

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA - CCET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA – PPGEU

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE TELHADO
VERDE E SEU POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE ILHAS DE CALOR
URBANO EM SÃO CARLOS - SP**

BEATRIZ DOS REIS PEREIRA

São Carlos

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA - CCET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA – PPGEU

ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE TELHADO
VERDE E SEU POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DE ILHAS DE CALOR URBANO
EM SÃO CARLOS - SP

BEATRIZ DOS REIS PEREIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana pela Universidade Federal de São Carlos - *Campus* São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientador: Érico Masiero

São Carlos

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Beatriz dos Reis Pereira, realizada em 08/07/2024.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Érico Masiero (UFSCar)

Prof. Dr. Ricardo Victor Rodrigues Barbosa (UFAL)

Profa. Dra. Grace Tibério Cardoso (ATITUS)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

Dedico este trabalho à minha família, amigos e a todos os pesquisadores e acadêmicos.

AGRADECIMENTOS

Tenho muito a agradecer à muitas pessoas que estiveram e ainda estão comigo nesta jornada. Mas me permito lembrar que se não fosse pela minha persistência e por nunca desistir dos meus objetivos, eu não teria chegado aqui.

Sou grata aos meus pais, Edna Reis Pereira e Paulo Roberto Pereira, que sempre apoiaram minha vontade de seguir a área acadêmica, e que me ajudaram tanto financeiramente, quanto em partes do projeto que foram essenciais.

Agradeço também ao meu companheiro Guilherme de Melo Pinheiro, que nunca permitiu que o pensamento de desistência se tornasse forte o suficiente, e por sempre me lembrar o quanto já conquistei, e o quanto ainda posso conquistar.

Agradeço a todos os amigos que fiz ao longo deste mestrado, dentre eles, Júlia Neves Andrade, Randy Perea Álvarez, Rafael Augusto de Oliveira, Tatiane Ferreira Olivatto e Stanley Cramolichi. E também ao Michel Liberato, meu colega de graduação que me ajudou muito no QGIS, Sempre me ajudando e dando apoio em tudo e me lembrando o quanto é importante ter amigos ao lado.

Agradeço ao Rafael Perussi que me tirou diversas dúvidas sobre como realizar o experimento com as plataformas e sobre as melhores espécies vegetais para se cultivar, além de me tranquilizar sobre empecilhos e dificuldades do projeto.

Agradeço aos meus colegas do grupo de pesquisa NUPA (Núcleo de Pesquisa do Ambiente Construído), Angela Arruda e Luiz Fernando Kowalski, por me ajudarem e ensinarem a manusear os equipamentos e *softwares* que utilizei ao longo deste trabalho.

Agradeço finalmente ao meu orientador, Érico Masiero, por ter me guiado nos períodos de dificuldades, por me ajudar a visualizar melhor os resultados, e por esclarecer todas as minhas dúvidas ao longo da pesquisa.

Sou grata a todos que me ajudaram e me deram suporte, que me inspiraram e acreditaram em mim de alguma forma!

Todos fizeram muita diferença neste trajeto. Obrigada!

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é se não uma gota d’água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

O aumento da temperatura do ar é um dos fenômenos que podem ser notados tanto em dados científicos como através da sensação térmica, e isto vem ocorrendo devido à alta degradação ambiental, causada principalmente pela intensa urbanização. O uso dos telhados verdes pode contribuir, tanto para combater os efeitos do calor excessivo no interior e no exterior das edificações, como para o aumento da umidade do ar e redução das Ilhas de Calor Urbano, tornando as cidades mais seguras, confortáveis e sustentáveis. Desta forma, esta pesquisa teve como objetivo analisar a contribuição de telhados verdes para a diminuição de temperatura do ar e da superfície de cobertura. O experimento foi realizado na cidade de São Carlos-SP, por meio de medições de temperatura de superfície e do ar em duas plataformas experimentais de telhados verdes, sendo uma com solo exposto; e outra com grama amendoim. Após esta etapa, foram coletados dados de temperatura do ar, da área subsuperficial e área de base de ambas as plataformas. Os resultados obtidos para a plataforma com grama amendoim, mostraram redução entre 5°C e 6°C na área subsuperficial e entre 1°C e 2°C na área de base, em comparação com a plataforma com solo exposto. Pôde-se verificar que no período da noite entre 18h e 8h, a plataforma com vegetação apresentou menor queda de temperatura, mantendo o calor; já no período do dia entre 8h e 18h, esta plataforma apresentou redução significativa de temperatura. Para a simulação no *software ENVI-met* foram coletados dados de temperatura do ar em uma área de habitação de interesse social, a qual foi modelada com telhados convencionais de cerâmica e telhados verdes. Os resultados das simulações trouxeram diminuição de temperatura do ar de até 0,67°C no horário de 15h, para a área com telhados verdes, e pode ser considerado um valor significativo observando-se em escala microclimática, o que demonstra seu potencial de mitigação de ilhas de calor urbano. Portanto, é possível afirmar que a implantação de telhados verdes tem resultados positivos a fim de reduzir temperatura em estações e climas quentes, como em mantê-la em casos de estações e climas mais frios.

Palavras-chave: Telhados verdes; Plataforma Experimental; Grama Amendoim; Grama Esmeralda; *ENVI-met*.

ABSTRACT

The increase in air temperature is one of the phenomena that can be noticed both in scientific data and through the thermal sensation. This has been occurring due to high environmental degradation, mainly caused by intense urbanization. The use of green roofs can contribute to combat the effects of air temperature inside and outside buildings, as well as to increase air humidity and reduce Urban Heat Islands, turning cities safer, more comfortable and sustainable. Thus, this research aimed to analyze the contribution of green roofs to the decrease in air and cover surface temperature. The experiment was realized at the city of São Carlos – SP, Brazil, through the measurement of the air in surface temperature in two platforms, one with exposed soil and another with peanut grass. After this step, air temperature data were collected from the subsurface area and base area under both platforms. The results obtained for the platform with peanut grass showed a reduction of 5°C to 6°C in the subsurface area, and 1°C to 2°C in the base area, in comparison with the platform with exposed soil. For the period at night between 6 pm and 8 am, the platform with vegetation had a lower decrease of temperature, maintaining the heat. The period of the day between 8 am and 6 pm, this platform revealed a significant temperature reduction. For the simulation using the ENVI-met software, air temperature data was collected in a social housing area, which was modeled with conventional ceramic roofs and green roofs. The results brought a decrease in air temperature of up to 0.67°C at 3pm, for the area with green roofs. This can be considered a significant value when observed on a microclimatic scale, which demonstrates its mitigation potential of urban heat islands. In this way, it is possible to claim that the implementation of green roofs has positive results to reduce temperature in hot seasons and climates, as well as to maintain it in cases of colder seasons and climates.

Keywords: Green Roofs; Experimental Platforms; Peanut Grass; Emerald Grass; *ENVI-met*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Como ocorre o fenômeno de ilhas de calor urbano.	18
Figura 2: Variação de temperatura de acordo com o grau de urbanização e o fenômeno de ilhas de calor urbano.....	19
Figura 3: Principais diferenças entre telhados verdes intensivos e extensivos.	23
Figura 4: Paredes verdes ou jardins verticais.	24
Figura 5: Estrutura das plataformas.....	39
Figura 6: Camadas dos materiais componentes da plataforma com vegetação.....	40
Figura 7: Sensor de temperatura e umidade do ar e suas informações técnicas.....	41
Figura 8: Sensor termopar utilizados e suas informações técnicas.	41
Figura 9: Vista lateral da implantação dos sensores termopares.	41
Figura 10: Vista superior da disposição dos sensores termopares, nas camadas subsuperficial e de base.....	42
Figura 11: Sensores instalados nas plataformas dentro do campus UFSCar São Carlos. 1) Primeira coleta realizada em março de 2023. 2) Segunda coleta realizada em dezembro de 2023. 3) Sensor HOBO utilizado em ambas as coletas para registrar temperatura e umidade do ar.	44
Figura 12: Ponto A de coleta dos dados microclimáticos em São Carlos, SP.	45
Figura 13: Zoom do Ponto A de coleta dos dados microclimáticos em São Carlos, SP.	46
Figura 14: Recorte de área da cidade de São Carlos - SP para as simulações.....	48
Figura 15: Menu do software ENVI-met versão 5.	49
Figura 16: Adição dos atributos e modelagem da área de estudo.....	50
Figura 17: Dados de temperaturas das plataformas com e sem grama nas áreas subsuperficiais (Tss S/G e Tss G), e nas áreas de base (Tb S/G e Tb G), temperatura do ar e umidade relativa do mesmo. A - Grama Amendoim; B - Grama Esmeralda.....	53
Figura 18: Relação de temperaturas nas áreas subsuperficiais com e sem grama (Tss G e Tss S/G) e de base (Tb S/G e Tb G). A - Temperatura e umidade relativa nos dias 25/03 e 26/03, plataforma com grama amendoim. B - Temperatura e umidade relativa no dia 10/12 plataforma com grama esmeralda.....	54

Figura 19: Temperaturas das áreas subsuperficial, de base e do ar referentes à plataforma sem grama. A - Março; B - Dezembro.....	56
Figura 20: Temperaturas das áreas subsuperficial, de base e do ar, referentes à plataforma com grama. A - Grama Amendoim; B - Grama Esmeralda.	57
Figura 21: Relação de temperaturas das áreas subsuperficiais em ambas as plataformas. A - Grama Amendoim; B - Grama Esmeralda.....	59
Figura 22: Relação de temperaturas das áreas de base de ambas as plataformas. A - Grama Amendoim; B - Grama Esmeralda.	60
Figura 23: Relação de temperaturas do ar e umidades relativas, coletados em área HIS e pela estação INMET.	62
Figura 24: Relação de temperaturas do ar entre área HIS e INMET no dia 21/09/2023.	63
Figura 25: Variação de temperatura do ar na área HIS com telhados de cerâmica e com telhados verdes no dia 21/09 às 6h.	65
Figura 26: Variação de temperatura do ar na área HIS com telhados de cerâmica e com telhados verdes no dia 21/09 às 15h.	67
Figura 27: Variação de temperatura do ar na área HIS com telhados de cerâmica e com telhados verdes no dia 21/09 às 21h.	69
Figura 28: Diferenças de temperatura na área HIS com Telhados Verdes e Convencionais para o dia 21/09 nos horários de 6h, 15h e 21h.	71
Tabela 1: Características dos telhados verdes intensivos e extensivos.....	23
Tabela 2: Siglas e significados referentes às plataformas.....	40
Quadro 1: Revisão bibliográfica condensada com os pontos relevantes dos capítulos abordados.....	36

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AQUECIMENTO GLOBAL	13
2.2. CLIMA E ILHAS DE CALOR URBANOS	17
2.3. TELHADOS VERDES	21
2.3.1. Espécies Vegetais Adequadas	24
2.3.2. Serviços Ecossistêmicos	27
2.4. SIMULAÇÕES MICROCLIMÁTICAS EM AMBIENTES URBANOS	32
2.4.1. <i>ENVI-met</i>	32
2.4.2. Área de Estudo	33
3. OBJETIVOS	37
3.1. Geral	37
3.2. Específicos	37
4. METODOLOGIA	37
4.1. Montagem das Plataformas	38
4.2. Adição de Substrato e Vegetação	39
4.3. Coleta de Dados	40
4.4. Coleta de dados microclimáticos	45
4.5. Simulação em Larga Escala	46
4.5.1. Seleção da área para simulação	46
4.5.2. Simulações Microclimáticas - <i>ENVI-met</i>	49
5. ANÁLISE DE RESULTADOS	52
5.1. Dados coletados nas Plataformas	52
5.2. Dados microclimáticos coletados na Área HIS	62
5.4. Avaliação do potencial para mitigação de ICU	70
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
ANEXO I	80
ANEXO II	81
ANEXO III	82

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos é notável o aumento de temperatura do ar nas cidades, não só em dados científicos, mas percebidos ao longo do dia através da sensação térmica humana. Além deste fato, verifica-se também os casos de alagamento e inundações nas cidades ao longo do ano, causados por chuvas severas, juntamente com a urbanização inadequada próxima de corpos d'água. Ambos os acontecimentos estão relacionados ao aquecimento global, o qual interfere no microclima urbano, causado principalmente pela intensa urbanização e degradação ambiental, principalmente pela impermeabilização de superfícies.

Desta forma, o que se pode fazer para que a situação atual se torne mais segura e agradável tanto para os seres humanos, quanto para o meio ambiente, é tentar mitigar suas causas em microescala, através da diminuição da temperatura do ar nas cidades e edificações, sobretudo em regiões de clima tropical.

O uso dos telhados verdes pode contribuir, tanto para combater os efeitos da temperatura do ar no interior, quanto no entorno das edificações, possibilitando, inclusive a melhoria da drenagem superficial nas cidades. Assim, os telhados verdes podem afetar diretamente a ocorrência de casos de alagamento e inundação, o aumento da umidade do ar e, possivelmente, reduzir a intensidade das Ilhas de Calor Urbana, tornando as cidades mais seguras, confortáveis e sustentáveis. (Wahba et al., 2018), (Perussi, 2016), (Gnecco; Palla; Lanza; Barbera, 2013).

Os telhados verdes são estruturas aplicadas em construções existentes e novas, sendo compostas por um sistema de camadas de materiais, principalmente vegetação e substrato sobre uma superfície de suporte. O objetivo destas estruturas é reduzir a variação térmica entre o exterior e o interior de uma edificação, bem como melhorar as condições de drenagem. Tais características podem trazer benefícios ao ambiente construído e às pessoas viventes no mesmo. Desta forma, é válido ressaltar as diferentes formas de telhados verdes e suas funcionalidades, levando em consideração o contexto e as características do ambiente ao qual será aplicado, como inclinação, espaço disponível e clima predominante da região (Perussi, 2016).

A característica a ser considerada antes de se planejar a implementação de um telhado verde é se o mesmo será intensivo ou extensivo, e isto dependerá das necessidades para aplicação deste tipo de técnica. Estes tipos de coberturas verdes têm como principal

diferença a espessura de substrato utilizado, o que conseqüentemente influenciará na espécie vegetal a ser plantada sobre o telhado. Dependerá, sobretudo, do tamanho e estrutura da construção a qual será implementado, o que interferirá nos valores de aplicação e na manutenção da estrutura final. A vegetação a ser aplicada dependerá do clima predominante na região, da disponibilidade de nutrientes e da umidade do substrato e da frequência de sua manutenção (Cardoso; Vecchia, 2014).

No caso dos telhados verdes intensivos, de acordo com Hossain et. al. (2019), são caracterizados por possuírem plantas grandes, árvores e arbustos, são acessíveis e podem ser utilizados para visitação, têm alto custo e alta necessidade de irrigação, fertilização e manutenção. Já os telhados verdes extensivos podem ser caracterizados como não acessíveis para visitação, constituídos por plantas de baixo crescimento como gramas, suculentas e ervas, o que exige menor camada de substrato, implicando em menor custo de implantação; por isto, este tipo de telhado verde possui baixa diversidade de plantas, pouca necessidade de irrigação, nutrientes e manutenção no geral. Karachaliou, Santamouris e Pangalou (2015), ressaltam que ambos os tipos são utilizados para mitigar o aquecimento urbano, proteção dos raios solares, e resfriamento do ambiente construído através do processo de evapotranspiração realizado pelas plantas.

Desta forma, levando em consideração a melhoria da qualidade de vida dos cidadãos, os telhados verdes se mostraram ótimos aliados na diminuição de temperatura do ar para residências, segundo Perussi (2016). Há a possibilidade de se incorporar uma lâmina d'água em coberturas para provocar o esfriamento evaporativo indireto, conforme estudos desenvolvidos por Krüger, Lange, Fernandes e Rossi (2016). Embora este tipo de cobertura não utilize a vegetação, os fenômenos associados ao resfriamento das superfícies são semelhantes aos provocados por telhados verdes, ou seja, aumento da inércia térmica e resfriamento evaporativo. Walters e Midden (2018), afirmam que os telhados verdes podem contribuir no aumento de vegetação presente nas cidades, sendo um passo para a sustentabilidade, já que pode ser aplicada de diversas formas como através da agricultura no meio urbano.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Revisão Bibliográfica foi dividida em 4 partes, sendo elas: Mudanças Climáticas; Clima e Ilhas de Calor Urbanos; Telhados Verdes; e Simulações Microclimáticas em Ambientes Urbanos.

2.1. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AQUECIMENTO GLOBAL

De acordo com Nobre, Reid e Veiga (2012), em 400 mil anos ocorreram 4 ciclos climáticos diferentes, sendo eles glaciais e interglaciais. O pico interglacial descrito no período de 2012, mostrava um aumento de 5°C a 6°C em comparação com o pico glacial observado 20 mil anos antes, e há 120 mil anos houvera um pico interglacial que registrara uma temperatura maior em relação ao ano de 2012. Desta forma, os autores trazem a discussão de que as variações climáticas seriam naturais, porém, os mesmos ressaltam que em 100 a 150 anos, a elevação da temperatura tem ocorrido de uma forma mais intensa e rápida, tendo um ritmo de cerca de 50 vezes mais acelerado do que o observado no ciclo natural glacial-interglacial. Então, dadas estas observações, há o questionamento do que mudou em tão pouco tempo que poderia interferir e causar esse desbalanço nas variações naturais de temperatura.

Alguns defendem que o aumento das ondas de calor e da temperatura anual observada é natural e está ocorrendo de acordo com o ciclo do planeta, apesar desta diferença significativa. Outros acreditam que mesmo existindo os ciclos naturais de variações de temperatura, as ações antrópicas possuem sua parcela de contribuição e interferência, que geram impactos ambientais e conseqüentemente afetam todo o planeta (Nobre, Reid, e Veiga, 2012).

