento entre as edificações, condição que, conforme a literatura, dificulta a ventilação natural e favorece o acúmulo de calor nas superfícies urbanas.

4.3.2 Umidade Relativa do Ar

A análise da umidade relativa do ar evidenciou uma relação inversa com a temperatura, na qual a região que apresenta maiores valores térmicos também se caracterizara por condições mais secas. Nesse contexto, o Trecho 17 configurou-se como um ambiente mais úmido e termicamente mais estável, mantendo valores de umidade relativa superiores a 60% ao longo de todo o período analisado, conforme ilustrado na Tabela 7. Os registros variaram de uma mínima de 61,54% a um valor máximo de 76,83% no final da tarde. Esse comportamento pode estar diretamente associado à presença de vegetação de médio e grande porte na região, que, por meio do processo de evapotranspiração, contribui para a liberação de vapor d'água na atmosfera e para a moderação das condições térmicas locais.

Umidade (%)

Horário	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Trecho 17	63,69	62,91	61,54	62,71	64,26	64,67	65,31	70,52	76,39	76,83
Trecho 10	46,86	47,98	47,52	47,41	47,66	51,23	52,87	58,95	64,39	66,63

Tabela 7. Umidade relativa do ar nos Trechos 10 e 17. Fonte: Elaborado pela autora

Ademais, no Trecho 10 os índices de umidade relativa do ar mantiveram-se em níveis baixos ao longo do período de maior incidência solar, variando em torno de 47% entre 09:00 e 13:00. O contraste entre os dois cenários torna-se particularmente evidente às 13:00, quando o Trecho 17 registrava uma umidade de 64,26%, enquanto o Trecho 10 apresentava 47,66%, resultando em uma diferença de 16,60%.

4.3.3 Imagens Térmicas

As imagens térmicas registradas entre 09:00 e 18:00 nos Trechos 10 e 17 evidenciam padrões distintos de distribuição espacial da temperatura ao longo do dia. Diferentemente das medições pontuais, essas imagens permitem observar o comportamento térmico do ambiente urbano como um todo, destacando áreas de maior concentração de calor, zonas de sombreamento e a dinâmica de aquecimento e resfriamento associada à configuração urbana de cada trecho.

A Figura 14 evidencia de forma clara a evolução do campo térmico no Trecho 10, caracterizado, predominantemente, por residências unifamiliares. Logo no início da manhã, às 09:00, observa-se a presença de áreas já aquecidas ao longo do eixo viário, representadas por tons amarelados e alaranjados, onde se observou uma máxima próxima a 52°C, enquanto as superfícies sombreadas, especialmente próximas às fachadas e sob a arborização pontual, aparecem em tons mais escuros, indicando temperaturas mais amenas. Entre 10:00 e 11:00, nota-se um aumento progressivo da temperatura superficial, com intensificação dos tons quentes no leito viário e nas calçadas, sugerindo um rápido acúmulo de calor no ambiente urbano. O período entre 12:00 e 13:00 concentra os padrões térmicos mais elevados, quando predominam cores intensamente quentes, indicando temperaturas superiores a 55°C em pontos

expostos, sobretudo nas superfícies diretamente sujeitas à radiação solar, como o pavimento. A partir das 14:00, embora ainda se observe áreas aquecidas, inicia-se uma gradual redução da intensidade térmica, perceptível pela transição para tons menos intensos. Nos horários finais, entre 17:00 e 18:00, as imagens revelam um resfriamento mais homogêneo do ambiente, com tonalidades mais aproximadas entre si. Observa-se que a legenda de cores varia de 3,8°C a 46,3°C às 17:00 e de 2°C a 35,7°C às 18:00, embora o pavimento ainda se mantenha visualmente mais quente em relação às áreas adjacentes. Esse padrão confirma a tendência de aquecimento rápido e resfriamento relativamente abrupto do Trecho 10 ao longo do dia.

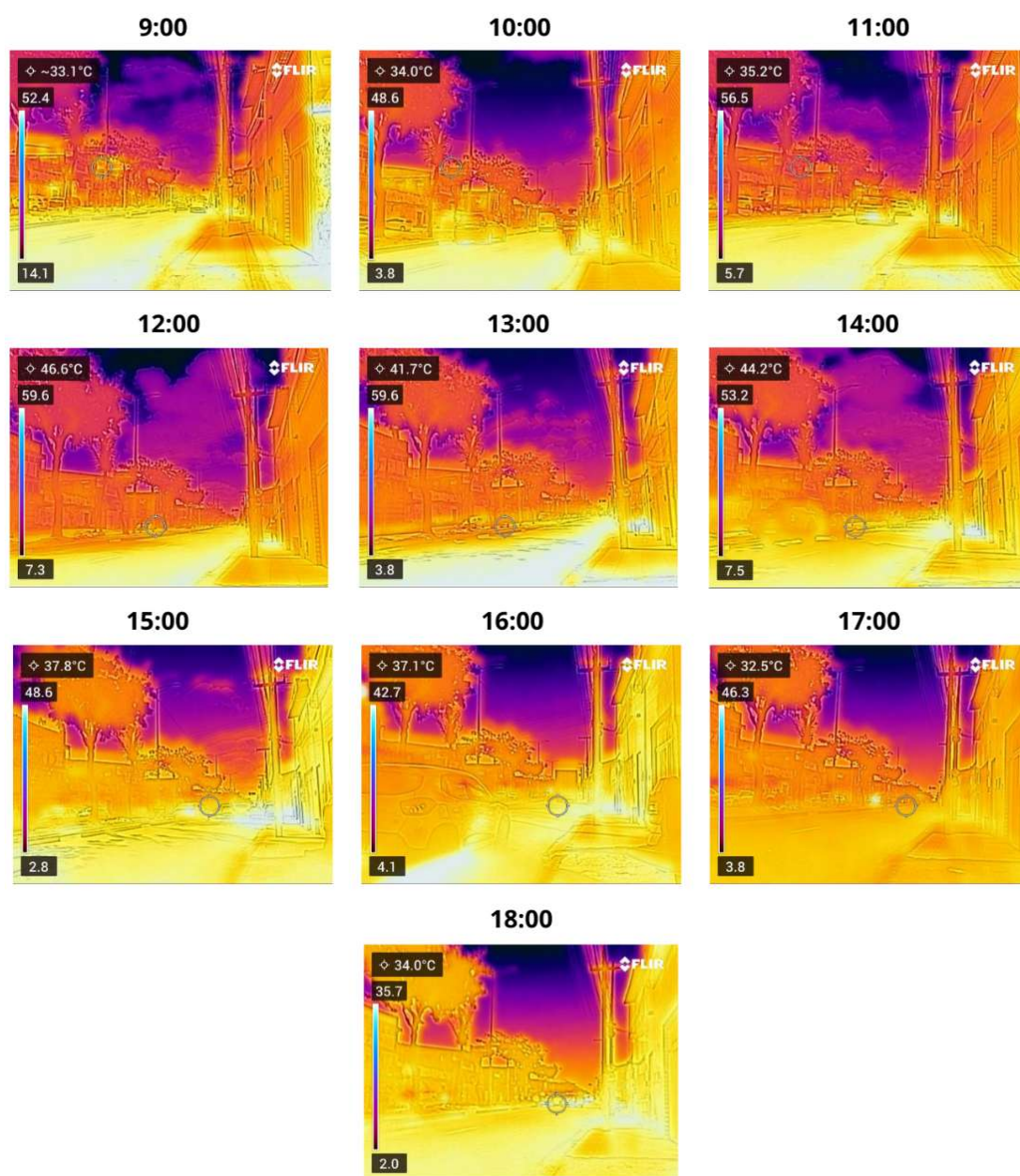


Figura 14. Evolução do campo térmico no Trecho 10 ao longo do dia. Fonte: Elaborado pela autora