De acordo com Helbling e Meierrieks (2022), através da análise de 118 países no período de 1960 a 2016, temperaturas mais altas foram relacionadas com o aumento da urbanização, e afeta cada região dependendo de suas condições específicas como cultura e clima. Essa associação tem mais relevância em países mais pobres e pouco desenvolvidos, e nos que têm maior dependência da agricultura. Os autores ainda enfatizam que o aquecimento global intensifica as perdas na produtividade agrícola e nas mudanças no meio público urbano.

Battemarco *et.al.* (2017) traz à tona outro impacto relacionado à urbanização descontrolada e às mudanças climáticas, que é o fenômeno de cheias nas bacias hidrográficas urbanizadas. Este estudo mostra como o processo de urbanização impacta os ciclos naturais de cheias, devido à falta de planejamento urbano voltado para a área de macrodrenagem, além de considerar o cenário das mudanças climáticas.

O ano de 1988 iniciou o marco de reuniões entre líderes políticos e cientistas de diversos países com o intuito de discutir mundialmente as mudanças climáticas, o que deu início aos acordos internacionais. Foi criado, em 1990, o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Changes* – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas), que visa alertar sobre o aquecimento global e as mudanças do clima; além de trazer evidências sobre como as emissões de gases de efeito estufa (GEEs), devido ao uso de combustíveis fósseis, interferem nessas variações de temperatura (Senado, s.d.).

Em 2007, foi disponibilizado o 4º relatório do IPCC, na época o documento levantou diversas questões, sendo a mais relevante relacionada à contribuição antrópica no aumento da temperatura global (Ribeiro, 2008). Durante o século XX o nível do mar subiu aproximadamente 20 centímetros de forma global, e nos últimos 120 anos a média de temperatura global subiu quase 0,8°C, além de que a área de geleiras tem diminuído devido ao seu derretimento (Nobre; Reid; Veiga, 2012). Ainda de acordo com o IPCC, estava previsto um aumento na frequência e intensidade das ondas de calor em áreas urbanizadas, juntamente com a degradação da qualidade do ar e aumento das áreas de risco a desastres naturais (Ribeiro, 2008)

As negociações da ordem ambiental internacional sobre o clima, trazem à tona a necessidade de se criar políticas para mitigação da degradação ambiental, como o Protocolo de Kyoto em 1997 que levantou o objetivo de diminuição na emissão de gases de efeito estufa (MMA, s.d.). O Brasil ratificou o documento em 2002 através do Decreto Legislativo nº144 de 2002, tendo como meta diminuir média de 5% em relação aos níveis medidos em 1990 de 2008 a 2012, e de 18% entre 2013 e 2020.

O Protocolo trouxe 3 mecanismos de flexibilização para cumprimento das metas pelos países. Sendo estes o Comércio de Emissões que trata da permissão para países venderem seus créditos aos que tiverem ultrapassado o limite estipulado, estes ‘créditos de carbono’ são adquiridos quando o país tiver emitido menos gases do que o limitado pelas organizações (*United Nations*, s.d. e IPAM, s.d.); a Implementação Conjunta

permite que um país implemente projetos de redução de emissão de gases em outro país que possua custos mais baixos; e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que possibilita aos países contribuírem no desenvolvimento sustentável de outros em desenvolvimento, gerando créditos, podendo compensar no máximo 1% de suas emissões (IPAM, s.d.).

No ano de 2015, em Paris, ocorreu a 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), que estabeleceu o Acordo de Paris, que teve como principal objetivo firmar estratégias sobre as mudanças climáticas, enfatizando que os países envolvidos possuem capacidade para enfrentar os impactos decorrentes destas mudanças (Scovazzi, 2021). Este novo acordo foi aprovado pelos 195 países participantes, com o intuito de reduzir as emissões dos gases do efeito estufa (GEEs), visando estagnar o aumento da temperatura global em menos de 2°C acima dos dados observados no período pré-industrial; similar ao Protocolo de Kyoto, o qual substituiu. No âmbito financeiro, o Acordo de Paris determinou o investimento de US\$ 100 bilhões por ano em ações de adaptação e combate às mudanças climáticas em países em desenvolvimento. A cooperação Sul-Sul permitiu o apoio financeiro entre países em desenvolvimento, expandindo a rede de financiadores para os projetos (MMA, s.d. e Scovazzi, 2021).

A Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), foi estabelecida para que cada governo participante do novo acordo estabelecesse suas próprias metas de diminuição de GEEs, consideradas viáveis de acordo com a realidade econômica e social da nação. Em 2016, o Brasil ratificou o Acordo de Paris, o qual oficializou os compromissos, que antes eram apenas pretendidos. Conforme a NDC do país, almeja-se reduzir as emissões de GEEs em 37% em 2025 considerando os dados de 2005; visando 43% em 2030. Dentre as metas determinadas pelo governo, estão a de aumentar 18% de bioenergia e 45% de energias renováveis na matriz energética até 2030, e restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas. No geral, a NDC brasileira cobiça reduzir em 66% as emissões por unidade do PIB em 2025, e 75% em 2030; porém, não bastou apenas definir metas, após início da vigência do acordo, começaram os ciclos de revisão de progresso, que acontecem a cada cinco anos, exigindo dos países participantes atualização contínua de seus compromissos, evitando retrocessos (MMA, s.d.).

Sposito (1988) em seu livro “Capitalismo e Urbanização” levanta o histórico da civilização e da criação e evolução das cidades, que de acordo com a autora, é guiada pelos processos de industrialização. Antes das cidades, as aldeias eram o mais próximo de civilização, ou melhor, se tratava de um aglomerado humano, que tinha como atividades principais a agricultura e a criação de animais, atualmente consideradas como primárias, o que não a tornava uma cidade propriamente dita. Além disto, juntamente com as atividades de trabalho e construção distintas entre rural e urbano, a forma de organização social também difere.

A organização social baseada na divisão do trabalho se deu quando o agricultor passou a produzir mais do que o necessário para sua subsistência, o que o permitiu focar em outras atividades; dando início à diferenciação entre rural e urbano. De acordo com historiadores, a organização dominante e teocrática trazia a estrutura interna das primeiras cidades, onde a elite ficava ao centro para intercâmbio de ideias e domínio das outras classes sociais, além de controlar a fabricação e importação de utensílios de pedra ou metal. Havia então uma organização econômica, social e política. A partir disto, impérios surgiram, houve o longo período da Idade Média, marcado pela queda do Império Romano, que durou do século V ao XV com o modo de produção feudal (Sposito, 1988).

No século XVIII deu-se início ao período da Revolução Industrial na Inglaterra, que gerou mudanças econômicas, culturais, sociais e ambientais. Este modo de produção estabeleceu uma divisão social e de trabalho devido ao surgimento de novas necessidades e formas de consumo, guiadas pelo capitalismo, que intensificou a concentração de renda e ascensão social na classe burguesa, gerando dificuldades e pobreza na classe proletária. Desta forma, a industrialização exigiu e favoreceu a formação e expansão da urbanização em muitos países, incluindo o Brasil, ao promover força de trabalho, progresso técnico e infraestrutura, além do acúmulo de capital nos espaços urbanos. O crescimento do meio urbano e da indústria teve seu lado bom, facilitando a sobrevivência, porém, trouxe diversos problemas, como a violência, desemprego e segregação social (Galvan; Flávio, 2007).

No Brasil, a urbanização teve início na Bahia no século XIX, com o crescimento da agricultura, comércio, exploração de minérios, e assim como os outros, o país passou pelo período de industrialização, que a partir de 1930 trouxe um avanço no mercado interno, juntamente com a modernização e desenvolvimento da produtividade. Porém, os problemas relacionados à pobreza se intensificaram, trazendo insegurança nos setores da

saúde, educação e transporte, dentre outros que o país enfrenta até os dias atuais (Giacometti; Dominscheck, 2018).

Neste sentido, o clima urbano tem se tornado um problema a ser enfrentado por planejadores urbano nas últimas décadas, sendo que o excesso de degradação ambiental e as excessivas alterações climáticas em nível local tem sido pouco mitigadas. Portanto, se torna fundamental conhecer os principais estudos que consideram as interferências do ambiente construído nas condições micrometeorológicas. A forma urbana, a impermeabilização excessiva e a carência de vegetação nas cidades causam consequências diretas no conforto térmico, no consumo energético e na saúde das pessoas provocadas, sobretudo, pelas soluções construtivas adotadas pouco criteriosas ambientalmente.

O artigo de Jamei *et.al.* (2021) traz a revisão de 89 estudos, com 3 principais tipos de clima (quente e úmido, temperado e seco), para o período de 2000 a 2020. No clima seco, verificou-se a maior redução de temperatura, diminuindo 3°C aproximadamente; já para o clima quente úmido, esta diferença foi a menor verificada, diminuindo cerca de 1°C. Entretanto, em cidades de clima quente úmido, houve uma variação de até 30°C na superfície durante o dia, já no clima temperado, essa variação foi de 28°C; no caso do clima seco, os autores não obtiveram estudos realizados em larga escala para temperaturas superficiais.

2.2. CLIMA E ILHAS DE CALOR URBANOS

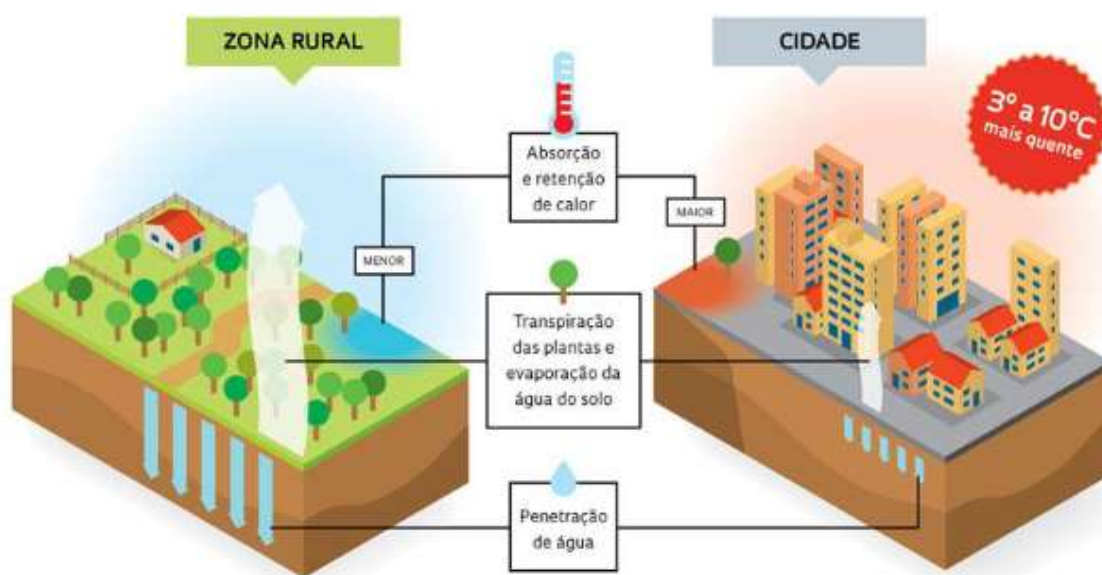
O subcapítulo anterior tratou da urbanização e como a industrialização guiou o seu crescimento, trazendo modernização, desenvolvimento, e problemas sociais, culturais e econômicos, além de impactos e degradação ambientais. A globalização é outro fator que contribui para estes impactos negativos, pois atuam diretamente nos sistemas produtivos e no consumo da sociedade.

Desta forma, é possível concluir que os seres humanos alteram e degradam o meio ambiente desde os tempos primitivos, e atualmente com muito mais intensidade, modificando a paisagem natural, transformando-a de acordo com suas necessidades. Estas modificações do meio natural desenvolveram anormalias climáticas, como o caso das ilhas de calor (Giacometti; Dominscheck, 2018).

De acordo com Oke e Maxwell (1975), as ilhas de calor são definidas como um fenômeno climático presente em cidades com alto grau de urbanização. As principais causas desta alteração no clima se dão pela alta impermeabilização do solo e elevada quantidade de construções, que em sua maior parte utilizam asfalto e concreto, respectivamente, e pela intensa poluição atmosférica gerada pela queima de combustíveis fósseis, liberando gases de efeito estufa.

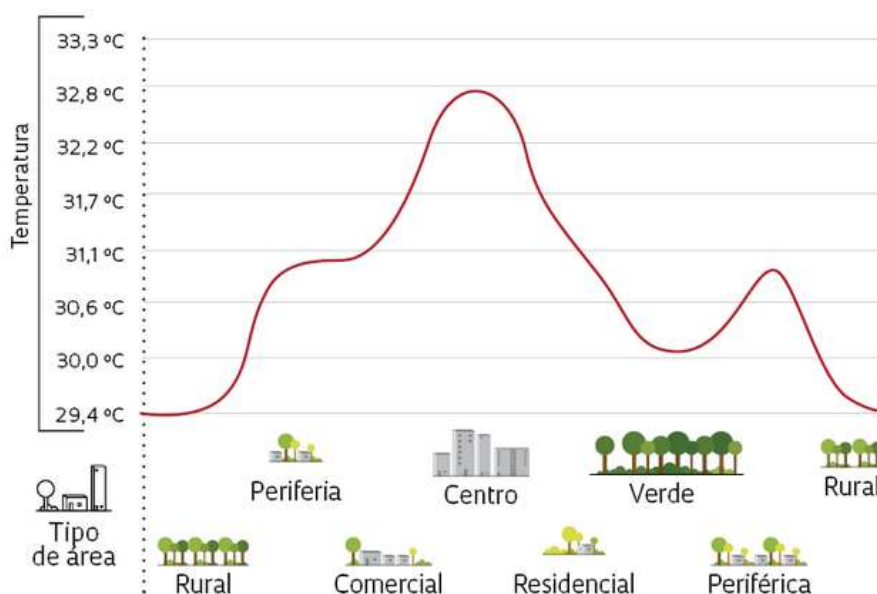
Assim, durante o dia, os raios solares são absorvidos por estes materiais, mesmo uma pequena porcentagem sendo irradiada para a atmosfera, o que aumenta sua temperatura; durante a noite, o calor acumulado no cimento e asfalto continua sendo irradiado para atmosfera, porém, a concentração de GEEs impedindo sua dissipação, aumentando a temperatura do ar. Desta forma, os centros das cidades tendem a ser mais quentes e com menor umidade relativa, podendo ter uma variação de até 10°C (Pivetta, 2023); diferente de áreas que possuem maior cobertura vegetal, a qual tem um papel importante da absorção dos raios solares e realizam a evapotranspiração, que auxiliam na diminuição da temperatura do ar. As Figura 1 e Figura 2 trazem um esquema visual de como as ilhas de calor atuam e a variação de temperatura de acordo com o grau de urbanização.

Figura 1: Como ocorre o fenômeno de ilhas de calor urbano.



Fonte: Pivetta, 2012.

Figura 2: Variação de temperatura de acordo com o grau de urbanização e o fenômeno de ilhas de calor urbano.



Fonte: Pivetta, 2023 (Adaptado de Royal Meteorological Society).

A alteração climática causada pelas ilhas de calor tem diversos impactos ambientais, econômicos e sociais. Como citado anteriormente, a urbanização junto com alta emissão de GEEs geram as ilhas de calor urbano, que por sua vez, contribuem para intensificação do aquecimento global e efeito estufa, aumentando a temperatura de habitats aquáticos, diminuindo a umidade relativa do ar, alterando o regime de chuvas, dentre outros.

Na área da saúde, estes impactos causam desconforto e estresse térmicos, além de aumentar o risco de hospitalizações por intensa exposição ao calor, causando insolação, desidratação, problemas respiratórios e cardiovasculares, e morte em casos extremos (Heaviside, 2020). Um estudo realizado por Nanayakkara *et.al.* (2023), o qual selecionou as cidades de Colombo e Shenzhen, localizadas em Sri Lanka e China, respectivamente; levantou sobre os efeitos das ilhas de calor nessas duas cidades que possuem condições climáticas distintas, mesmo ambas estando em áreas costeiras.

Os autores utilizaram o índice de Temperatura de Globo de Bulbo Úmido (*WBGT* - *Wet-Bulb Globe Temperature*) para calcular os efeitos das ondas de calor na saúde

pública, e analisaram as ilhas de calor urbano através de imagens dos anos de 1997, 2009 e 2019 da temperatura da superfície terrestre (*LST – Land Surface Temperature*). Os resultados obtidos mostraram que o rápido aumento da temperatura do ar e umidade, criam desconforto térmico em ambas as cidades, sendo que de junho a agosto, Shenzhen registrou estresse térmico severo e aumento de casos de ataques cardíacos; já de novembro a abril, a cidade pôde ser considerada mais confortável. Entretanto, Colombo não foi classificada como confortável em nenhuma época do ano, sendo de abril a agosto constatado estresse térmico severo com aumento nos casos de ataques cardíacos. Esta diferença pode ser explicada devido à maior expansão urbana e conseqüentemente às ilhas de calor, observadas primeiramente em Colombo e então em Shenzhen, tornando a cidade de Sri Lanka mais estressante do que a chinesa.

Assim, no setor da economia, há um aumento na utilização de ar-condicionado, ventiladores, e outros equipamentos para melhora do conforto e sensação térmicos, e há ainda os equipamentos de refrigeração, o que gera altos gastos de energia, além de contribuir para a emissão de GEEs.

O planejamento urbano é um passo importante para o desenvolvimento mais organizado e sustentável de uma cidade, nele deve-se levar em consideração os aspectos ambientais do espaço a ser urbanizado. Este processo busca trazer aos habitantes melhor qualidade de vida, através da produção, estruturação e apropriação do ambiente urbano, isto de acordo com o poder do órgão planejador (Filho, s.d.). É considerado como um mecanismo de gestão territorial e ambiental, e no âmbito municipal, gera um documento denominado Plano Diretor, que traz objetivos com diretrizes a serem seguidas ao longo do desenvolvimento do local (Henz; Oliveira; Bertollo, 2016).

Entretanto, nos casos de ilhas de calor urbano, nota-se uma expansão urbana desenfreada e muitas vezes pouco planejada; por isto, as soluções a serem implementadas são voltadas para a mitigação dos impactos deste fenômeno climático.

Entre as principais soluções para mitigar ICUs estão a aplicação e utilização de materiais que aumentem o albedo e o coeficiente de reflexão, para diminuir a absorção de calor. O aumento de áreas verdes e vegetação que absorvem os raios solares e realizam evapotranspiração que contribuem para a diminuição da temperatura do ar e aumento da umidade relativa. Esta última solução pode ser realizada através de arborização urbana com o plantio de árvores e construção de jardins ao longo da cidade, mas também pode

ser feita com a implementação de paredes e telhados verdes em edifícios e residências (Oliveira, 2002; Scroccaro; Lima; Tavares, 2018).

2.3. TELHADOS VERDES

As coberturas verdes ou comumente conhecidas como telhados verdes, são estruturas aplicadas em construções existentes e/ou novas, sendo compostas por um sistema de camadas de materiais, principalmente vegetação, que têm como objetivo trazer benefícios ao ambiente construído e às pessoas viventes no mesmo. Desta forma, é válido ressaltar as diferentes formas de telhados verdes e como os mesmos funcionam, levando em consideração o contexto e as características do ambiente ao qual será aplicado, como inclinação, espaço e clima (Cardoso e Vechia, 2014).

A característica a ser considerada antes de se planejar a implementação de um telhado verde é se o mesmo será intensivo ou extensivo, e isto dependerá das necessidades para aplicação deste tipo de sistema. Estes tipos de telhados verdes têm como principal diferença a espessura de substrato utilizado, o que conseqüentemente influenciará na espécie vegetal a ser plantada; e dependerá do tamanho e estrutura da construção a qual será implementado, o que interfere nos valores de aplicação e manutenção da estrutura final. A vegetação a ser aplicada dependerá do clima predominante na região, da disponibilidade de nutrientes, umidade e frequência de sua manutenção (Hossain *et. al.*, 2019).

De acordo com Karachaliou; Santamouris e Pangalou (2015), o sistema extensivo é coberto por vegetações pequenas, e se diferencia das coberturas verdes intensivas de acordo com o tipo de plantas suportadas; ainda é ressaltado que ambos os tipos são utilizados para mitigar o aquecimento urbano, proteção dos raios solares, e resfriamento do ambiente construído através do processo de evapotranspiração realizado pelas plantas.

No caso dos telhados verdes intensivos, de acordo com Hossain *et. al.* (2019), são caracterizados por possuírem plantas grandes, árvores e arbustos, são acessíveis e podem ser utilizados para visitação; possuem peso entre 200 a 500 kg/m², este sistema tem alta necessidade de irrigação, fertilização e manutenção. Karachaliou, Santamouris e Pangalou (2015), descrevem um telhado verde intensivo como sendo um sistema que

suporte o crescimento de arbustos e pequenas árvores, o que requer maior manutenção e custo.

Segundo Tam *et. al.* (2011), os telhados verdes intensivos podem ser descritos como um estilo de jardinagem em coberturas, consistindo majoritariamente em árvores e arbustos, este tipo de jardim é de fácil acesso para o público; além disso devido às vegetações utilizadas, o sistema deve possuir uma camada mais grossa de substrato e impermeabilização anti-raíz; a manutenção deste tipo de jardim/cobertura verde é mais intensa, requer irrigação regular e mais cuidados; devido a todas estas características, este tipo de cobertura verde adiciona grande carga à estrutura ao qual será implementado.

Já os telhados verdes extensivos podem ser caracterizados como não acessíveis para visitação, sendo constituído como plantas de baixo crescimento como gramas, suculentas e ervas, o que exige menor camada de substrato, com peso em torno de 60-150 kg/m², implicando em menor custo de implantação; por isto, este tipo de telhado verde possui baixa diversidade de plantas, pouca necessidade de irrigação, nutrientes e manutenção no geral (Hossain *et. al.*; 2019).

Zhang *et. al.* 2011, descreve que o sistema de cobertura verde extensivo tem substituído o intensivo, devido às suas características, sendo estas a necessidade de menor espessura de substrato, o que permite que o projeto e estrutura sejam menores; além de possuir mais diversidade de espécies vegetais. Este tipo de telhado verde exige menor manutenção e as plantas adotadas geralmente se autorregeneram como gramíneas, arbustos e gramas.

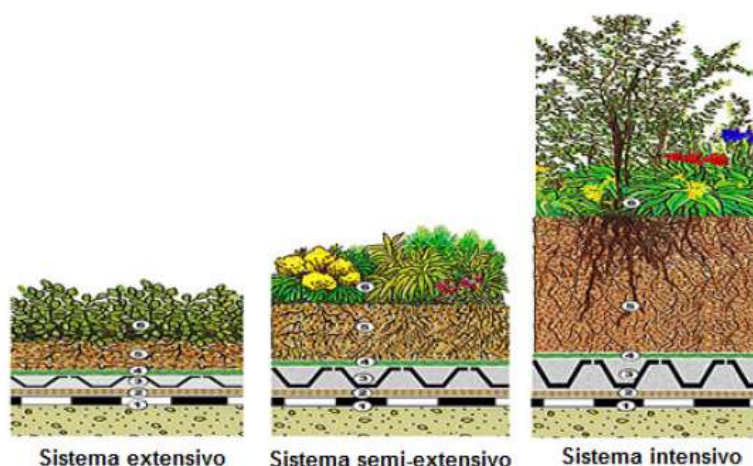
Tam *et. al.* (2011), argumenta que os telhados verdes extensivos são inacessíveis para o público, e que envolvem diversos benefícios ambientais, como a mitigação de danos causados por águas pluviais e proteção de estruturas construídas. Entretanto, este sistema exige uma inspeção severa da estrutura a qual será aplicado, e as plantas geralmente utilizadas são suculentas e musgos. A Tabela 1 e a Figura 3 mostram as principais diferenças entre os dois tipos de sistemas de telhados verdes.

Tabela 1: Características dos telhados verdes intensivos e extensivos.

Características	Telhado Verde Intensivo	Telhado Verde Extensivo
Espessura do Substrato	<15cm	>15cm
Acessibilidade/Vegetação	Acessível/Árvores, Arbustos e Plantas grandes	Não acessível/ Suculentas, Ervas, Gramas e plantas com baixo crescimento
Peso	Alto (200-500kg/m ²)	Baixo (60-150kg/m ²)
Manutenção	Maior irrigação. Fertilização	Irrigação e nutrientes mínimos
Retenção estimada de águas pluviais	70-130 L/m ²	27-45 L/m ²

Fonte: Adaptado em 2023 de Hossain *et.al.* 2019.

Figura 3: Principais diferenças entre telhados verdes intensivos e extensivos.



Fonte: Jobim, 2013 (Adaptado de *Green Roof Service LLC*, 2010).

De acordo com Xing *et. al.* (2018); e Rajak, Ravish e Biswas (2022), os sistemas de coberturas podem se adaptar tanto nos telhados verdes, quanto nas superfícies horizontais, a depender das espécies vegetais. Segundo os autores, as paredes verdes ou jardins verticais, têm sido utilizadas com mais intensidade desde a década de oitenta. A Figura 4 exemplifica as paredes verdes e jardins verticais.

Figura 4: Paredes verdes ou jardins verticais.



Fonte: Cunha, 2017.

2.3.1. Espécies Vegetais Adequadas

Dentre as camadas presentes em um sistema de telhado verde, a vegetação é a mais importante para garantir os benefícios ao ambiente. É a espécie vegetal responsável por absorver os raios solares, sombrear superfícies, absorver água, evapotranspirar e, conseqüentemente reduzir o calor. Além disto, o processo de evapotranspiração contribui para o aumento da umidade do ar. Levando isto em consideração, é válido ressaltar que a espécie a ser utilizada em um telhado verde deve ser escolhida de acordo com as necessidades e objetivos do sistema, o clima do local em que será cultivada, a espessura do substrato, o tamanho da cobertura, a frequência da manutenção e o peso máximo suportado pela sua estrutura.

É importante ressaltar que, ao ser irrigado, seja por manutenção, ou pelas águas pluviais, o telhado verde tem seu peso aumentado e a temperatura de seu substrato reduzida, fato que deve ser levado em consideração ao realizar o projeto estrutural. As dilatações provocadas pelo ganho de água através de chuvas e irrigação; seguida pelo processo de evapotranspiração, provocam movimentos que podem comprometer a estabilidade da estrutura. (Santos *et. al.*, 2017)

Um estudo realizado por Eksi *et. al.* (2017) analisou os efeitos da espessura do substrato, o tipo de vegetação e a estação do clima, nas propriedades térmicas em telhados

verdes. O estudo comparou o desempenho de uma mistura de musgos com um substrato de 5cm de altura, com uma mistura de 17 ervas e gramas perenes plantadas em um substrato com 20cm de espessura. Ambos os sistemas foram monitorados através de sensores de fluxo de calor, termopares, sensores de umidade, sensores de infravermelho, e também foram coletados dados de uma estação meteorológica localizada no telhado, a fim de se coletar os dados referentes ao ambiente, como temperatura, vento umidade, chuvas e incidência de radiação solar.

O experimento foi realizado ao longo de 1 ano para se obter dados de todas as estações climáticas; e desta forma, puderam concluir que as maiores diferenças de fluxo de calor e temperatura foram registradas no verão e inverno. Durante o verão, a cobertura com musgos mostrou mais flutuações de temperatura ao longo do dia, que tendia a ser mais quente, e durante a noite mais frio. Já a cobertura composta pelas ervas e gramas teve melhores resultados de absorção de calor ao longo da noite e pela manhã (Eksi, *et al.*, 2017).

Ao longo do inverno, a camada de musgos foi mais afetada pelo clima, enquanto que as ervas e gramas permaneceram mais estáveis. Ao comparar todos os resultados, eles puderam concluir que os musgos tiveram melhor performance no verão ao absorver melhor o calor, enquanto que as ervas e gramas tiveram melhores resultados ao manter o calor do ambiente no inverno. De modo geral, ambas as vegetações desempenharam papéis diferentes, trazendo benefícios nas estações climáticas extremas, e por isto, a escolha de qual utilizar dependerá do clima do local e do objetivo ao qual se deseja alcançar com a cobertura verde.

De acordo com o 9º Capítulo de “Effects of vegetation on green roof ecosystem services” do livro *Green Roof Ecosystems*, Ecological Studies 223 (Lundholm; Williams, 2015); os telhados verdes oferecem diversos serviços ecossistêmicos, e são influenciados tanto pelas camadas bióticas, quanto abióticas as quais compõem o sistema. É evidenciada a questão sobre como as espécies vegetais podem ter habilidades diferentes entre si, como em casos de resfriamento de ambiente e retenção de águas pluviais; outros benefícios que são menos abordados são a redução na perda de calor do ambiente interno no inverno, mitigação da poluição do ar e capacidade de sequestro de carbono.

Neste capítulo são discutidas as vantagens trazidas pela combinação de espécies ou utilizando grupos de plantas funcionais entre si, o que poderia trazer aperfeiçoamentos

para o telhado verde, o que ressalta a importância de se conhecer as propriedades de cada espécie a ser aplicada, pois mesmo que estas possuam características similares, podem apresentar desempenhos diferentes, como é o caso das suculentas. Assim, categorizar a vegetação dos telhados verdes de acordo com área foliar, espessura das folhas e caminho de fotossíntese, pode ser útil para a escolha de qual espécie se utilizar e para se atingir melhores resultados de serviços ecossistêmicos em coberturas verdes.

O tipo de sistema escolhido para ser analisado nesta dissertação, foi o de telhado verde extensivo, as espécies vegetais indicadas são de pequeno porte, resistentes a excesso e baixa disponibilidade de água e que suportem variação de temperatura. Dentre as espécies procuradas, estavam suculentas como a planta de gelo (*Delosperma spp.*), gramíneas como capim negro (*Carex nigra*) e estancadeira (*Armeria marítimo*), flores selvagens como a erva-carpinteira (*Achillea millefolium*), gramas como a esmeralda (*Zoysia japônica*), batatais (*Paspalum notatum*) e ervas aromáticas. Entretanto, de acordo com o trabalho realizado por Perussi (2016) e de Fernandes (2019), a grama-amendoim (*Arachis repens*) atende as características necessárias para ser implementada em um sistema extensivo na região do estudo.

A grama-amendoim, amendoim-rasteiro ou popularmente conhecido como amendoinzinho, pertence à família Fabaceae, que envolve características como a presença de frutos em forma de vagem, englobando desde espécies herbáceas anuais até arbóreas. Além disto, algumas delas possuem grande valor econômico e alimentar pelo seu alto valor proteico, como o caso da soja e do feijão, considerados popularmente como leguminosas (Carvalho; Gaiad, 2021).

De acordo com Fávero e Valls (2018), a grama-amendoim é uma planta nativa, classificada como rasteira e perene, atinge altura de 0,1 e 0,2m com raízes de até 30cm, muito conhecida por ter flores pequenas e amarelas; e de acordo com Carvalho e Gaiad (2021) citados pela Embrapa, possui distribuição cosmopolita, sendo encontrada em até 2/3 da superfície terrestre. Unindo-se à estas características biológicas, esta espécie de leguminosa possui rápido rebrote, reconhecida pelo seu potencial de formar gramados e alta capacidade de controle de ervas daninhas. Entretanto, não suporta pisoteio constante excessivo e geadas; os autores reforçam que a espécie tolera acidez do solo e alta saturação de alumínio (Fávero; Valls, 2018).

Já a grama esmeralda (*Zoysia japônica*), originária do Japão, é caracterizada por folhas estreitas e pontiagudas com coloração verde intenso, chegando entre 10 a 15 centímetros de altura, é adequada para climas equatorial, mediterrâneo, subtropical, temperado e tropical; necessita de adubações semestrais e sol pleno, com ciclo de vida perene, além de suportar pisoteio e chuvas intensas (Gurgel, 2003; Unifap, 2020).

A decisão da vegetação a ser utilizada no projeto foi criteriosa, levando em consideração as características físicas da pesquisadora, e a fim de facilitar a fase experimental deste projeto, na primeira coleta de dados optou-se por utilizar a grama-amendoim, devido ao fácil plantio, capacidade de suportar o peso de águas pluviais, além de suas características visuais que contribuem na parte de paisagismo. Entretanto, devido às ondas de calor que ocorreram no segundo semestre de 2023 o cultivo da grama-amendoim foi prejudicado, por isto, optou-se pela grama esmeralda, que possui baixa manutenção e suporta sol pleno.

2.3.2. Serviços Ecossistêmicos

De acordo com Zuo et. al. (2022), o fenômeno das ilhas de calor urbano (ICU) têm se tornado um desafio para quem vive nestes locais, pois afeta diretamente no ambiente de vivência humana, sendo mais significativo nas áreas centrais nos lugares com alta densidade e construção urbanas. Nestes centros, consideram-se coberturas verdes, qualquer tipo de vegetação, desde gramas até árvores plantadas em calçadas; desta forma, os telhados verdes acabam por utilizar um espaço incomum para se adicionar vegetação, o que acaba por contribuir no montante de áreas verdes e vegetadas, aumentando a absorção de radiação solar e fluxo de temperatura e diminuindo a sensação térmica, sem adicionar novas construções.

Dentre as referências citadas pelos autores, é descrito que os telhados verdes têm a capacidade de reduzir a temperatura a nível urbano entre 0.3 a 3°C. Porém, os projetos de telhados verdes na prática são raros, e por isto, para se comparar as microescalas dos projetos de pesquisa com a urbana, são realizadas simulações computacionais, que podem diferir da situação real. Em outras pesquisas, foram estudados os fatores que poderiam influenciar na capacidade de resfriamento dos telhados verdes, dentre estes estão o clima da região de estudo e suas condições geográficas. Sendo que em locais quentes e úmidos,

este tipo de sistema tem maior capacidade de resfriamento, em comparação com áreas quentes e secas.

Além disto, foi verificado por Jin et. al. (2018) que as alturas dos edifícios influenciam na capacidade de resfriamento dos telhados verdes, sendo inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a altura dos edifícios, menor o efeito de resfriamento dos telhados verdes. O trabalho de Zuo, et. al (2022), avaliou as diferenças de temperatura superficial antes (2014) e depois (2018) da implementação de telhados verdes no centro da cidade de Chengdu, na China, feitos baseadas em imagens de sensoriamento remoto Landsat 8. Além disto, foram realizadas análises estatísticas através do SIG, determinando sistemas de telhados verdes para cada tipo de característica espacial, focando nos centros urbanos.

De acordo com Arabi *et al.* (2015), estudo realizado através de levantamento bibliográfico sobre telhados verdes e sua contribuição para a mitigação de ilhas de calor urbanas, as coberturas verdes tem a habilidade de mitigar este fenômeno e, conseqüentemente, diminuir a temperatura do ar e dos lugares mais quentes da cidade. Além disto, estes sistemas contribuem para a mitigação da poluição do ar, melhora a gestão de águas pluviais e escoamento superficial, contribuindo para a saúde pública, e aumentando valor estético agregado à técnica de telhados verdes no meio urbano.

Segundo Alexandri e Jones (2006), os telhados e paredes verdes conseguem diminuir a temperatura em cânions urbanos, e neste estudo os autores fizeram um protótipo em duas dimensões, utilizando-se de características de 9 cidades, 3 geometrias de cânions urbanos, 2 orientações de cânions e 2 direções de ventos. Além disto, foram analisados os efeitos de telhados e paredes verdes para as temperaturas de dentro e fora dos cânions urbanos, e foram verificados os benefícios para o conforto térmico e redução no consumo de energia. Desta forma, foi concluído que os envelopes de edificações que forem vegetados têm um grande potencial de mitigação de ilhas de calor, sendo que quanto mais quente e mais seco o clima for, melhor será o efeito das vegetações nas temperaturas urbanas.