Em contraste com o comportamento observado no Trecho 10, as imagens térmicas do Trecho 17, apresentadas na Figura 15. Desde as primeiras horas da manhã, às 09:00, o campo térmico mostra-se menos homogêneo, com temperaturas mais elevadas concentradas principalmente na região do pavimento, apresentado por tons amarelados mais claros que tem valores de temperatura em torno de 40°C, enquanto áreas associadas à vegetação do canteiro central e às fachadas parcialmente sombreadas, sendo destacado por tons mais escuros arroxeados, apresentado na escala de cores mais frias.

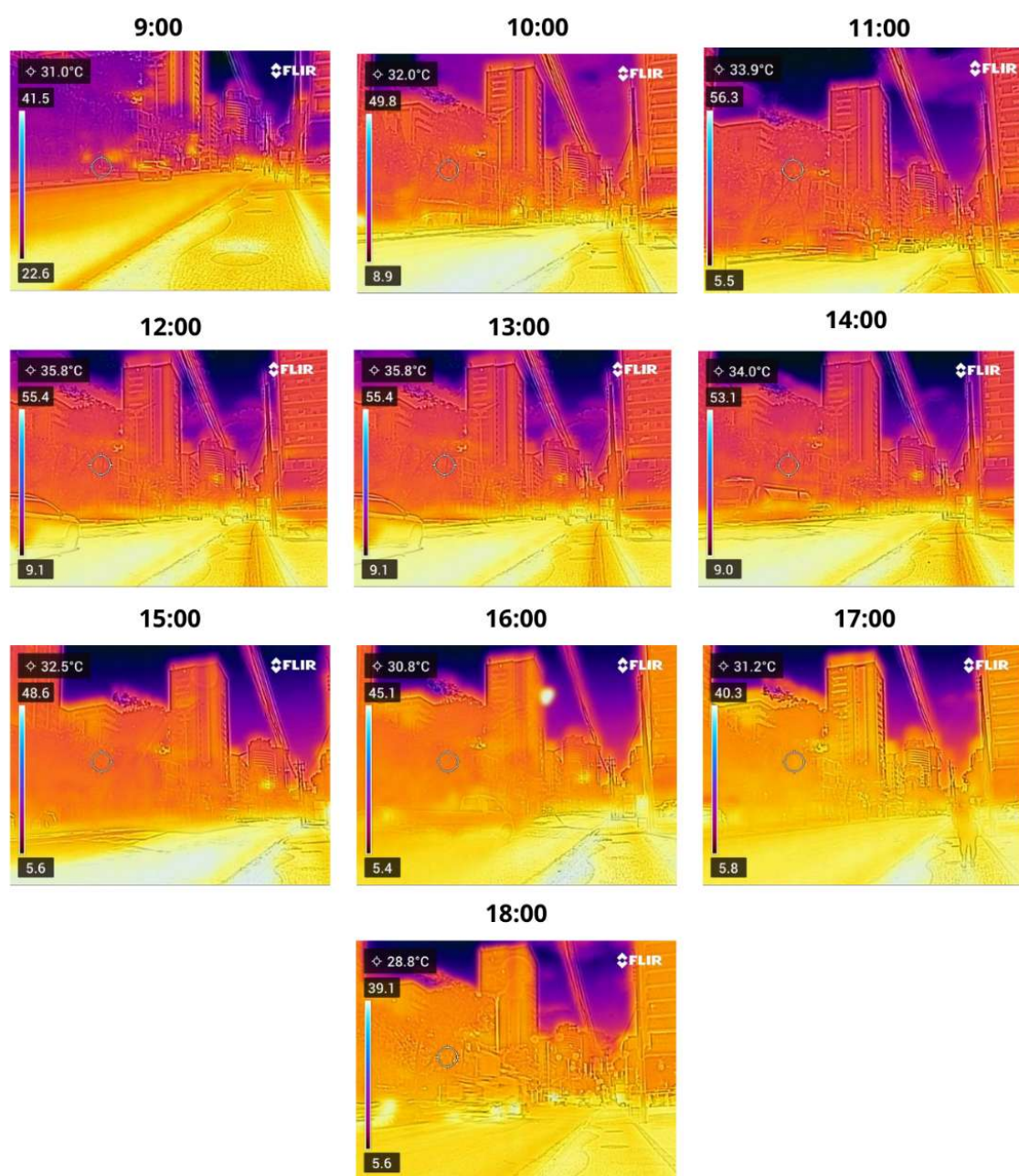


Figura 15. Evolução do campo térmico no Trecho 17 ao longo do dia. Fonte: Elaborado pela autora.

No Trecho 17, como apresentado na Figura 15, o período de maior incidência solar está entre 10:00 e 13:00. Observa-se um aumento progressivo das temperaturas superficiais, semelhante ao registrado no Trecho 10, embora com diferenças de temperatura mais perceptíveis entre as diferentes áreas do trecho. As imagens revelam a permanência de zonas com tons mais escuros arroxeados, ao longo do canteiro central arborizado e nas áreas influenciadas pela sombra projetada pelas edificações verticalizadas, o que reduz a continuidade das manchas térmicas mais quentes. O pico de temperatura foi registrado no intervalo entre 11:00 e 12:00, quando se atingiram valores máximos superiores a 55°C. A partir das 14:00, o resfriamento ocorreu de forma gradual, observando-se uma tendência de homogeneização das temperaturas até o final da tarde, com valores máximos em torno de 40°C ao término da coleta, às 18:00.

Essa diferença na organização do campo térmico entre os dois trechos está relacionada às características dos elementos urbanos previamente identificados. Enquanto o Trecho 10, composto majoritariamente por residências unifamiliares e menor presença de vegetação, apresentou extensas áreas contínuas de aquecimento, o Trecho 17 demonstrou maior heterogeneidade térmica, associada à maior presença de vegetação no canteiro central e à configuração urbana mais espaçada entre uma edificação e outra. Dessa forma, as imagens térmicas reforçam os resultados quantitativos ao evidenciar que a combinação entre morfologia urbana e cobertura vegetal desempenha papel central na diferenciação dos microclimas observados.

4.4 Simulação

As simulações realizadas no ENVI-met permitiram avaliar o comportamento térmico dos Trechos 10 e 17 sob três diferentes configurações urbanas: (i) aumento de vegetação, (ii) alteração do pavimento, (iii) cenário híbrido, combinando aumento da vegetação e pavimento refletivo. A análise das temperaturas do ar registradas nas simulações foi realizada à altura do pedestre de 1,5 m para a avaliação dos mapas. Além disso, um receptor foi inserido para extrair os dados de temperatura do ar e verificar se houve alteração.

4.4.1 - Análise das Temperaturas do Ar a Partir do Receptor

4.4.1.1 - Trecho 10

Os resultados demonstram que as diferenças entre o cenário real simulado e os cenários com intervenção foram imperceptíveis, mantendo-se na ordem de décimos de grau. No cenário de intervenção combinada, que une o aumento de vegetação e a aplicação de pavimento com albedo igual a 0,25, as temperaturas registradas pelo receptor apresentaram valores ligeiramente inferiores aos do cenário real. Ao longo do período entre o final da manhã e o início da tarde, essas diferenças permaneceram predominantemente entre 0,04 °C e 0,06 °C, concentrando-se no intervalo de maior aquecimento diário.

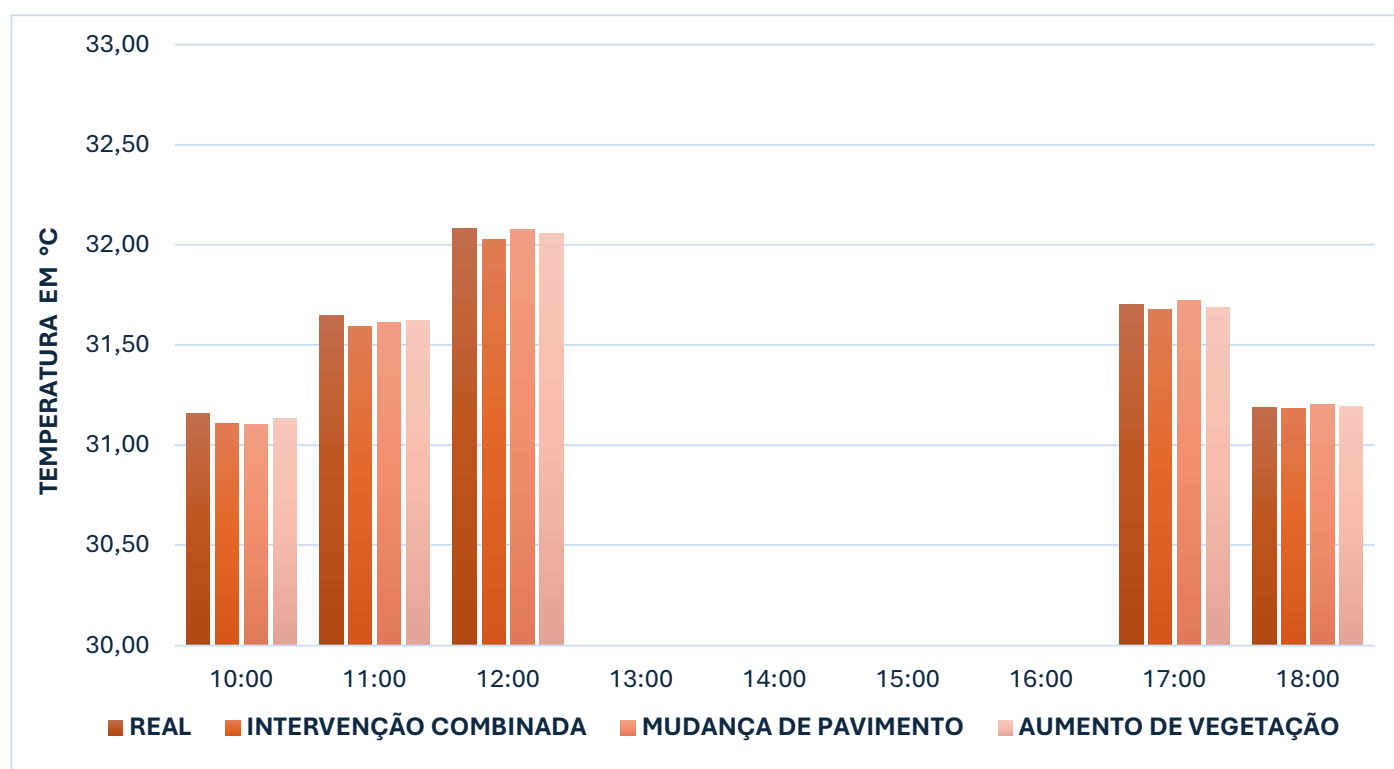


Gráfico 4. Variação horária da temperatura do ar nos cenários simulados no Trecho 10. Fonte: Elaborado pela autora.

O cenário com aumento exclusivo de vegetação também não apresentou redução das temperaturas ao longo do dia. As diferenças em relação ao cenário real permaneceram, em sua maior parte, entre 0,02 °C e 0,03 °C, valores considerados muito baixos e que não caracterizam alteração térmica relevante. No entanto, esses resultados diferem da literatura, que aponta a vegetação como um elemento capaz de reduzir as temperaturas por meio de sombreamento e

evapotranspiração. No presente estudo, embora o acréscimo de vegetação tenha mantido a mesma tendência de comportamento térmico, as diferenças observadas entre 0,02 °C e 0,03 °C foram de baixa magnitude e não caracterizam um efeito de resfriamento consistente.

Assim como observado nos demais cenários, o cenário de alteração isolada do pavimento não apresentou variações térmicas. Embora tenham sido registradas pequenas reduções de temperatura, entre 0,01 °C e 0,05 °C, durante o período da manhã, a partir do início da tarde passaram a ocorrer valores ligeiramente superiores aos do cenário real. Nesse período, o cenário com intervenção apresentou aquecimento discretamente maior, com diferenças em torno de 0,05 °C. Resultados semelhantes foram observados por Ribas (2023), ao avaliar diferentes cenários de pavimentação em um trecho requalificado da rua Ana Bilhar, em Fortaleza, por meio de simulações com o modelo ENVI-met. Foi verificado que as diferenças entre os cenários simulados permaneceram muito reduzidas, com variações máximas de 0,12 °C para a temperatura do ar e 0,4 °C para a temperatura de superfície, contrastando com estudos da literatura. Ribas atribui esse comportamento à reduzida extensão do domínio simulado, uma vez que a área pavimentada representava aproximadamente 18% da área total, o que pode não ser suficiente para provocar alterações térmicas perceptíveis (RIBAS, 2023).

De forma geral, as diferenças observadas entre os cenários permaneceram relativamente pequenas. Uma das hipóteses para esse comportamento está associada ao próprio domínio de modelagem adotado no ENVI-met, limitado a $50 \times 50 \times 40$ grids, com resolução espacial de 3 m, o que corresponde a uma área horizontal aproximada de $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$. Segundo Crank et al. (2018), o ENVI-met não apresenta independência de malha, de modo que alterações na resolução do grid podem modificar os resultados de temperatura simulados. A partir desse entendimento, infere-se que, em domínios espaciais reduzidos, como o adotado neste estudo, os efeitos das intervenções tendem a se manifestar de forma mais localizada e gradual, restringindo a magnitude das variações térmicas observadas.