Bass e Koukidis (2016) realizaram uma pesquisa utilizando-se de simulação de cenários no *software Envi-Met* para comparar o quanto a aplicação de telhados verdes agregaria em termos de performance frente às ilhas de calor urbano. Os autores neste experimento compararam o impacto dos telhados verdes com outras estratégias utilizando

vegetação em duas áreas suburbanas, uma residencial, uma industrial e uma no centro da cidade, sendo esta Toronto. Os resultados obtidos mostraram que nas três áreas distintas (suburbanas, industrial e urbana central) houve diminuição das ilhas de calor urbano.

Outro estudo realizado utilizando-se de simulações com o *software Envi-Met*, é o de Dwivedi e Mohan (2018), no qual analisaram as ilhas de calor urbano e a temperatura do ambiente ao ar livre em uma microescala, envolvendo uma área metropolitana em Mumbai, Índia. Os autores buscaram mensurar o quanto as técnicas de telhados e paredes verdes, e áreas vegetadas conseguem mitigar os efeitos das ilhas de calor, de acordo com porcentagens de aplicação destas técnicas.

Razzaghmanesh, Beecham e Salemi (2016), a substituição de áreas ocupadas por vegetação pelos materiais componentes de áreas urbanas e que possuem baixa reflexibilidade, é uma das razões no aumento da temperatura no ambiente urbano, gerando ilhas de calor. Neste estudo, é realizada uma análise em microescala juntamente com simulação numérica de macroescala levando em consideração o ambiente urbano de Adelaide, Austrália. Os resultados obtidos comprovaram que a utilização de telhados verdes extensivos e intensivos têm uma capacidade significativa de resfriamento no verão, e que podem agir como isolamento térmico no inverno. Desta forma, aplicando-se a técnica de telhados verdes para a cidade de Adelaide através de cenários no *Envi-Met*, mostrou que o aumento de áreas verdes contribui para a diminuição no consumo de energia; e que a aplicação de paredes verdes, arborização urbana e uso de materiais com alta reflexibilidade é recomendável para se atingir a eficiência ótima em termos de redução da temperatura do ar e de mitigação das ilhas de calor urbano.

Segundo Mutani e Todeschi (2020), que realizaram estudo levando em consideração a cidade de Turin, Itália; conforme há aumento de áreas verdes, as temperaturas da superfície terrestre e do ar diminuem. Assim, é considerável a adoção deste tipo de cobertura, a fim de mitigação dos efeitos das ilhas de calor, melhora no conforto térmico interno e externo, e diminuição de consumo de energia elétrica.

Na dissertação de Perussi (2016), onde realizou-se o estudo do comportamento térmico de um sistema de cobertura verde, levando em consideração um clima tropical de altitude; foi verificada a diminuição de temperatura do ar em até 4,1°C quando há vegetação em comparação com a temperatura registrada pela estação meteorológica. Desta forma, o autor concluiu que isto ocorre devido à evapotranspiração e absorção de

radiação e água que ocorreram na plataforma com cobertura verde, o que a torna uma técnica favorável para a melhora do conforto térmico residencial e urbano.

Benvenuti (2014) analisou como flores selvagens utilizadas em telhados verdes para paisagismo, podem trazer sustentabilidade e biodiversidade ecológicas. O principal objetivo do estudo era demonstrar como estas espécies de flores se encaixam em um cenário urbano, sua performance, a dinâmica da biodiversidade e a fauna polinizadora ao longo de 2 anos de experimento. Ao final do trabalho, o autor observou que mesmo que as flores selvagens tenham aspectos críticos em termos de dinâmica de cobertura, principalmente pelos períodos de “envelhecimento” da vegetação, elas ainda representam um instrumento válido para aumentar a biodiversidade através do paisagismo em ecossistemas urbanos do Mediterrâneo.

Já Madre *et. al.* (2014), analisaram os telhados verdes como *habitat* para espécies de plantas selvagens na paisagem urbana, sendo um trabalho sobre as primeiras percepções sobre uma amostragem em larga escala. Este estudo analisou 115 telhados verdes no norte da França, focando em comunidades de plantas selvagens e suas variáveis que dão forma a sua diversidade e composição funcional. Dentro destas amostras analisadas, foram encontradas 176 plantas colonizadoras, 86% de espécies nativas, o que mostrou que as coberturas verdes podem ser consideradas como *habitats* para biodiversidade selvagem, mesmo com a isolamento urbana. É válido ressaltar que nenhum dos telhados verdes selecionados possuíam espessura de substrato igual, sendo este um parâmetro que desempenhou maior papel sobre a diversidade das espécies vegetais, que foram afetadas em sua taxonomia e composição funcional, outras características que influenciaram para a sobrevivência das espécies foram a idade do telhado verde, área superficial, peso e a intensidade da manutenção realizada.

Desta forma, levando em consideração os dois trabalhos analisados, pode-se considerar os telhados verdes importantes áreas que contribuem na biodiversidade de espécies vegetais e de fauna, dentro do meio urbano. Lembrando que com o aumento da urbanização, há conseqüentemente a diminuição de áreas vegetadas, o que afeta diretamente na biodiversidade de espécies no geral; desta forma, os telhados verdes têm um papel importante no contexto atual para se alcançar certo nível de sustentabilidade.

Segundo Saadatian *et. al.* (2013), os telhados verdes além de ser considerado uma prática de sustentabilidade, que além de diminuir os efeitos de ilhas de calor e melhorar

o conforto térmico em edificações, também reduz o consumo de energia nestas estruturas, e traz valores paisagísticos e estéticos para o ambiente. O estudo traz uma revisão sobre a aplicação de telhados verdes ao longo do período de 2002-2012, focando na categoria de energia, trazendo uma discussão sobre tipos de telhados verdes e seus componentes, valores econômicos e atributos técnicos.

De acordo com o estudo realizado utilizando-se como base a cidade do Cairo no Egito (Wahba *et. al.*, 2018), a aplicação de coberturas e paredes verdes em edificações contribuiu na diminuição em 25% no consumo de energia elétrica anual, e conseqüentemente, a sensação térmica interna teve redução de 5°C.

Fioretti *et. al.* (2010) realizaram um estudo sobre a performance de telhados verdes sobre o ponto e vista energético e hidrológico em um clima da região do mediterrâneo. Os autores fizeram dois estudos de caso de experimentos com telhados verdes realizados em escala real no topo de prédios nas áreas noroeste e central da Itália. Foram comparados os resultados entre os prédios com a técnica aplicada e edifícios sem a mesma, e chegaram à conclusão de que os telhados verdes tiveram melhores resultados de redução de consumo de energia diária e contribuição para a gestão de águas pluviais (diminuição do escoamento superficial, aumento no tempo de concentração, diminuição de picos) em comparação com os telhados comuns.

O estudo realizado por Niachou *et. al.* (2001) levantou as propriedades térmicas dos telhados verdes, bem como sua performance energética. Os autores realizaram medições de temperatura na superfície do telhado verde e a temperatura do ar, e também no interior e exterior das construções em que foram instalados; posteriormente, foram analisadas através de abordagens matemáticas, as propriedades térmicas dos telhados verdes e sua contribuição no setor energético.

Os resultados obtidos mostraram que a temperatura na superfície do telhado verde varia de acordo com o tipo de vegetação utilizada, sendo que os locais com gramas mais densas e cor verde escuro foram registradas temperaturas menores em comparação com apenas solo e gramas ralas; a diferença de temperatura externa das edificações depende da forma da construção; os telhados verdes contribuem na modulação da temperatura no interior das construções onde foram instalados, sendo que no verão há a redução de temperatura, e no inverno atuando como isolante térmico; a transferência de calor entre as superfícies que não estão cobertas com a vegetação é maior; as edificações com telhado

verde que não possuíam insolação tiveram uma redução anual de consumo de energia em 37%, aumentando para 48% no período da noite com ventilação, e redução em menos de 2% no cenário com alta insolação.

2.4. SIMULAÇÕES MICROCLIMÁTICAS EM AMBIENTES URBANOS

2.4.1. ENVI-met

Os estudos sobre o clima urbano avançaram bastante nos últimos anos devido ao desenvolvimento de técnicas, procedimentos e softwares de simulações térmicas de ambiente urbano. Há diversos softwares amplamente aplicados para estimar as variações de temperatura do ar, das superfícies e das condições de conforto ambiental humano.

O *ENVI-met* é uma ferramenta de simulação computacional de microclima, que permite ao pesquisador (a) entender e analisar as características e dinâmicas do clima urbano e seus impactos ambientais, sociais e econômicos de acordo com o uso e ocupação do solo e da vegetação. A intensa urbanização é uma das principais causadoras das mudanças climáticas e problemas ambientais, por isto, a discussão sobre este assunto é importante, a fim de desenvolver técnicas de recuperação e mitigação destes impactos. Uma das primeiras etapas a se seguir é caracterizar o ambiente e a paisagem a serem analisados, o que permite compreender os efeitos microclimáticos (Silva *et. al.*, 2022).

A aplicação do *software* é extensa, com diversos trabalhos envolvendo áreas como a drenagem urbana, variações de temperatura, influência dos materiais da cidade e da vegetação no clima urbano. Costa (2020), realizou um trabalho correlacionando uma simulação de cenário alternativo da região microclimática do bairro Rainha Santa Isabel em Bragança, o qual além da simulação, houve a monitoramento do conforto térmico local em quatro pontos. Os resultados mostraram correlação entre os dados simulados e monitorados, sendo que, um dos cenários alternativos houve acréscimo de vegetação o que mostrou diminuição de até 2°C em alguns pontos.

Um outro trabalho envolvendo *softwares* foi o de Arruda e Masiero (2021), o qual analisou os índices de conforto térmico através do *Rayman* e *ENVI-met* em áreas industriais. O objetivo deste trabalho foi estimar o índice de temperatura equivalente fisiológica (PET) e o índice climático térmico universal (UTCI), ambos utilizados para ambientes abertos e para casos de conforto térmico, neste caso para áreas industriais. Os

resultados mostraram diferença entre os *softwares* de acordo com a literatura, sendo que os obtidos pelo *Rayman* foram menores que os do *ENVI-met*.

Silva (2021) realizou um trabalho sobre a influência microclimática que vegetações arbóreas têm em áreas com ocupação consolidadas, mais especificamente a área do Conjunto Confisco em Belo Horizonte. Foi realizada elaboração de modelos a partir do método intuitivo com o *ENVI-met* a partir de dados de um estudo de caso e casos similares; já a etapa de observação extensiva direta foi composta pela coleta de dados, modelagem numérica e simulação. Os resultados mostraram que há relação entre vegetação presente e seu arranjo com as alterações microclimáticas como temperatura do ar e umidade relativa, além de provocarem maior estabilidade do microclima local.

A partir da análise destes trabalhos citados, é possível verificar as vantagens de se aplicar a ferramenta *ENVI-met*, e como ela contribui para o acompanhamento de alterações microclimáticas, e como as técnicas de mitigação de impactos podem contribuir. Além disto, permite compreender a dinâmica ecossistêmica que constituem um clima urbano com melhor conforto ambiental, ilhas de calor reduzidas, podendo ser considerado próximo do ideal e sustentável.

2.4.2. Área de Estudo

A história de São Carlos, localizada no estado de São Paulo, é marcada por uma trajetória de desenvolvimento econômico e cultural. Fundada em 1857, a cidade teve origem em um projeto de colonização e expansão territorial (USP, s.d.).

No século XIX, a região onde hoje está São Carlos era conhecida como Fazenda Pinhal. A área era utilizada principalmente para a produção de café, uma das principais culturas agrícolas da época. Com o declínio da produção cafeeira na segunda metade do século XIX, devido a fatores como a crise econômica e a abolição da escravatura, a região começou a buscar alternativas econômicas (São Carlos, 2014).

Em 1857, o governo provincial de São Paulo autorizou a fundação do Patrimônio de São Carlos, uma área destinada à formação de um núcleo urbano. A ideia era criar um novo centro urbano que pudesse impulsionar o desenvolvimento da região. O nome do município foi escolhido em homenagem ao imperador Dom Pedro II, e o município foi oficialmente criado em 1880, desmembrando-se de Araraquara (São Carlos, 2014).

Um marco importante na história de São Carlos foi a chegada da Estrada de Ferro Araraquara, em 1884. A ferrovia impulsionou o desenvolvimento econômico da cidade, facilitando o escoamento de produtos agrícolas e incentivando a instalação de novas indústrias. No final do século XIX e início do século XX, São Carlos se destacou como um importante polo industrial e educacional. A presença de imigrantes europeus, principalmente italianos, contribuiu para o desenvolvimento cultural da cidade.

A partir da década de 1950, São Carlos passou por um novo ciclo de crescimento, impulsionado pela instalação de indústrias de base tecnológica e pela expansão do setor de serviços. A cidade também se consolidou como um importante centro universitário, com a criação da Universidade de São Paulo (USP) em 1953 e da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) em 1968 (USP, s.d.).

Atualmente, o município possui uma população de 254.857 habitantes em um território com uma área de 1.136,907 km² (IBGE, 2022), possui um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,805 (IBGE, 2010). Desta forma, São Carlos é reconhecida como uma cidade com alto índice de desenvolvimento humano e qualidade de vida. Além das universidades, o município abriga centros de pesquisa, empresas de tecnologia e uma diversificada cena cultural. Sua história demonstra sua capacidade de adaptação às mudanças econômicas e sociais ao longo dos anos, mantendo-se como um importante centro urbano e cultural na região central do estado de São Paulo.

O município tem um clima subtropical úmido, caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos amenos e relativamente secos (Embrapa, 2024); de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, ou seja, subtropical úmido com verões quentes. Onde (Embrapa, s.d.):

- Subtropical (C): Indica que a região experimenta quatro estações distintas, com verões quentes e invernos relativamente amenos. No caso de São Carlos, os verões são de fato quentes, com temperaturas frequentemente superiores a 22°C, enquanto os invernos são mais amenos, com temperaturas raramente abaixo de 18°C.
- Úmido (w): Refere-se à distribuição de chuvas ao longo do ano. Neste caso, a letra "w" indica que São Carlos tem chuvas regulares durante todo o ano, com uma estação seca relativamente curta.

- Verões Quentes (a): A letra "a" denota verões quentes. Em São Carlos, os verões são caracterizados por temperaturas elevadas e umidade relativamente alta.

Durante o verão, que vai de dezembro a março, as temperaturas podem atingir níveis elevados, muitas vezes ultrapassando os 30°C, como observado em 2023, batendo recordes de temperatura. As chuvas são frequentes nessa época do ano, com ocorrência de tempestades e chuvas fortes, especialmente entre dezembro e fevereiro. Já no inverno, que ocorre de junho a agosto, as temperaturas tendem a ser mais amenas, com mínimas que podem chegar a cerca de 10°C. Os dias costumam ser ensolarados e secos, com pouca ocorrência de chuvas (USP, s.d.).

Vale ressaltar que as características climáticas podem variar de ano para ano, e a cidade pode experimentar variações significativas de temperatura e padrões de precipitação devido a influências climáticas regionais e globais. No geral, o clima de São Carlos proporciona um ambiente agradável ao longo do ano, com variações sazonais que refletem as mudanças nas estações.

São Carlos, embora seja considerada uma cidade de porte médio, enfrenta o fenômeno das ilhas de calor urbano, pois o processo de urbanização resultou na formação de áreas densamente construídas e carentes de vegetação, o que contribui no aumento da temperatura do ar e superficial. Esse fenômeno climático, ocorre devido à substituição de áreas naturais por estruturas urbanas, como edifícios, estradas e concreto, que absorvem e retêm calor mais do que as áreas naturais (Galusic, 2019).

Em suma, a compreensão das ilhas de calor urbanas é essencial para o planejamento e desenvolvimento sustentável das cidades, visando criar ambientes urbanos mais saudáveis, sustentáveis e resilientes às mudanças climáticas.

O Quadro 1 a seguir traz de forma condensada os capítulos desta revisão bibliográfica, trazendo os pontos mais importantes e relevantes para o estudo de forma sucinta.

Quadro 1: Revisão bibliográfica condensada com os pontos relevantes dos capítulos abordados.

Capítulo	Resumo	Pontos Relevantes
Mudanças Climáticas	Apesar das variações climáticas serem naturais, a elevação da temperatura tem ocorrido de forma mais rápida e intensa no último século, com um ritmo 50 vezes maior do que nos ciclos naturais. A urbanização e as emissões de gases de efeito estufa são apontadas como principais causas, afetando especialmente países pobres e agrícolas. Protocolos como Kyoto (1997) e o Acordo de Paris (2015) foram estabelecidos para reduzir as emissões e conter o aumento da temperatura global. O Brasil ratificou o Acordo de Paris e definiu metas próprias de redução de emissões, incluindo o aumento de energias renováveis e a restauração de florestas.	Aceleração das Mudanças Climáticas; Ações antrópicas e urbanização como causas dessas mudanças; Protocolos Internacionais ressaltam a urgência e importâncias de abordar medidas sobre as mudanças climáticas no âmbito global; Participação do Brasil.
Clima e Ilhas de Calor Urbanos	As ilhas de calor urbano são áreas urbanas com temperaturas mais altas do que as áreas circundantes, causadas por fatores como a emissão de GEEs, a impermeabilização do solo e substituição de áreas verdes por concreto, que contribui para reter o calor. Isso leva a impactos negativos na saúde e no meio ambiente. Medidas para mitigar as ilhas de calor incluem aumentar a vegetação, usar materiais reflexivos e planejar o uso do solo de forma mais eficiente.	Albedo reduzido; Edifícios e estruturas urbanas; Atividades antrópicas; Emissão de GEEs; Falta de vegetação; Alteração nos padrões de circulação de ar.
Telhados Verdes	Telhados verdes são sistemas de cobertura que incorporam vegetação sobre uma camada impermeabilizante. Existem dois tipos: extensivos, com plantas rasteiras, e intensivos, com vegetação mais densa. Oferecem isolamento térmico, reduzem as ilhas de calor, melhoram a qualidade do ar, gerenciam águas pluviais e aumentam a biodiversidade urbana. No entanto, têm custos iniciais mais altos e exigem manutenção frequente. Ainda assim, são incentivados em muitas áreas como parte de iniciativas de sustentabilidade urbana.	Isolamento térmico; Eficiência energética; Melhora na qualidade do ar; Gestão de águas pluviais; Mitigação de ICU; Estética e biodiversidade.
Vegetação Utilizada	A grama amendoim (<i>Arachis repens</i>) é uma planta rasteira e perene conhecida por suas folhas pequenas e flores amarelas. Esta espécie fixa nitrogênio no solo, melhorando sua fertilidade. Resistente à seca e ao pisoteio, é adequada para climas tropicais e subtropicais. A grama esmeralda (<i>Zoysia japônica</i>), é conhecida por sua folhagem densa e verde vibrante, sendo popular em paisagismo. Possui textura fina, tolerância ao sol e sombra, além de resistência ao frio. Requer baixa manutenção e cresce lentamente, formando um tapete denso.	Ambas possuem baixa manutenção; A grama amendoim possui características que favorecem o paisagismo; Adequadas para climas tropicais.
Simulação em Larga Escala	O <i>ENVI-met</i> é um software avançado de modelagem microclimática usado para simular padrões de temperatura, umidade e vento em ambientes urbanos e rurais. Ele cria modelos tridimensionais detalhados, simulando fluxo de ar, transferência de calor e umidade. Utilizado em arquitetura, planejamento urbano e estudos de clima urbano, o <i>ENVI-met</i> é uma ferramenta essencial para compreender e projetar ambientes sustentáveis. Suas características incluem análise do clima urbano, impacto ambiental de projetos urbanos.	Modelagem microclimática avançada; Modelagem tridimensional; Análise do clima urbano; Impacto ambiental de projetos urbanos.
Área de estudo	São Carlos - SP, é uma cidade do interior paulista conhecida por seu desenvolvimento tecnológico e educacional. Abriga importantes universidades e centros de pesquisa, como a USP e UFSCar. Apresenta clima tropical úmido e possui áreas verdes preservadas. Entretanto, devido à falta de planejamento urbano, sofre com ICU, comuns em áreas urbanas densas, que aumentam a impermeabilização, junto com a falta de vegetação, emissão de GEEs e atividades humanas.	Urbanização intensa; Falta de planejamento urbano; Urgência de medidas mitigatórias.