4.4.1.2 - Trecho 17

Assim como observado no Trecho 10, as diferenças entre o cenário real e os cenários com intervenção foram pequenas, situando-se na ordem de décimos de grau. Entretanto, o comportamento ao longo do dia revela particularidades associadas às condições morfológicas do Trecho 17.

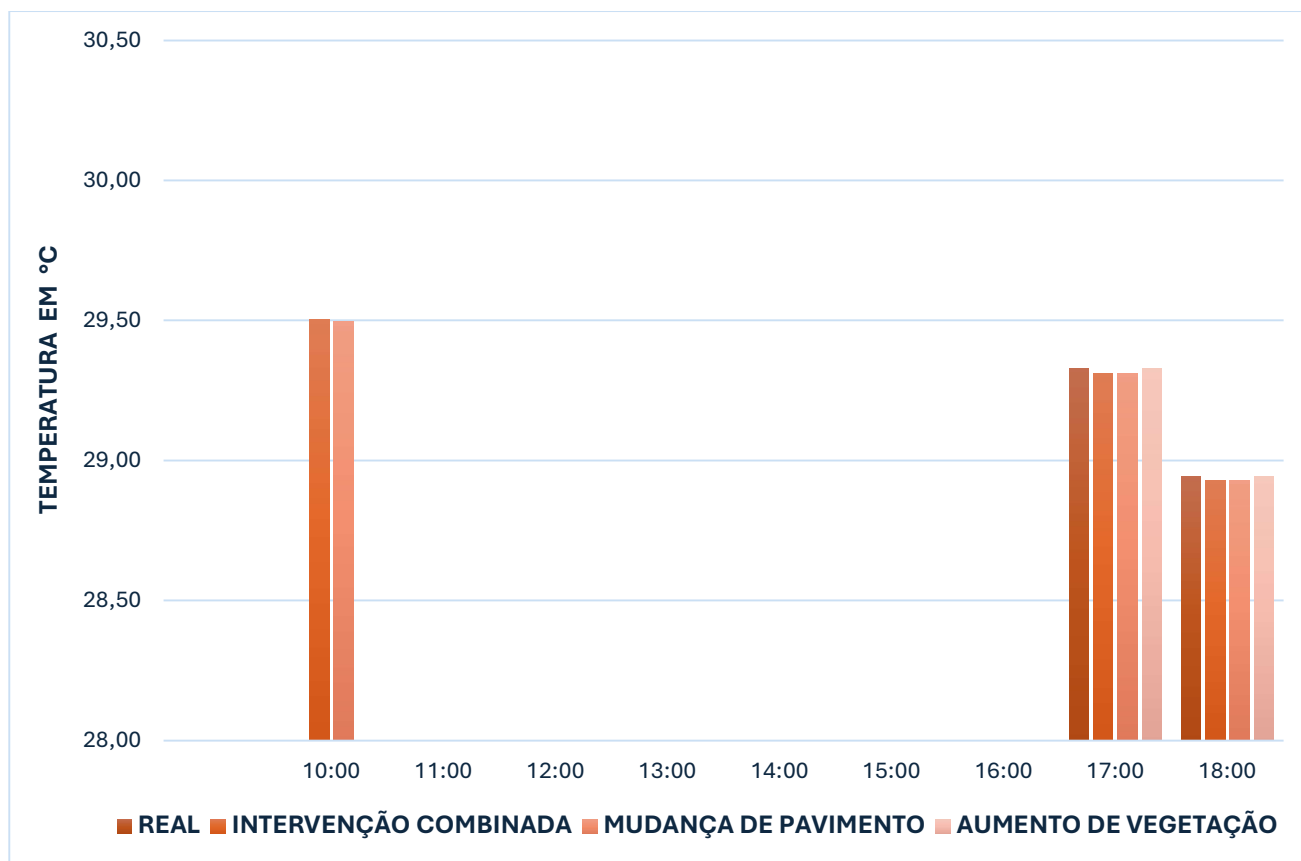


Gráfico 5. Variação horária da temperatura do ar nos cenários simulados no trecho 17. Fonte: Elaborado pela autora

No Trecho 17, o cenário de intervenção combinada, que associa o aumento de vegetação à aplicação de pavimento com albedo de 0,25, apresentou diferenças muito discretas em relação ao cenário real, assim como o trecho 10. Entre o final da manhã e o início da tarde, as variações permaneceram predominantemente entre 0,04 °C e 0,06 °C, valores que, embora concentrados no período de maior aquecimento diário, não caracterizam alteração térmica.

O cenário com alteração isolada do pavimento apresentou, no Trecho 17, comportamento ainda mais estável quando comparado ao Trecho 10. Ao longo do dia, não foram registradas temperaturas superiores às do cenário real, e as diferenças mantiveram-se reduzidas, variando aproximadamente entre 0,03 °C e 0,05 °C durante a maior parte do período analisado.

Já o cenário com aumento exclusivo de vegetação apresentou, no Trecho 17, diferenças ainda menores em relação ao cenário real, com valores de temperatura do ar igual ao cenário real durante boa parte do dia, sobretudo no intervalo entre 10h e 15h. Esse comportamento pode estar associado ao fato de que o Trecho 17 já apresenta nível maior de cobertura vegetal na sua configuração original, quando comparado ao Trecho 10. Assim, o acréscimo de novas áreas verdes teria produzido um efeito marginal imperceptível sobre a temperatura do ar, uma

vez que parte dos benefícios de sombreamento e evapotranspiração já estava presente no cenário real.

Assim como no Trecho 10, a baixa magnitude das diferenças térmicas observadas no Trecho 17 pode estar associada às limitações do domínio de modelagem adotado no ENVI-met, já descritas na Seção 4.4.1.1. Complementarmente, destaca-se a restrição relacionada à parametrização do comprimento de rugosidade, uma vez que o Trecho 17 deveria ser enquadrado em uma condição de maior rugosidade aerodinâmica, com valor de z_0 igual a 2, como sugerido por Wieringa (1992), em função da configuração urbana verticalização presente na região que ocasiona maior obstrução ao escoamento do ar. Entretanto, devido à limitação da versão utilizada do ENVI-met, que restringe o valor máximo de rugosidade a z_0 igual a 1, esse valor foi adotado tanto para o Trecho 17 quanto para o Trecho 10, o que pode ter limitado a representação das diferenças no escoamento atmosférico e na ventilação local.

4.4.2 - Distribuição Espacial da Temperatura do Ar nos Cenários Simulados

As Figuras 16 e 17 apresentam a distribuição espacial da temperatura do ar simulada para os Trechos 10 e 17, respectivamente, nos quatro cenários avaliados e em diferentes horários do período diurno. Esses mapas complementam os resultados obtidos pelos receptores, permitindo observar a organização espacial das variações térmicas no ambiente urbano.

Para interpretação dos resultados, retoma-se a organização dos cenários simulados adotando a nomenclatura codificada apresentada nas Figuras 16 e 17. O Cenário Real corresponde à configuração existente e serve como referência. A partir dele foram gerados três cenários paramétricos: no Cenário T10 A e T17 A manteve-se o pavimento original e incrementou-se a vegetação; no Cenário T10 B e T17 B substituiu-se o pavimento por material com maior refletância (albedo 0,25), preservando a vegetação; e no Cenário T10 C e T17 C combinou-se pavimento refletivo e aumento de vegetação.

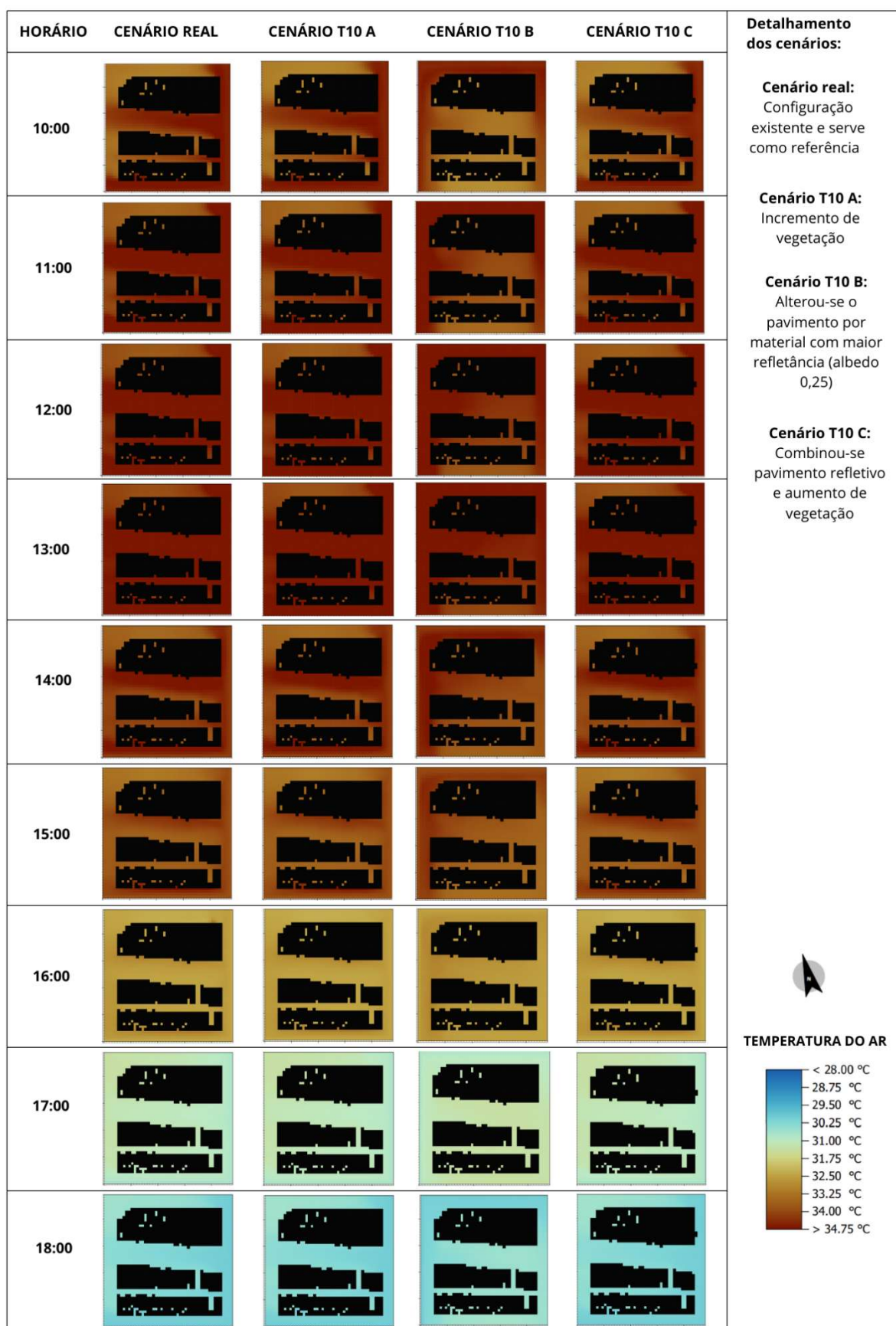


Figura 16. Distribuição espacial da temperatura do ar no Trecho 10 para os quatro cenários simulados, entre 10:00 e 18:00. Fonte: Elaborado pela autora