Fonte: Autoral, 2024.

3. OBJETIVOS

3.1. Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar e caracterizar o comportamento térmico de um sistema de duas plataformas experimentais, sendo uma com vegetação representando a aplicação da técnica de telhados verdes, e outra com solo exposto; e verificar o potencial de seu uso para mitigar os efeitos dos fenômenos de ilhas de calor urbano em São Carlos - SP.

3.2. Específicos

Para atingir-se o objetivo geral proposto neste trabalho, foram realizadas etapas experimentais e de análises de dados, descritas a seguir:

- Comparar os dados de temperaturas entre as plataformas duas plataformas de mesmas dimensões, porém uma com vegetação e outra com solo exposto, e do ar;
- Verificar a contribuição da aplicação da técnica de telhados verdes para a mitigação de Ilhas de Calor Urbano para área selecionada, através de simulações no *software ENVI-met*.

4. METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos se baseiam na construção de dois modelos físicos protótipos de telhados verdes, a fim de realizar a medição das temperaturas das camadas subsuperficiais e do ar acima da camada vegetal. Após os dados serem coletados, foram realizadas simulações computacionais a fim de estimar o potencial mitigatório de telhados verdes nas ilhas de calor urbano em São Carlos - SP.

Foram realizadas medições de temperatura do ar, das superfícies e de base em dois cenários distintos: um com solo exposto (Plataforma Convencional – PC) e outro com vegetação (Plataforma com Vegetação– PV), dispostos em 2 plataformas de teste construídas. Assim, a metodologia deste projeto foi dividida em 5 etapas principais. Sendo elas: Montagem das Plataformas; Adição de substrato e vegetação; Coleta de dados de temperaturas das plataformas; Coleta de dados microclimáticos. e Simulação Computacional com o *software ENVI-met*. Todas as etapas serão realizadas na cidade de São Carlos, no *Campus* da UFSCar.

4.1. Montagem das Plataformas

Nesta etapa ocorreu o dimensionamento e montagem das plataformas de teste. O dimensionamento foi realizado com base na melhor forma de manutenção e coleta dos dados, e considerando valores dos materiais para construção das mesmas; desta forma, o sistema será composto por duas plataformas com dimensões de 1,00 x1,00 m, tendo 15 cm de profundidade e 1 m de altura em relação ao nível do solo até a parte de baixo da plataforma.

Apesar de as plataformas possuírem dimensões iguais, cada uma será destinada a um tipo de medição e simulação de cenário, sendo uma delas a Plataforma Convencional (PC), a que irá representar solo exposto, sem a implementação de uma cobertura verde; já a segunda, Plataforma com Cobertura Verde (PCV), representará a implementação de um sistema de telhado verde contendo substrato e vegetação. Ambas as plataformas foram montadas com as dimensões descritas, estruturadas em madeira cedrinho em suas laterais, o fundo foi feito com madeirite plastificado, e os pés foram feitos com peroba. A Figura 5 a seguir mostra a estrutura das plataformas, e suas camadas componentes.

Figura 5: Estrutura das plataformas.



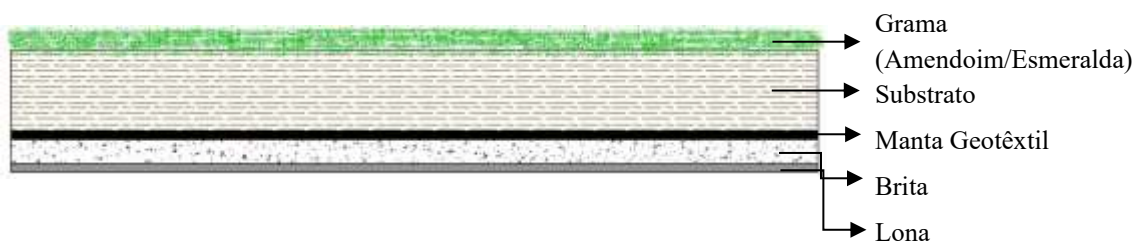
Fonte: Autoral, 2023.

4.2. Adição de Substrato e Vegetação

Após a montagem de ambas as plataformas, deu-se início à etapa de medição de temperatura das camadas subsuperficiais, embaixo da plataforma e do ar acima da vegetação; sempre mantendo suas características e manutenção em dia. No caso da Plataforma Convencional, foi adicionado substrato com altura de 15 cm de terra vegetal, em ambas as coletas. Já a Plataforma com Cobertura Verde, houve adição de substrato com altura de 10 cm, e na primeira coleta foram plantadas mudas da espécie de grama amendoim, havendo manutenção e irrigação de acordo com a necessidade da espécie e da plataforma em geral; para a segunda coleta de dados, devido à onda de calor que ocorreu no segundo semestre de 2023, a grama amendoim não suportou as altas temperaturas, além de ter sofrido com formigas cortadeiras. Por isto, foi plantada a grama esmeralda

(*Zoysia japônica*), que necessita de menor manutenção, e tem melhor desenvolvimento ao sol pleno. A Figura 6 mostra os materiais componente do protótipo de telhado verde.

Figura 6: Camadas dos materiais componentes da plataforma com vegetação.



Fonte: Autoral, 2023.

4.3. Coleta de Dados

Posteriormente a montagem de ambas PC e PCV, foram posicionados sensores para medição de temperatura do ar, das subsuperfícies, e embaixo da plataforma. A Tabela 2 mostra as siglas e seus correspondentes significados.


Tabela 2: Siglas e significados referentes às plataformas.

Siglas	Significado
PC	Plataforma Convencional
PCV	Plataforma com Vegetação
Tss S/G	Temperatura Subsuperficial sem grama
Tss G	Temperatura Subsuperficial com grama
Tb S/G	Temperatura da Base sem grama
Tb G	Temperatura da Base com grama

Fonte: Autoral, 2023.

A coleta dos dados de temperatura e umidade do ar foi realizada através do programa HOBOWare, sendo que o sensor foi programado para registrar os dados a cada hora e durante 30 dias. Os dados foram avaliados a partir dos dias com céu claro, temperaturas elevadas, ventos fracos e baixa umidade relativa do ar. A Figura 7 a seguir mostra o sensor utilizado e suas informações.

Figura 7: Sensor de temperatura e umidade do ar e suas informações técnicas.

	Marca / Modelo	HOBO/ Pro V2 U23-001
	Faixa de operação	-40 °C a 70 °C
	Precisão	0,2 °C acima de 0 °C até 50 °C
	Resolução	0,02 °C a 25 °C
	Tempo de resposta	40 min no ar em movimento de 1 m/s

Fonte: HOBO, 2023.

A Figura 8 mostra o sensor termopar utilizado e suas informações técnicas.

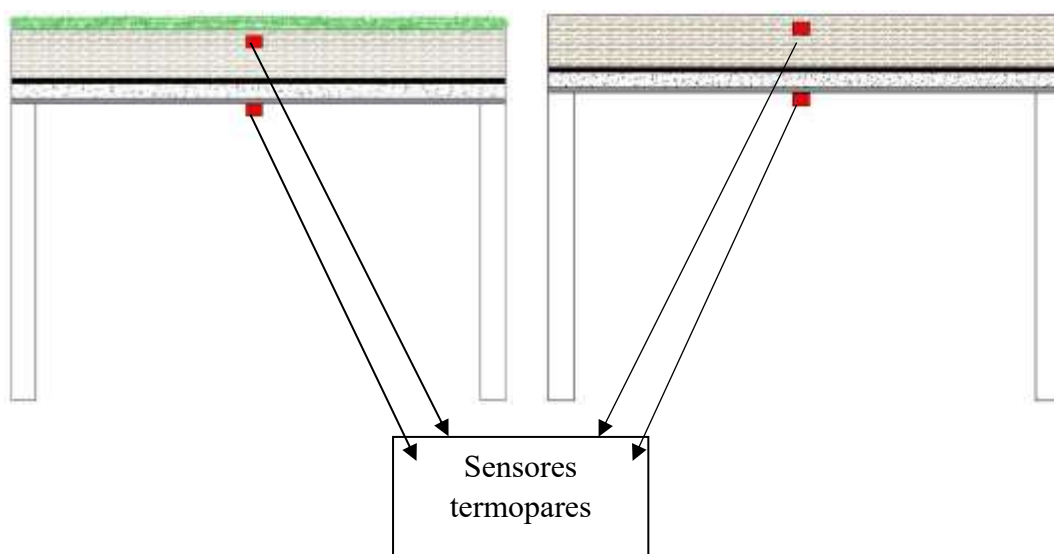
Figura 8: Sensor termopar utilizados e suas informações técnicas.

	Marca / Modelo	Dallas / DS18B20
	Descrição	1-Wire® Digital Thermometer
	Tipo	Sonda
	Amplitude de temperaturas	-55°C à +125°C.
	Precisão	±0,5°C (à 25°C)
	Microcontrolador	Esp32 (WROOM)

Fonte: KOWALSKI, 2019.

O sensor de temperatura do ar com proteção foi instalado ao lado das plataformas como demonstrado pela terceira imagem da Figura 11. A Figura 9 mostra a vista lateral dos sensores implantados.

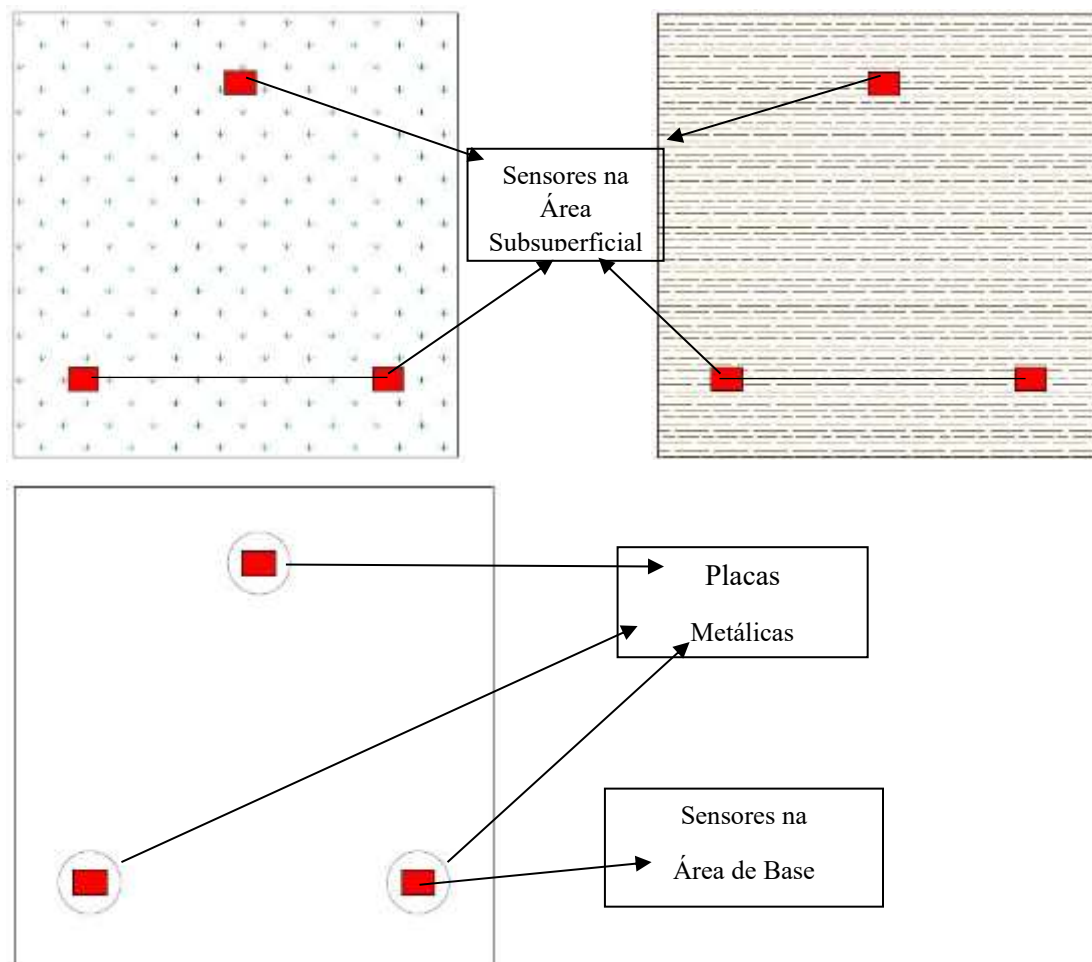
Figura 9: Vista lateral da implantação dos sensores termopares.



Fonte: Autoral, 2023.

Além destas posições dos sensores, serão colocados 3 na camada subsuperficial, e 3 na camada de fundo ou de base. A Figura 10 mostra a posição que os sensores foram dispostos.

Figura 10: Vista superior da disposição dos sensores termopares, nas camadas subsuperficial e de base.



Fonte: Autoral, 2023.

Posteriormente a montagem de ambos os sistemas PC e PCV, foram posicionados sensores para medição de temperatura do ar e das subsuperfícies, e embaixo da plataforma. Esta etapa foi realizada através do programa referente ao equipamento sensor utilizado para a medição das temperaturas ao longo dos dias, a cada hora. Os dados foram avaliados a partir dos dias com céu claro, temperaturas elevadas, ventos fracos e baixa umidade relativa do ar.

Após definidos os materiais das camadas, foram instalados os sensores a serem utilizados para monitoramento da temperatura do ar (T_a); temperatura subsuperficial (T_{ss}) localizada a aproximadamente 3 cm abaixo da superfície do solo; e a temperatura de fundo ou de base (T_b) localizada na parte embaixo da plataforma. Nesta última, o sensor foi acoplado em uma chapa de alumínio, mantendo-o em contato direto com a camada impermeabilizante. Ou seja, o madeirite não influenciou na temperatura registrada. A Figura 11 mostra a disposição dos sensores nas plataformas posicionadas no *campus* da UFSCar de São Carlos.

Figura 11: Sensores instalados nas plataformas dentro do campus UFSCar São Carlos. 1) Primeira coleta realizada em março de 2023. 2) Segunda coleta realizada em dezembro de 2023. 3) Sensor HOBO utilizado em ambas as coletas para registrar temperatura e umidade do ar.

1)



2)



3)



Fonte: Autoral, 2023.

4.4. Coleta de dados microclimáticos

Foram coletados os dados de temperatura e umidade do ar no Ponto A, conforme indicado na Figura 12.

Figura 12: Ponto A de coleta dos dados microclimáticos em São Carlos, SP.



Fonte: Autorial, 2023.

O sensor termo-higrômetro utilizado para coletar a temperatura e umidade relativa do ar foi o mesmo utilizado nas plataformas, tendo suas especificações descritas na Figura 7.

A coleta ocorreu durante o período de 19 de setembro de 2023 a 22 de setembro de 2023, com intervalo de registro de uma hora. Para isso, os termo-higrômetros foram instalados em postes elétricos a aproximadamente 2,5 metros de altura, visando a segurança dos equipamentos e a não interferência nas atividades da obra. A instalação pode ser vista na Figura 13.

Figura 13: Zoom do Ponto A de coleta dos dados microclimáticos em São Carlos, SP.



Fonte: Autorial, 2023.

4.5. Simulação em Larga Escala

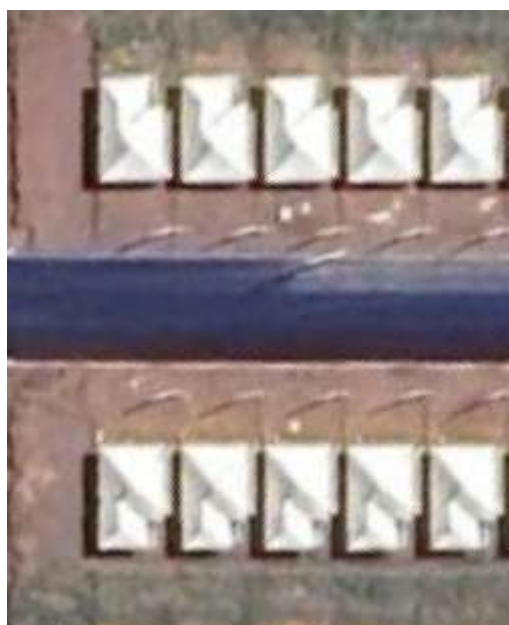
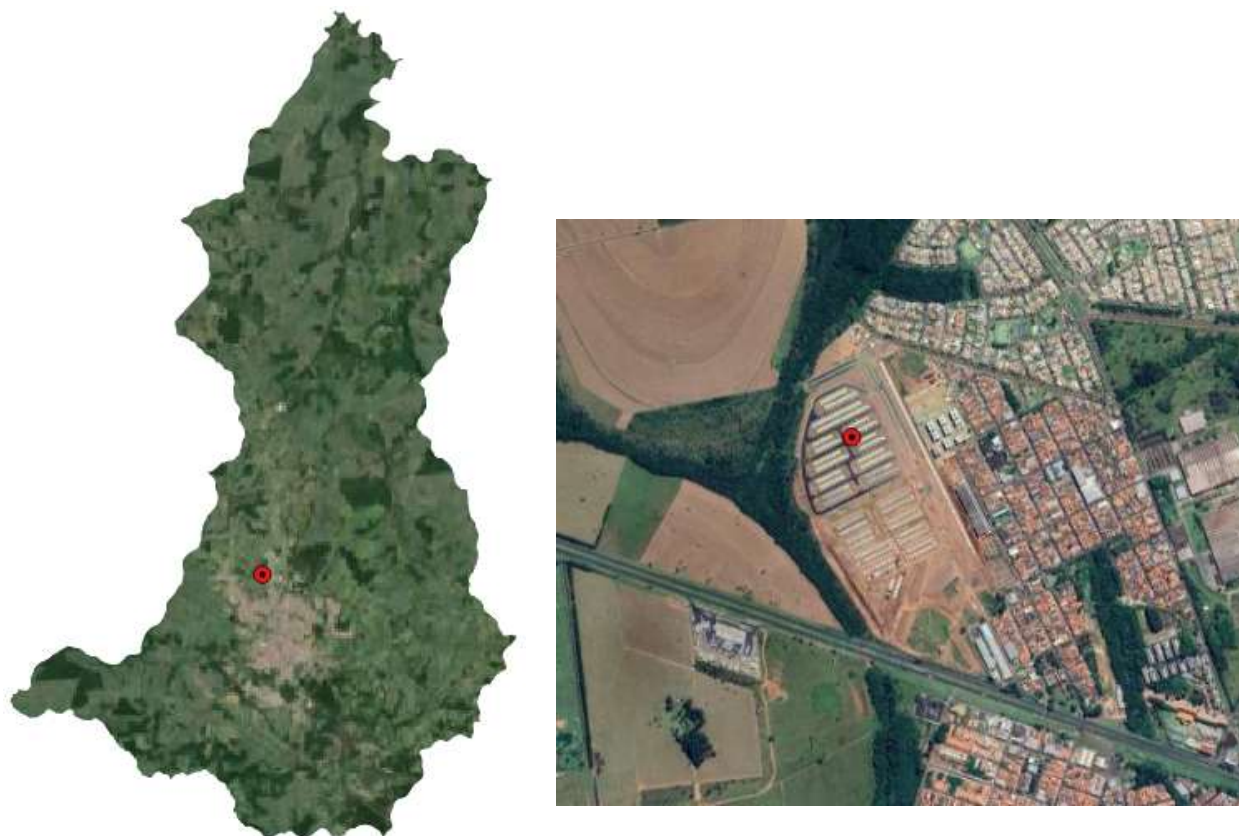
4.5.1. Seleção da área para simulação

O estudo foi realizado na Universidade Federal de São Carlos, em São Carlos – SP, e as etapas descritas anteriormente foram desenvolvidas neste local. Entretanto, para a realização da simulação no *software ENVI-met*, foi necessário realizar-se um estudo de uso e ocupação do solo da cidade, para recortar a melhor área para o experimento. Desta forma, um mapa de uso e ocupação do solo foi produzido, a fim de verificar a área urbana presente nos limites do município. O Anexo I apresenta este mapa.

Posteriormente, foi necessário verificar as diferenças de temperatura de acordo com os usos de superfície. A partir de *download* de imagens de satélite LandSat8-9 do site *EarthExplorer*, foi possível utilizar o arquivo de Banda 10 que traz informações do espectro termal da imagem. Através do *software* QGIS versão 3.22.7, utilizando-se da calculadora raster e do *plugin Semi-Automatic*, foi produzida uma imagem com a temperatura de brilho; com este resultado e utilizando-se o mapa de uso e ocupação do solo da cidade, foi possível produzir um mapa com a temperatura de superfície terrestre (TST ou LST – *Land Surface Temperature*) do município, sendo apresentado no Anexo II.

Através do IBGE, utilizando-se os mapas de perímetro do município de São Carlos, juntamente com o mapa de área urbanizada; foi possível recortar apenas a área urbanizada do mapa de TST, para facilitar a escolha da área para simulação; este mapa está apresentado no Anexo III. Por fim, a área selecionada para realização das simulações no ENVI-met está apresentada na Figura 14 a seguir. É importante ressaltar que a imagem com zoom aproximado, mostrado pela última figura abaixo, está rotacionada em 26 graus, isto foi realizado para facilitar a modelagem no software ENVI-met.

Figura 14: Recorte de área da cidade de São Carlos - SP para as simulações.



Fonte: Autoral, 2024.

A área apresentada acima possui em sua maioria residências e pouca vegetação, o que se tornou ideal para a simulação envolvendo ilhas de calor urbano e a implantação de telhados verdes.

4.5.2. Simulações Microclimáticas - *ENVI-met*

Nesta etapa foi utilizado o programa de análise *ENVI-met*, realizou-se uma simulação computacional utilizando-se dos dados reais, obtidos ao longo do período de experimento, juntamente com a área definida para larga escala, o que permitiu verificar o quanto o sistema PV influenciaria e mitigaria o fenômeno de ICU.

Primeiramente fez-se o *download* da versão 5 do *software*, sendo a mais recente. Ao abrir o aplicativo um menu é apresentado, a Figura 15 exemplifica.

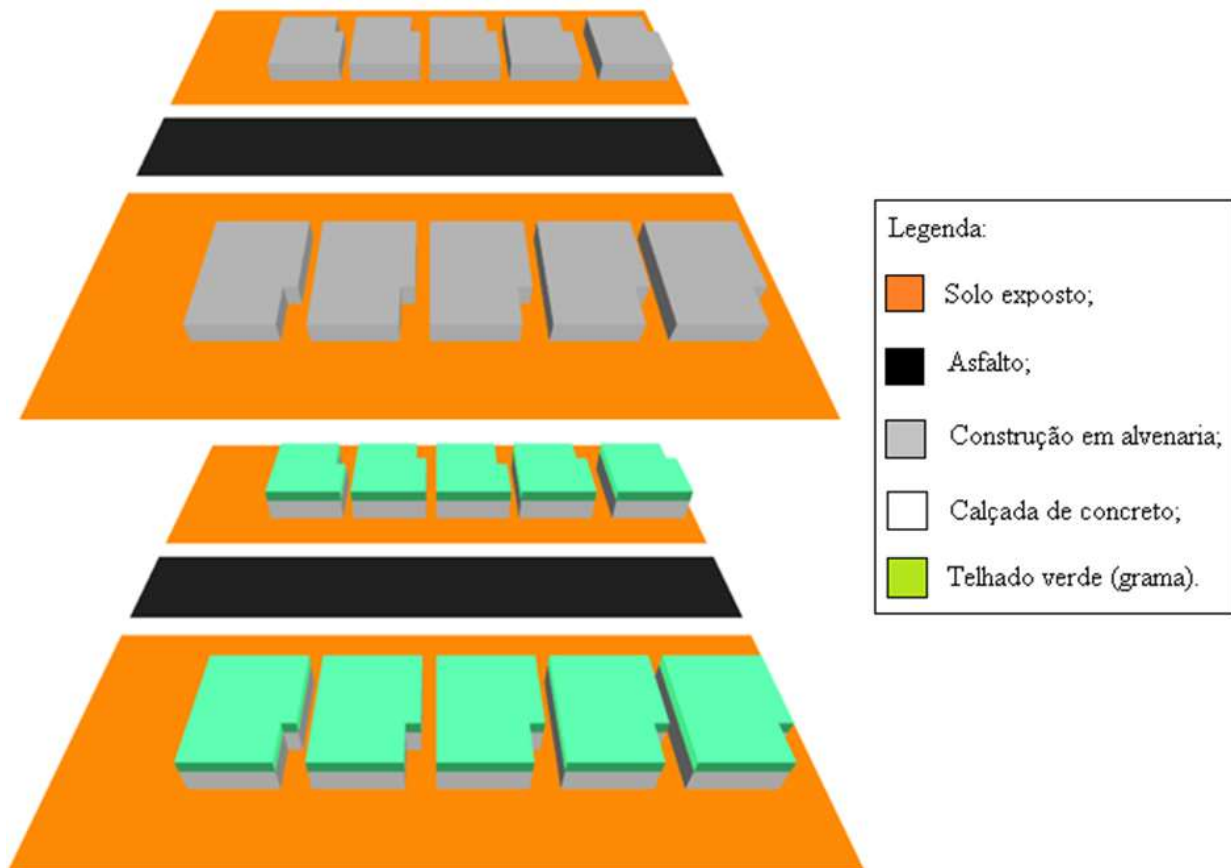
Figura 15: Menu do *software ENVI-met* versão 5.



Fonte: Autoral, 2024.

A simulação exige várias etapas de preparação de imagem e adição de atributos para ser realizada. O primeiro passo foi através da opção “*Spaces*” abrir a imagem da área recortada para estudo, e assim adicionar os atributos de telhado, calçada, asfalto e vegetação. É válido ressaltar que foram feitos dois arquivos com estas características, um para simular um telhado convencional, e o outro para simular um telhado verde adicionando-se uma camada de grama acima do telhado convencional. É indicado inspecionar se o modelo está dentro dos padrões exigidos pelo *software*, sendo que na versão gratuita, o tamanho máximo de grade é de 50x50x40 metros. A Figura 16 mostra o resultado obtido nesta etapa.

Figura 16: Adição dos atributos e modelagem da área de estudo.



Fonte: Autoral, 2024.

A próxima etapa foi na opção “*Envi-guide*”, onde adiciona-se os dados a serem utilizados na simulação, neste caso, foram de temperatura e umidade relativa. Em todas as simulações foram utilizados os dados obtidos através das coletas no ponto A presente dentro da área HIS, representada na Figura 12. O que gerou a diferença nos resultados foi a adição do atributo representando telhado verde; o intuito foi simular que ambos os cenários estivessem em condições microclimáticas iguais, mudando apenas o tipo de cobertura.

Desta forma, foram gerados 6 arquivos de dados para simulação, que é rodada na opção “*Envi-core*”, a simulação ocorre um arquivo por vez, o que torna o processo demorado; seleciona-se o arquivo, faz-se a checagem para que não ocorra erros inesperados, então a simulação pode começar a rodar. Ao longo desta etapa, são geradas pastas para cada condição analisada, neste estudo, a pasta contendo os dados e resultados

sobre atmosfera que serão considerados. Para obter-se os mapas das simulações utiliza-se a opção “*Leonardo*” que extrai os dados da rodagem, os apresentando de forma visual, nesta etapa pôde-se observar todos os resultados referentes a cada horário de coleta e análise e estão apresentados no capítulo a seguir.

As ilhas de calor urbano são calculadas pela relação de diferença entre as temperaturas de um local urbanizado e um local com mais áreas vegetadas e/ou menor processo de impermeabilização do solo e construções. O resultado obtido, descreve a temperatura mais elevada nas áreas urbanizadas em determinados horários, e pode demonstrar a perda rápida de temperatura nessas áreas em outros. A Fórmula 1 mostra este cálculo.

$$ICU = TUr - TVeg \quad \text{Fórmula 1}$$

Onde:

ICU: Ilhas de Carlos Urbano (°C);

TUr: Temperatura do Ar em Ambiente Urbano (°C);

TVeg: Temperatura do Ar em Ambiente Vegetado (°C).

O potencial mitigatório desse fenômeno climático, que pode ser realizado pelos telhados verdes, é calculado pela diferença entre as temperaturas de uma área urbanizada com a técnica aplicada com as temperaturas na área urbanizada de forma convencional. Esta diferença pode ter valores decimais, e em uma escala microclimática, que é o caso do estudo, é um valor considerável. A Fórmula 2 demonstra este cálculo.

$$Mit = TTV - TUr \quad \text{Fórmula 2}$$

Onde:

Mit: Mitigação de temperatura através de telhados verdes (°C);

TTV: Temperatura em área urbanizada com telhados verdes (°C);

TUr: Temperatura em área urbanizada com telhados cerâmicos (°C);

É importante ressaltar que todas as temperaturas utilizadas para chegar aos resultados de ilhas de calor urbano e potencial de mitigação através de telhados verdes, são simuladas, tendo como base os dados coletados na área HIS.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

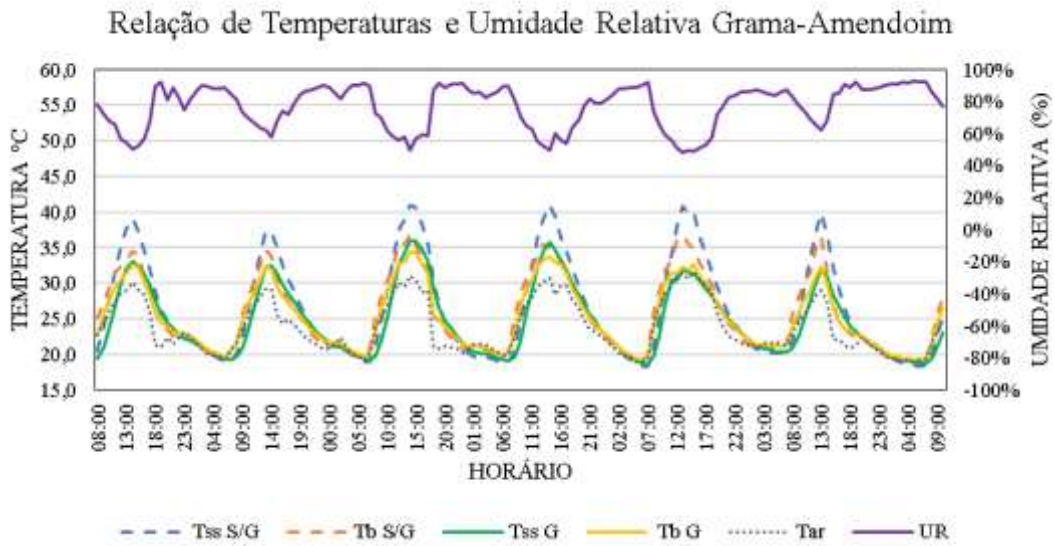
5.1. Dados coletados nas Plataformas

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir da coleta de dados dos dias 23/03/2023 ao dia 29/03/2023 utilizando-se a grama amendoim como vegetação; e dos dias 30/11/2023 ao dia 12/12/2023 utilizando-se a grama esmeralda como vegetação.

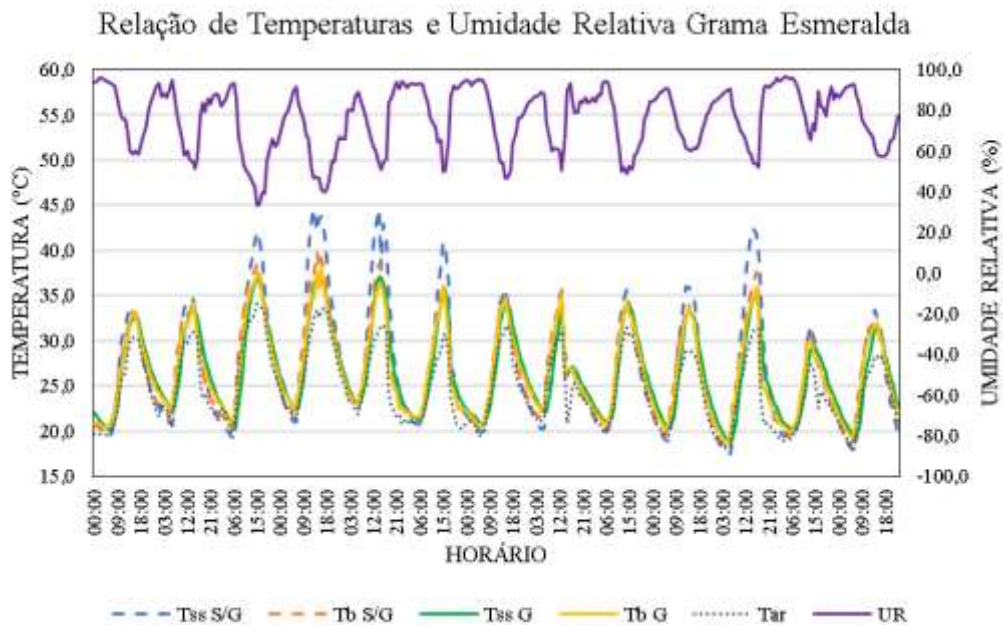
A Figura 17 apresenta os valores de temperatura registradas pelos sensores termopares nas plataformas com e sem grama, nas áreas subsuperficiais e de base; e os valores de temperatura do ar e umidade relativa. Sendo A referente à coleta com grama amendoim; e B referente à coleta com grama esmeralda.

Figura 17: Dados de temperaturas das plataformas com e sem grama nas áreas subsuperficiais (Tss S/G e Tss G), e nas áreas de base (Tb S/G e Tb G), temperatura do ar e umidade relativa do mesmo. A - Grama Amendoim; B - Grama Esmeralda.