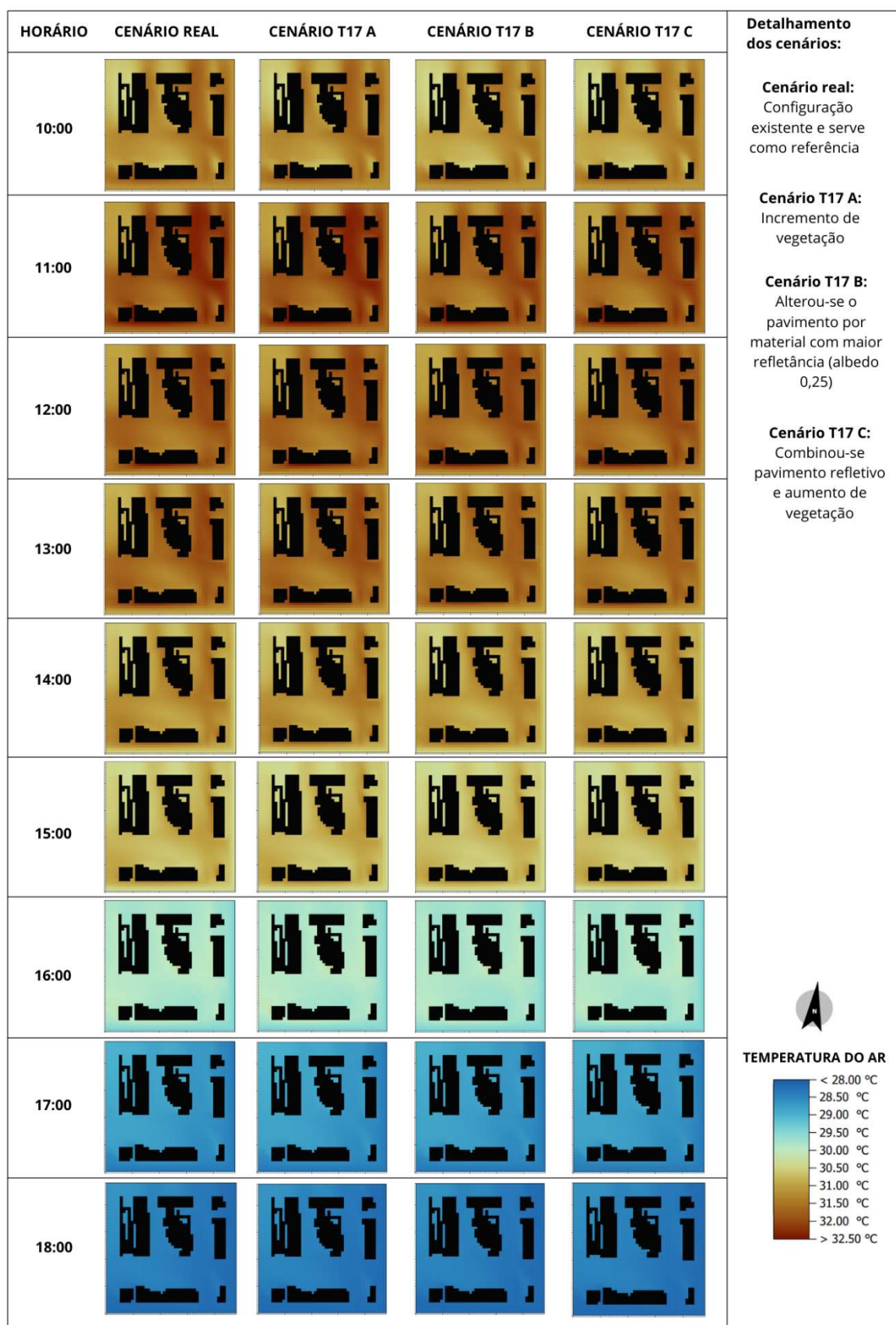


Figura 17. Distribuição espacial da temperatura do ar no Trecho 17 para os quatro cenários simulados, entre 10:00 e 18:00. Fonte: Elaborado pela autora

Nos cenários reais, observa-se que entre o final da manhã e o início da tarde, ocorre intensificação das temperaturas, com expansão de manchas mais quentes sobre superfícies pavimentadas e regiões com menor presença de sombreamento. Esse comportamento é mais evidente entre 11h e 15h, coincidindo com o período de maior aquecimento registrado nos dados pontuais. No Trecho 17, destaca-se ainda a presença de uma via transversal à rua principal que apresenta manchas de temperatura relativamente mais elevadas em comparação às áreas adjacentes. Trata-se de uma via mais estreita, ladeada por edificações altas, que pode configurar um cânion urbano, no qual a relação entre altura das edificações e largura da via tende a restringir a circulação de ar e a dissipação do calor acumulado ao longo do dia. Nessa condição morfológica, a ventilação reduzida e a maior capacidade de aprisionamento de radiação na geometria do cânion podem contribuir para o surgimento de temperaturas do ar mais elevadas em escala local, conforme descrito por Oke (1987), o que é consistente com o comportamento observado nos mapas simulados.

Ainda sobre o cenário real, no Trecho 10 observa-se que, no horário de 13h, correspondente ao pico diário de aquecimento, praticamente toda a área analisada apresenta valores elevados de temperatura do ar, superiores a 34 °C. Esse padrão contrasta com o observado no Trecho 17 no mesmo horário, onde a distribuição espacial das temperaturas apresenta configuração visivelmente menos aquecida, cerca de no mínimo 2°C. Ressalta-se que os dois trechos possuem arranjos morfológicos distintos: enquanto o Trecho 10 é composto predominantemente por edificações térreas justapostas e menor presença de áreas verdes, o Trecho 17 caracteriza-se por edificações verticais mais espaçadas e maior disponibilidade de vegetação.

Nos cenários com incremento de vegetação, representados por T10 A e T17 A, observa-se que a distribuição espacial das temperaturas do ar permanece semelhante àquela verificada no cenário real, sem alterações expressivas nas tonalidades apresentadas nos mapas. Esse comportamento é compatível com os resultados registrados pelos receptores, sobretudo no Trecho 17, onde as diferenças entre o cenário real e o cenário com incremento de vegetação permaneceram, em grande parte do período analisado, zeradas.

Quanto à alteração isolada do pavimento, correspondente aos cenários T10 B e T17 B, observam-se comportamentos distintos entre os dois trechos. No Trecho 10, as modificações na distribuição espacial das temperaturas são mais perceptíveis. Fazendo um recorte no horário de 10 horas, nota-se a reconfiguração das manchas térmicas, com concentração de tonalidades mais escuras nas bordas do mapa e áreas relativamente mais claras na região central, diferindo

do padrão observado no cenário real. Em outros horários do dia também se verificam alterações na distribuição térmica, ainda que de forma mais sutil, sugerindo redistribuição das áreas aquecidas ao longo do trecho.

No Trecho 17, por sua vez, os mapas mantêm o padrão espacial observado no cenário real, com apenas pequenas suavizações nas tonalidades, sem mudança expressiva no arranjo geral das temperaturas. Esse comportamento está em consonância com os registros do receptor, que indicaram reduções discretas de temperatura do ar, variando entre 0,03 °C e 0,05 °C.

Ao se analisar o cenário híbrido, que combina alteração do pavimento com o aumento de vegetação, observa-se comportamento distinto entre os dois trechos. No Trecho 17, a distribuição espacial das temperaturas do ar apresenta redução perceptível na extensão e na intensidade das áreas mais quentes, sobretudo entre 11h e 14h, período em que as condições de aquecimento são mais críticas. Já no Trecho 10, as mudanças representadas nos mapas não se destacam de forma evidente, com tonalidades muito semelhantes às observadas no cenário real. Embora o receptor tenha registrado reduções de temperatura de até 0,06 °C ao longo do dia, essa magnitude não gerou contrastes espaciais claramente perceptíveis nos mapas do cenário híbrido.

4.5 - Diferenças Microclimáticas entre Áreas Urbanas com Distintos Níveis de IDH

Os resultados sugerem que áreas urbanas associadas a menor IDH podem experimentar exposição térmica mais intensa ao longo do dia, sobretudo nos horários críticos de aquecimento. No presente estudo, essa condição se evidenciou no Trecho 10, onde as temperaturas do ar ultrapassaram 34 a 35°C entre 12h e 13h, enquanto no Trecho 17, de maior IDH, os valores permaneceram em torno de 31°C a 32°C nesse mesmo intervalo. De forma complementar, observaram-se diferenças superiores a 15 pontos percentuais na umidade relativa do ar, indicando não apenas maior aquecimento, mas também ambiente mais seco no trecho socialmente mais vulnerável. Esses contrastes térmicos e higrométricos reforçam que a experiência microclimática urbana não é homogênea no território e tende a penalizar os grupos socialmente mais vulneráveis.

Parte dessas diferenças também se relaciona às características físicas dos materiais urbanos e à distribuição da vegetação observadas em campo. As medições realizadas nas superfícies dos trechos analisados mostraram que as calçadas cimentadas apresentaram

temperaturas superiores às calçadas em pedra portuguesa, com variações que chegaram a aproximadamente 6,6 °C. Esse comportamento indica que materiais menos refletivos e com maior capacidade de armazenamento térmico podem intensificar o aquecimento local. Além disso, o Trecho 10 apresenta menor presença de áreas vegetadas quando comparado ao Trecho 17, o que reduz o sombreamento e os efeitos de evapotranspiração, contribuindo para a elevação das temperaturas do ar registradas nesse setor da cidade.

Sob essa perspectiva, as diferenças observadas entre os trechos analisados podem ser interpretadas como uma manifestação de injustiça climática urbana, na qual grupos socialmente mais vulneráveis estão mais expostos aos efeitos adversos do aquecimento, apesar de contribuírem menos para os processos que intensificam as ilhas de calor. Assim, o microclima urbano deixa de ser apenas um fenômeno físico e passa a refletir desigualdades socioespaciais históricas, reforçando a necessidade de que estratégias de mitigação climática considerem critérios de equidade territorial. A priorização de intervenções em áreas de menor IDH, como o aumento da cobertura vegetal e a adoção de materiais urbanos com melhor desempenho térmico, mostra-se fundamental para a redução das assimetrias ambientais e para a promoção de melhores condições de conforto térmico e qualidade de vida na cidade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo teve como objetivo investigar a influência da morfologia urbana, pavimentação e cobertura vegetal no microclima local, comparando dois trechos urbanos localizados ao longo do itinerário da linha de ônibus 052 em Fortaleza, bem como avaliar o desempenho térmico de estratégias de mitigação simuladas no *software* ENVI-met. A combinação entre coleta de dados em campo, caracterização urbana detalhada e modelagem microclimática permitiu compreender de forma integrada como diferentes configurações espaciais interferem nas condições térmicas urbanas.

Os resultados das medições mostraram que o Trecho 10, situado em área de menor IDH, apresentou temperaturas do ar sistematicamente superiores às observadas no Trecho 17, localizado em bairro de maior IDH, com diferenças próximas a 2 °C em diversos horários do dia. Essa discrepância tornou-se mais evidente no intervalo entre 11h e 13h, correspondente ao período de maior aquecimento diário, enquanto o Trecho 10 atingiu valores superiores a 35 °C nesse intervalo, o Trecho 17 manteve-se abaixo de 31,5 °C, resultando em discrepância térmica superior a 3 °C entre as áreas analisadas.

As intervenções simuladas no *software* ENVI-met apresentaram reduções discretas na temperatura do ar, na ordem de décimos de grau, com melhor desempenho para o cenário híbrido, que combinou pavimento refletivo com aumento de vegetação. O pavimento refletivo aplicado isoladamente apresentou resultados distintos entre os trechos, produzindo reduções no Trecho 17, mas registrando, no Trecho 10, temperaturas ligeiramente superiores às do cenário real, com diferenças de até 0,05 °C em determinados horários.

É importante destacar que a versão utilizada do ENVI-met impõe algumas restrições operacionais que podem ter influenciado a magnitude das diferenças observadas entre os cenários. O domínio de simulação limitado a $50 \times 50 \times 40$ *grids*, associado à resolução espacial de 3 m, tende a concentrar os efeitos das intervenções em uma escala localizada, podendo atenuar sua expressão espacial e reduzir a amplitude dos contrastes térmicos. Soma-se a isso a limitação no ajuste de um parâmetro microclimático importante, que é o comprimento de rugosidade aerodinâmica máximo permitido. Essas condições podem ter contribuído para que os efeitos das intervenções se manifestassem de forma mais sutil nos resultados obtidos.

Nesse sentido, recomenda-se que estudos futuros considerem a utilização da versão completa do *software*, que permite a ampliação do domínio de cálculo, maior liberdade de parametrização física e simulações estendidas, possibilitando avaliar com maior robustez o comportamento térmico urbano em diferentes escalas e condições ambientais. Além disso, a realização de novas simulações e campanhas de monitoramento em diferentes estações do ano contribuiria para a compreensão dos efeitos sazonais sobre o microclima urbano, permitindo verificar se os padrões observados neste estudo se mantêm sob distintas condições atmosféricas.

De igual modo, recomenda-se que futuras investigações ampliem o recorte territorial de análise, incorporando outros trechos localizados ao longo do itinerário da linha 052. A aplicação da mesma abordagem metodológica em áreas com diferentes padrões de ocupação, densidade construtiva e cobertura vegetal permitiria comparar de forma mais abrangente o comportamento térmico entre distintos contextos urbanos da cidade. Essa ampliação espacial contribuiria, ainda, para aprofundar a compreensão das desigualdades microclimáticas associadas às condições socioeconômicas, fornecendo subsídios técnicos para a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação do calor urbano.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. A. M.; LOMARDO, L. L. B. Efeito da vegetação no microclima urbano: estudo de caso no Rio de Janeiro com uso de simulações no ENVI-met. Paranoá, Brasília, DF, v. 18, e54530, 2025.

ALVARENGA, J. O.; SALES, M. C. L. O clima nos espaços intra-urbanos de Fortaleza-Ceará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 10., 2014, Curitiba. *Anais...* Curitiba: ABCLIMA, 2014. p. 355-366. ISBN 978-85-7846-278-9.

ALVES, E. D. L. Ilha de Calor ou Ilha de Energia Térmica: um conceito aberto à discussão. Espaço Acadêmico, [S. l.], n. 110, p. 124-129, jul. 2010.

AMORIM, M. O clima urbano de Presidente Prudente-SP. 2000. Tese (Livre-Docência) – Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANOREG/SP. Edifício Martinelli: Primeiro arranha-céu de São Paulo celebra centenário em 2024. [S. l.], 17 out. 2024. Disponível em: <https://www.anoregsp.org.br/noticias/90365/edificio-martinelli-primeiro-arranha-ceu-de-sao-paulo-celebra-centenario-em-2024>. Acesso em: 23 maio 2025.

BARROS, H. R. de; LOMBARDO, M. A. A relação entre ilhas de calor urbana, ocupação do solo e morfologia urbana na cidade do Recife. Revista Geonorte, Manaus, edição especial 2, v. 2, n. 5, p. 65–76, 2012.

BRASIL ESCOLA. *Urbanização: processo, fatores e consequências*. Disponível em: <https://brasile scola.uol.com.br/brasil/urbanizacao.htm>. Acesso em: 10 set. 2025.

BRUSE, M. Modeling and strategies for improved urban climates. In: ENVIRONMENTAL SOFTWARE AND SERVICES GMBH. Modelling and strategies for improved urban climates. [S. l.]: Environmental Software and Services GmbH, 1999.

BRUSE, M. Simulating human thermal comfort and resulting usage patterns of urban open spaces with a multi-agent system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 24., 2007, Singapura. Proceedings of the 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture. [S. l.]: *Passive and Low Energy Architecture (PLEA)*, 2007. p. 699-706.

CALLEJAS, Ivan Júlio Apolônio; DURANTE, Luciane Cleonice; ROSSETI, Karyna de Andrade Carvalho. Contribuição da pavimentação asfáltica para o aquecimento de áreas urbanas. *E&S – Engineering and Science*, v. 1, n. 3, p. 64–72, 2015

CASTRO, L. C. Estudo e desenvolvimento de materiais "frios" para pavimentação urbana. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015.