A



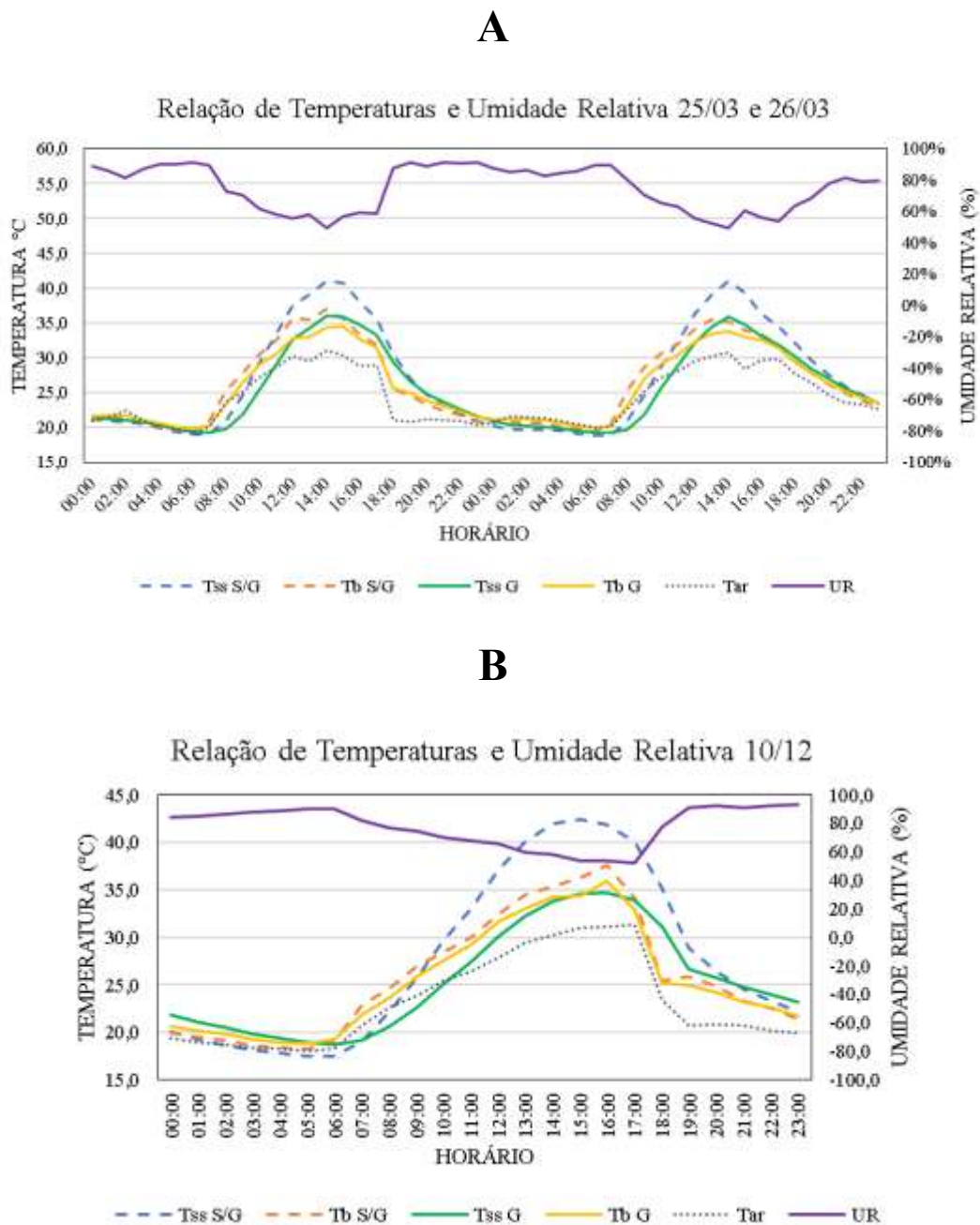
B



Fonte: Autoral, 2023.

A fim de facilitar a leitura e interpretação do gráfico, foi feito um recorte de dois dias (25/03 e 26/03), referente à coleta com a grama amendoim; e de um dia (10/12/2023) para a coleta com a grama esmeralda. Ambos estão representados pela Figura 18, para evidenciar os efeitos de redução do calor nas plataformas.

Figura 18: Relação de temperaturas nas áreas subsuperficiais com e sem grama (Tss G e Tss S/G) e de base (Tb S/G e Tb G). A - Temperatura e umidade relativa nos dias 25/03 e 26/03, plataforma com grama amendoim. B - Temperatura e umidade relativa no dia 10/12 plataforma com grama esmeralda.



Fonte: Autoral, 2023.

A partir da análise da Figura 18, pode-se comparar os valores de temperatura referentes às áreas subsuperficiais, onde a plataforma que não possui grama apresenta valores mais elevados ao longo do dia entre 8h e 18h em comparação com os valores referentes à plataforma com grama. O que permite afirmar que a presença de vegetação absorveu calor e radiação, garantindo diminuição de temperaturas superficiais registradas.

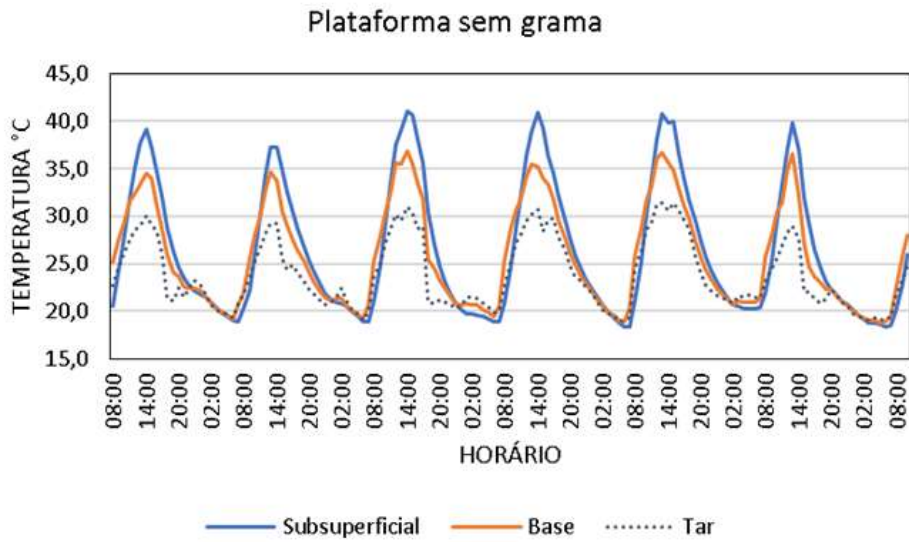
É possível observar que no período da noite, entre 18h e 8h, os valores de temperatura subsuperficial na plataforma sem grama diminui, enquanto que a plataforma com grama tem suas temperaturas reduzidas mais lentamente. Ou seja, é possível afirmar que a amplitude térmica da plataforma com grama é menor do que a plataforma sem grama ao longo do período analisado. Além disto, pegando-se o horário de 14h para analisar a variação de temperatura entre as plataformas, nota-se para a área subsuperficial, uma diferença de 5°C a 6°C a menos devido à presença de vegetação; já para a área de base, há uma diferença de 1°C a 2°C a menos devido à presença de vegetação.

Desta forma, a aplicação de telhados verdes pode contribuir tanto para diminuir a temperatura interior, melhorando o conforto térmico; como para manter o calor interno em estações e climas mais frios. Em ambas as situações as vantagens podem diminuir o consumo energético tanto para aquecimento, quanto para resfriamento.

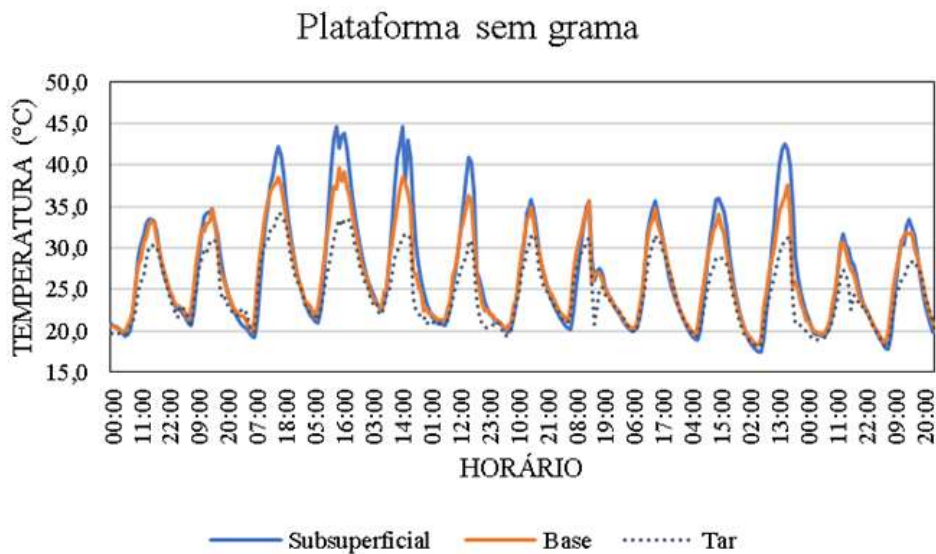
A Figura 19 apresenta o gráfico de temperaturas obtidas na plataforma sem grama, o que permite analisar apenas a ação da camada de substrato.

Figura 19: Temperaturas das áreas subsuperficial, de base e do ar referentes à plataforma sem grama. A - Março; B - Dezembro.

A



B

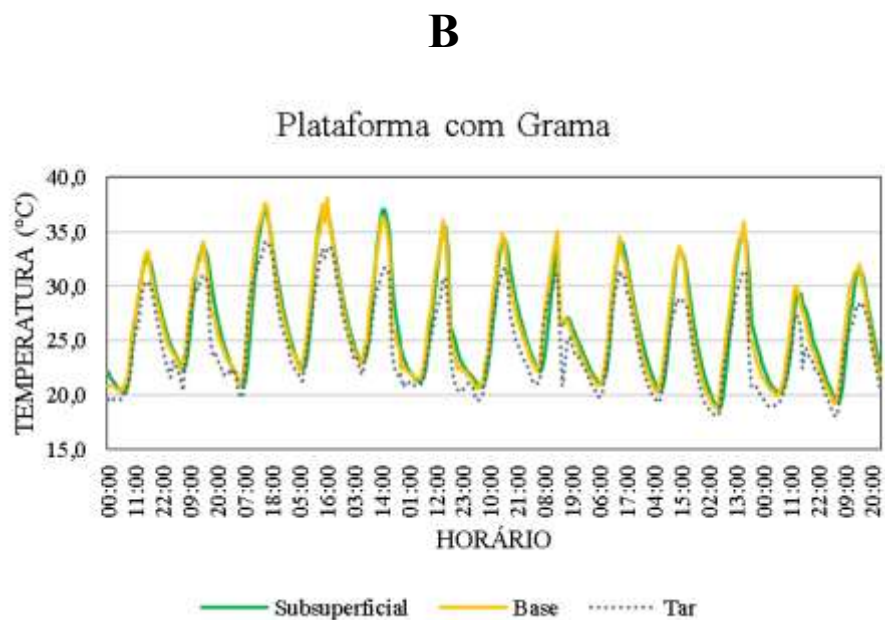
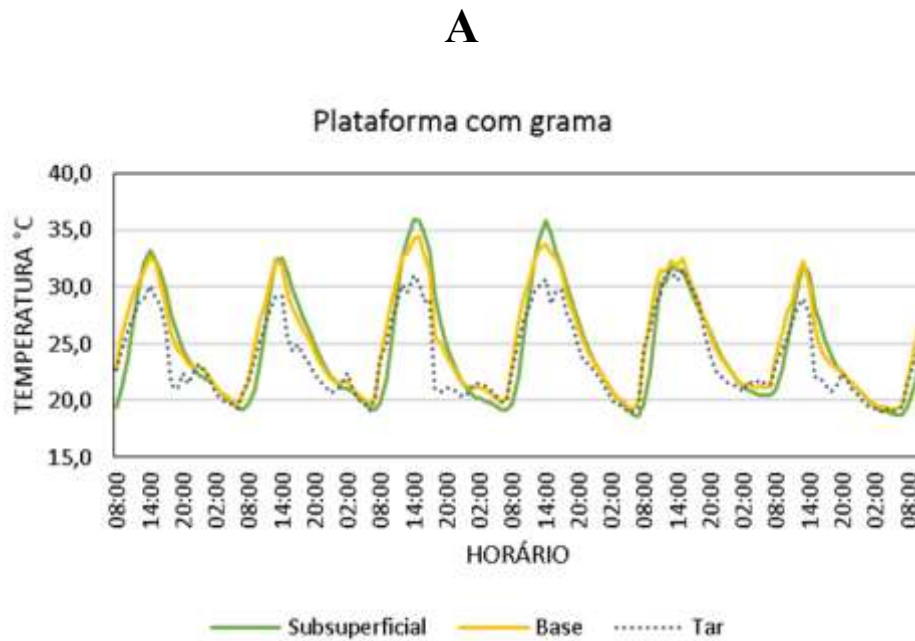


Fonte: Autoral, 2023.

A partir deste gráfico é possível afirmar que a temperatura subsuperficial tem valores maiores que a de base devido à camada de substrato que absorve calor e radiação. Entretanto ambas são mais elevadas em até 5°C aproximadamente em relação à temperatura do ar, pois o solo esquenta com rapidez devido a sua condutividade térmica

e calor específico. A Figura 20 apresenta os valores de temperaturas das áreas subsuperficial e de base juntamente com a do ar, relacionadas à plataforma com grama, o que permite verificar o efeito da grama e da camada de substrato.

Figura 20: Temperaturas das áreas subsuperficial, de base e do ar, referentes à plataforma com grama. A - Grama Amendoim; B - Grama Esmeralda.

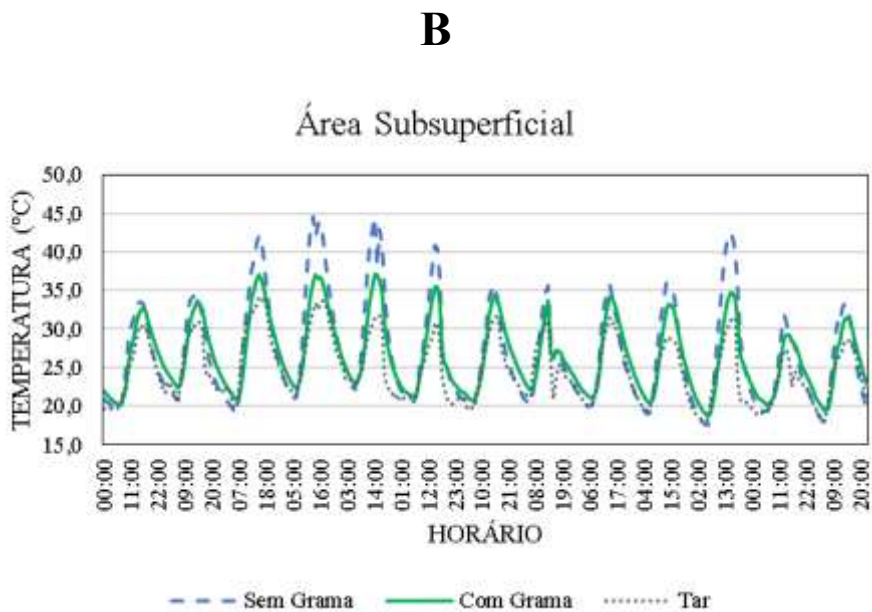
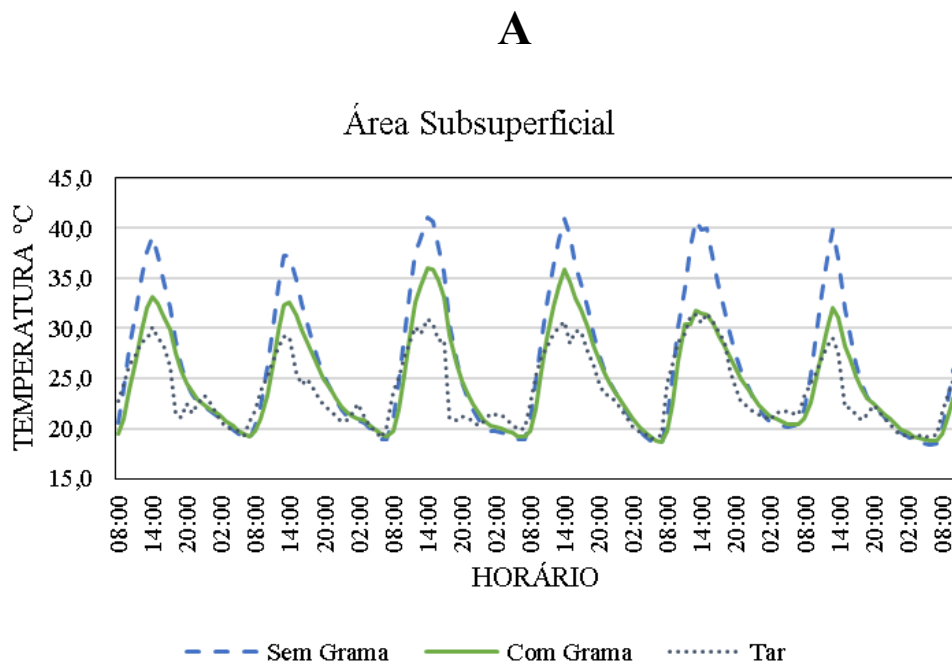


Fonte: Autoral, 2023.

A partir da Figura 20 pode-se verificar que a diferença de temperatura entre as áreas subsuperficial e de base não é expressiva, porém, ainda assim a temperatura da base é menor que a subsuperficial, o que demonstra a interferência do conjunto substrato e grama na redução de temperatura através da maior absorção de calor e radiação e preservação da umidade do solo.