CAVALCANTE, M. G.; BARROSO, P. H. M. A hegemonia do edifício habitacional na verticalização de Fortaleza. In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE

PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO, 4., 2016, Porto Alegre. Anais do IV ENANPARQ. Porto Alegre: PROPAR/UFRGS, 2016.

CEARÁ. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE). Sistema de Informações Geossocioeconômicas do Ceará (IPECEDATA): Perfil Municipal. Disponível em: <http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-data-web/module/perfil-municipal.xhtml>. Acesso em: 26 out. 2025.

CRANK, Peter J.; SAILOR, David J.; BAN-WEISS, George; TALEGHANI, Mohammad. *Evaluating the ENVI-met microscale model for suitability in analysis of targeted urban heat mitigation strategies*. *Urban Climate*, v. 26, p. 188-197, 2018.

FIALHO, E. S. A pesquisa climatológica realizada por geógrafos. *Revista Brasileira de Climatologia*, Campinas, v. 6, p. 193-212, 2010.

FREITAS, T. P. F. O clima urbano das cidades e suas interações com a arquitetura e a geografia. *Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia*, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 262–272, dez. 2018.

GARTLAND, L. Ilhas de Calor: Como Mitigar Zonas de Calor em Áreas Urbanas. Tradução de Silvia H. Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

GAVIRA, M. de O. Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento. 2003. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

HOMESIGHT. The impact of urban infrastructure on urban heat islands. [S.l.: s.n.], s.d. Disponível em: <https://homesight.org/the-impact-of-urban-infrastructure-on-urban-heat-islands/>. Acesso em: 24 ago. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo 2022: cerca de oito a cada dez pessoas moravam em casas, mas cresce proporção de moradores em apartamentos. Agência de Notícias IBGE, [S. l.], 11 dez. 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/39239-censo-2022-cerca-de-oito-a-cada-dez-pessoas-moravam-em-casas-mas-cresce-proporcao-de-moradores-em-apartamentos>. Acesso em: 23 maio 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Fortaleza – Panorama. [S. l.], [2025?]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza/panorama>. Acesso em: 7 jul. 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). IPECE Data: Perfil Municipal. Fortaleza, [s.d.]. Disponível em: <http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-data-web/module/perfil-municipal.xhtml>. Acesso em: 25 out. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *The future of cooling: opportunities for energy-efficient air conditioning*. Paris: International Energy Agency, 2018.

KRÜGER, E. L.; GONZALEZ, D. E. G. Impactos da alteração no albedo das superfícies no microclima e nos níveis de conforto térmico de pedestres em cânions urbanos. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 89–106, 2016

LIMA JÚNIOR, Antonio Ferreira; GOMES, Flávia Ingrid Bezerra Paiva; ZANELLA, Maria Elisa. O Índice de Calor (HI) na cidade de Fortaleza, Ceará. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, v. 37, e73091, 2025. DOI: 10.14393/SN-v37-2025-73091.

MENDES, Flávio Henrique; ROMERO, Hugo. Mudanças no uso e ocupação do solo e suas influências no clima urbano de cidades médias. *Revista LABVERDE*, São Paulo, v. 13, e181743, 2024. DOI: 10.11606/ISSN.2179-2275.LABVERDE.2024.181743.

MUNDO EDUCAÇÃO. Fortaleza. [S. l.], [2025?]. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/fortaleza.htm>. Acesso em: 1 jul. 2025.

NÓBREGA, R. S.; VITAL, L. A. de B. Influência da urbanização sobre o microclima de Recife e formação de ilha de calor. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 3, n. 3, p. 151–156, 2010.

OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*. 2. ed. London: Routledge, 1987.

OKE, T. R. *The energetic basis of the urban heat island*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, [S. l.], v. 108, n. 455, p. 1–24, jan. 1982.

OTIS. Depois dele o mundo. [S. l.]: Otis Worldwide, 2020. Disponível em: <https://www.otis.com/documents/256045/10520115/Brasil%2BInstitucional.pdf/c5736fdc-8f03-6976-ba60-8fabd549c2fc>. Acesso em: 27 maio 2025.

PAULA, D. C. J.; MIRANDA, S. A.; VALIN JR., M. O.; SOUZA, N. S.; NOGUEIRA, J. de S.; NOGUEIRA, M. C. de J. A.; SANTOS, F. M. de M. Microclima urbano: comparação antes e pós intervenções urbanísticas em Cuiabá-MT. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. Anais do XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre: ANTAC, 2016.

PENHA, José Leonardo Cavalcante da. Desigualdade na infraestrutura viária: uma análise da condição superficial dos pavimentos em áreas com diferentes perfis de vulnerabilidade social. 2025. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025.

PEREIRA, Natasha Hansen Gapski. ANÁLISE DO MICROCLIMA URBANO ATRAVÉS DE MODELAGEM COMPUTACIONAL: ESTUDO DE CASO EM BALNEÁRIO CAMBORIU-SC. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022

PREFEITURA DE FORTALEZA. Bairros de Fortaleza. Disponível em: <https://bairros.fortaleza.ce.gov.br/fortaleza>. Acesso em: 11 out. 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA. Desenvolvimento humano, por bairro de Fortaleza. Fortaleza Dados Abertos, 2022. Disponível em:

https://dados.fortaleza.ce.gov.br/dataset/desenvolvimento_humano_bairro/resource/f7cf7081-b0e3-4c9c-b89e-0ee1b3755437. Acesso em: 22 out. 2025.

PREFEITURA DE FORTALEZA. Diálogos Rumo à COP: prefeito Evandro assina decreto criando cinco parques urbanos. 10 set. 2025. Disponível em: <https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/dialogos-rumo-a-cop-prefeito-evandro-assina-decreto-criando-cinco-novos-parques-urbanos>. Acesso em: 17 set. 2025.

RIBAS, L. V. da S.; SANTOS, T. R. dos; CASTELO BRANCO, V. T. F. Análise do impacto de diferentes estratégias de pavimentação sobre o microclima urbano. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 37., 2023, Fortaleza. Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. [S. l.]: Galoá Proceedings, 2023.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). *Beating the heat: a sustainable cooling handbook for cities*. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2021.

URBNEWS. Fortaleza se torna o destino mais buscado por turistas internacionais no Nordeste. Disponível em: <https://urbnews.com.br/2025/09/30/fortaleza-se-torna-o-destino-mais-buscado-por-turistas-internacionais-no-nordeste/>. Acesso em: 11 out. 2025.

WANG, Yupeng; BERARDI, Umberto; AKBARI, Hashem. *Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada*. *Energy and Buildings*, v. 114, p. 2-19, 15 fev. 2016.

WESLEY, Elizabeth Jane; MACKRES, Eric; SHICKMAN, Kurt; ANZILOTTI, Eillie; PALMIERI, Madeline. As cidades estão cada vez mais quentes, mas infraestruturas melhores podem amenizar o calor. WRI Brasil, 12 set. 2025. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/impactos-calor-urbano-cidades-solucoes-passivas-natureza-adaptacao>. Acesso em: 14 dez. 2025, às 11h.

WIERINGA, J. Updating the Davenport Roughness Classification. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 41, p. 357–368, 1992.