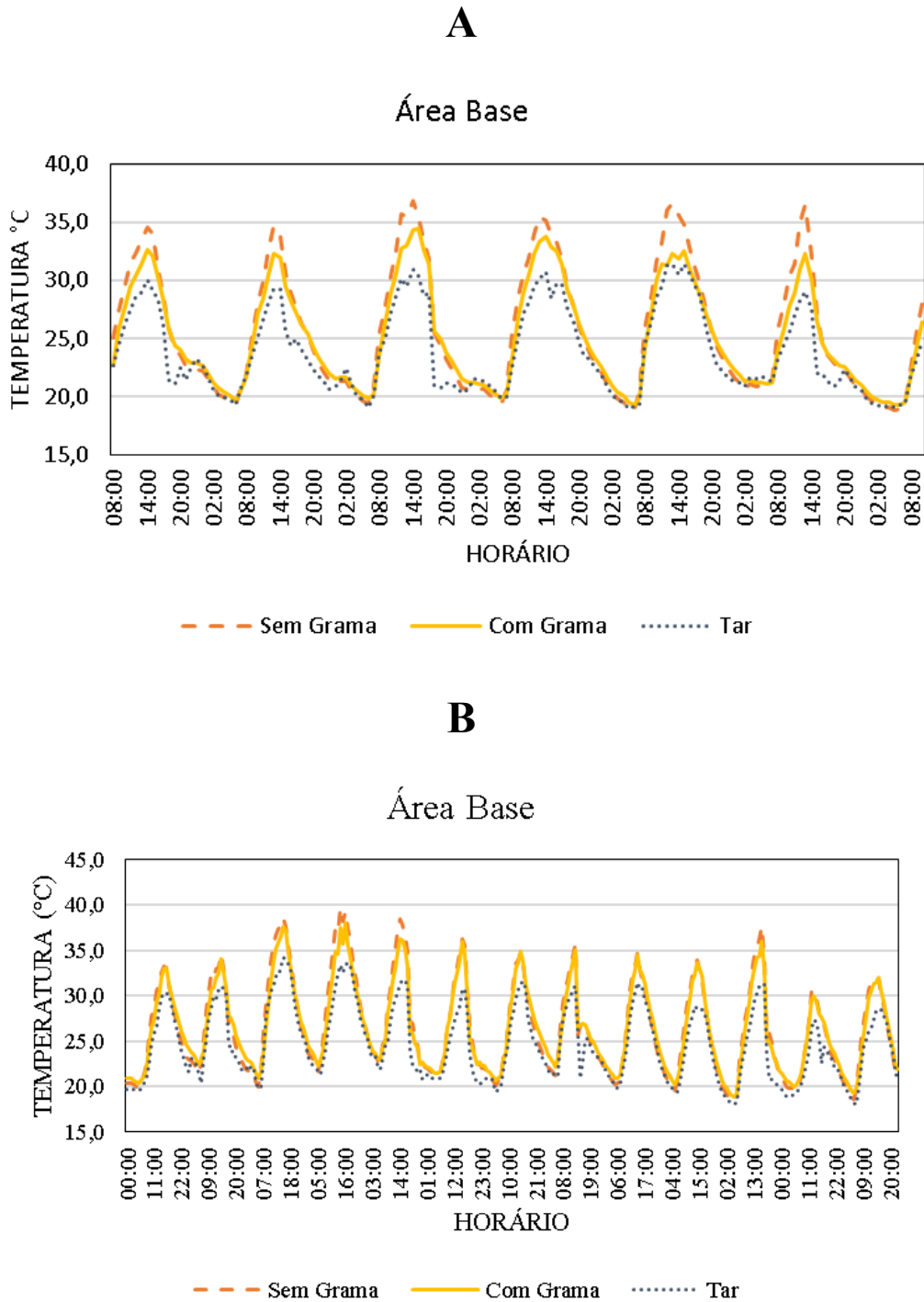
A Figura 21 e Figura 22 apresentam os gráficos de temperaturas referentes à comparação entre plataforma com e sem grama, sendo um para as áreas subsuperficiais, e outro para área de base.

Figura 21: Relação de temperaturas das áreas subsuperficiais em ambas as plataformas.
A - Grama Amendoim; B - Grama Esmeralda.



Fonte: Autoral, 2023.

Figura 22: Relação de temperaturas das áreas de base de ambas as plataformas. A - Grama Amendoim; B - Grama Esmeralda.



Fonte: Autoral, 2023.

De modo geral, analisando-se os gráficos e os dados obtidos, verifica-se a redução de temperatura em ambas as áreas (base e subsuperficial) na plataforma com vegetação, devido à absorção de calor e radiação efetuada pela grama e pelo processo de evapotranspiração realizado que contribui no aumento da umidade relativa do ar e consequentemente na temperatura percebida.

Levando-se em consideração os trabalhos utilizados como base, em relação ao conforto térmico, Wahba *et. al.*, 2018, obtiveram resultados da aplicação de coberturas e paredes verdes em edificações, que contribuiriam na diminuição em 5°C na temperatura do ar e sensação térmica e em 25% no consumo de energia elétrica anual.

No trabalho realizado por Mutani e Todeschi (2020), foi verificado que conforme há aumento de superfícies verdes no meio urbano, há diminuição da temperatura das superfícies terrestres e do ar, mostrando como a presença de vegetação está diretamente ligada à temperatura do ar observada. Perussi (2016) em seus experimentos, constatou diminuição de 4,1°C na temperatura do ar, quando se há cobertura verde.

Arabi *et al.* (2015) estudaram a influência das coberturas verdes na mitigação das ilhas de calor urbano, através de uma análise bibliográfica, verificando que há relação entre ambos os assuntos, sendo que as coberturas verdes tem a capacidade de mitigar o fenômeno de ilhas de calor urbano, além de diminuir a poluição do ar e contribuir na gestão de águas pluviais e diminuir o escoamento superficial.

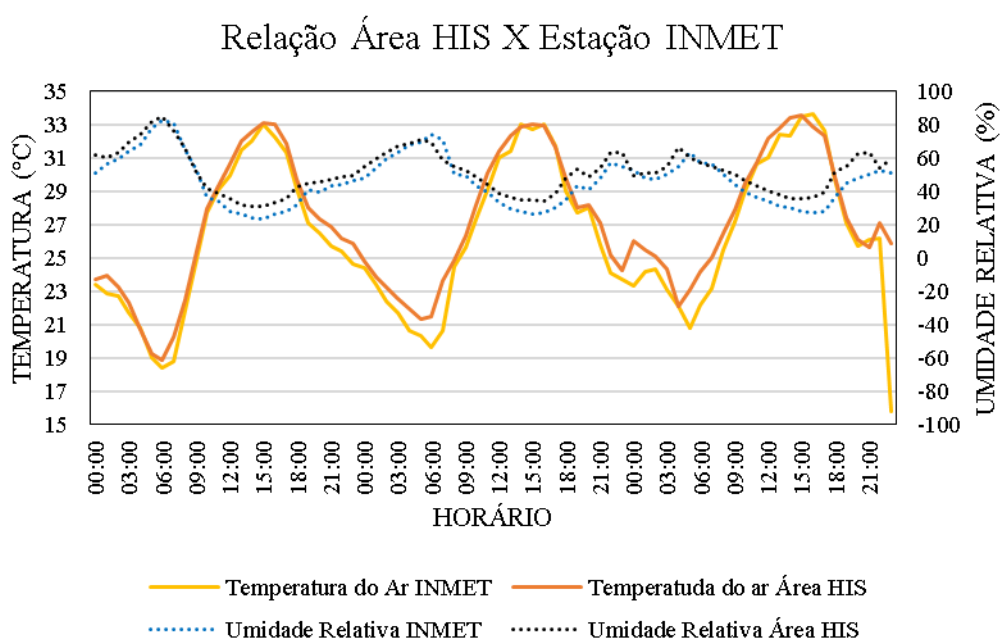
Desta forma, comparando-se os resultados obtidos ao longo do experimento com trabalhos já realizados, pode-se verificar que há diferenças de resultados, devido aos métodos utilizados, diferentes períodos de medição e climas das localizações onde foram realizados. Devido ao fato dos telhados verdes aumentarem a inércia térmica das coberturas da edificações, a variação da temperatura do ar dos ambientes internos tendem a se tornar mais estável. Neste caso, se tornam ótimas alternativas para evitar também a perda de calor durante o inverno.

Levando-se em consideração os trabalhos utilizados como base, na parte de conforto térmico, Wahba *et. al.*, 2018, onde obteve resultados da aplicação de coberturas e paredes verdes em edificações, que contribuiriam na diminuição em 5°C na temperatura do ar e sensação térmica e em 25% no consumo de energia elétrica anual.

5.2. Dados microclimáticos coletados na Área HIS

Os resultados apresentados a seguir foram coletados nos empreendimentos de Habitação de Interesse Social (HIS) de 20/09/2023 a 22/09/2023. A Figura 23 apresenta os dados de temperatura do ar da área HIS, que representam um microclima urbano, em comparação com os dados da estação meteorológica INMET, que representa um microclima rural e pouco urbanizado.

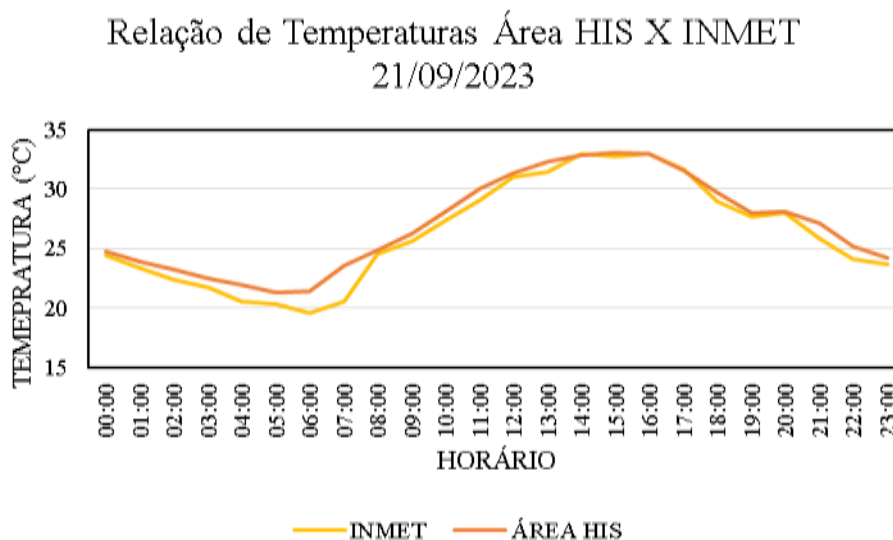
Figura 23: Relação de temperaturas do ar e umidades relativas, coletados em área HIS e pela estação INMET.



Fonte: Autoral, 2024.

A fim de facilitar a interpretação dos dados, foram selecionadas as temperaturas do dia 21/09/2023. A Figura 24 apresenta estes dados.

Figura 24: Relação de temperaturas do ar entre área HIS e INMET no dia 21/09/2023.



Fonte: Autoral, 2024.

Analisando-se este gráfico, é possível verificar diferenças de temperatura significativas em alguns horários, principalmente na parte da manhã em torno de 6h, à tarde entre 12h e 16h, e à noite entre 19h e 00h. Estas diferenças positivas de temperatura representam ilhas de calor urbano, mesmo que sendo valores entre 1°C e 5°C, onde a área urbanizada (HIS) apresenta valores superiores em comparação com a área rural (INMET). O oposto ocorre, quando a área rural apresenta uma perda de temperatura menor ao longo do período noturno, isto ocorre devido à presença de vegetação contribuir para a inércia térmica, mantendo a temperatura mais estável.

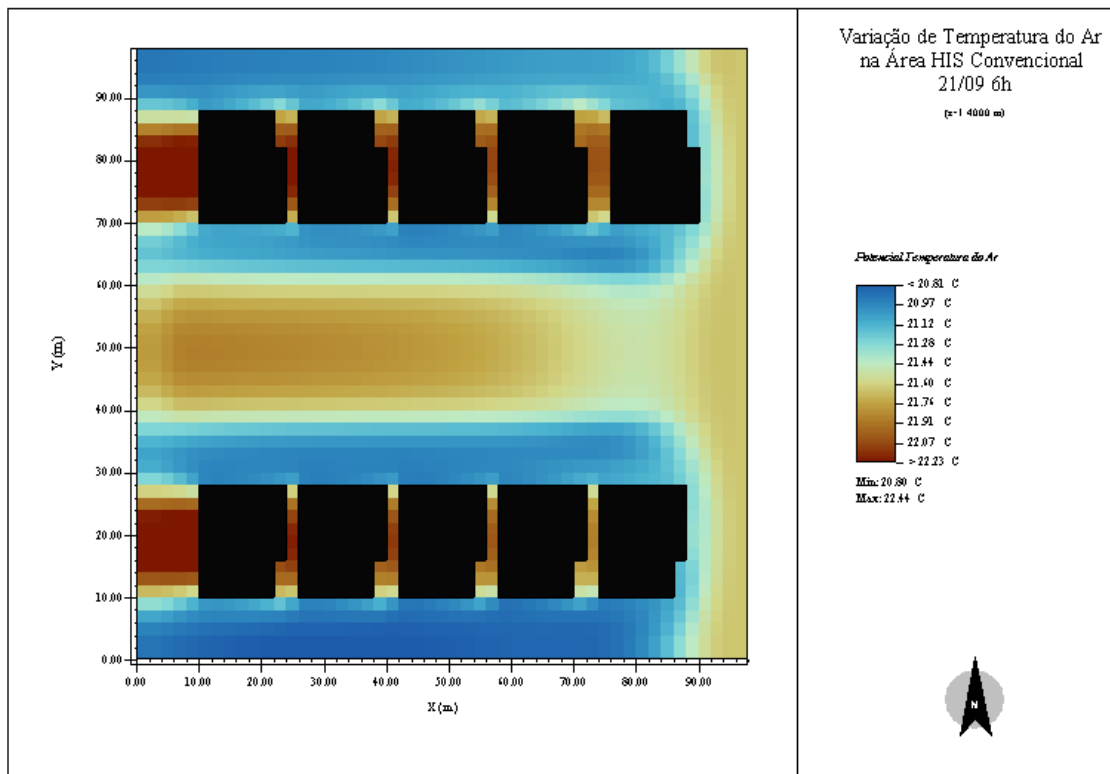
Na área HIS, a queda de temperatura é mais brusca, pois os materiais presentes, como concreto e asfalto, perdem temperatura mais rapidamente, ao mesmo tempo que contribuem para o fenômeno de ilhas de calor urbano.

5.3. Simulação com o *ENVI-met*

A partir dos dados de temperatura do ar, coletados na área HIS, foram realizadas simulações no *software ENVI-met*. Foram duas simulações para o dia 21/09/2023 de coleta, está apresentado apenas este dia para facilitar as análises e por serem dias consecutivos, não houveram diferenças significativas nos resultados. Foram selecionados

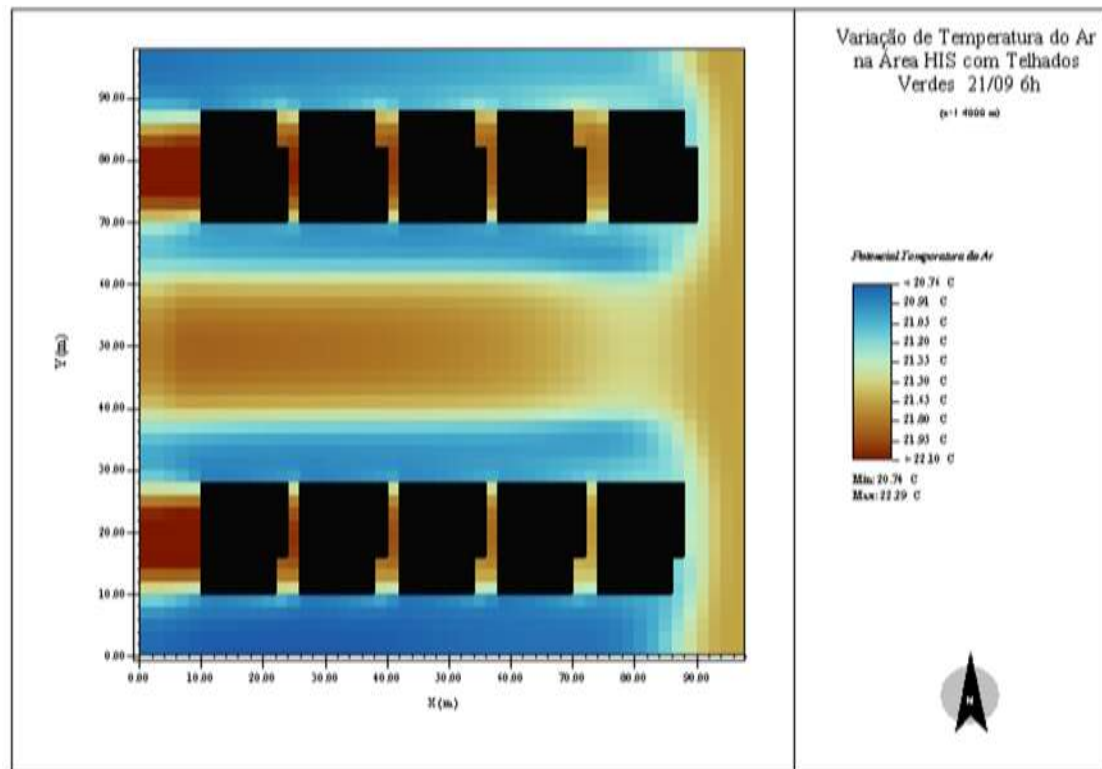
três horários diferentes que trazem o fenômeno de ilhas de calor urbano, sendo estes às 6h, 15h e 21h. No total foram seis simulações, duas para cada horário, uma simulação com a modelagem da área de forma convencional, com telhados cobertos por telhas cerâmicas; e outra simulação com telhados verdes com grama de até 30cm de altura; todos os dados trazem temperaturas para uma altura de 1,4 metros. A Figura 25 apresenta estes dados das simulações para o dia 21/09 às 6h.

Figura 25: Variação de temperatura do ar na área HIS com telhados de cerâmica e com telhados verdes no dia 21/09 às 6h.



ENV1-act

©2011 Esri



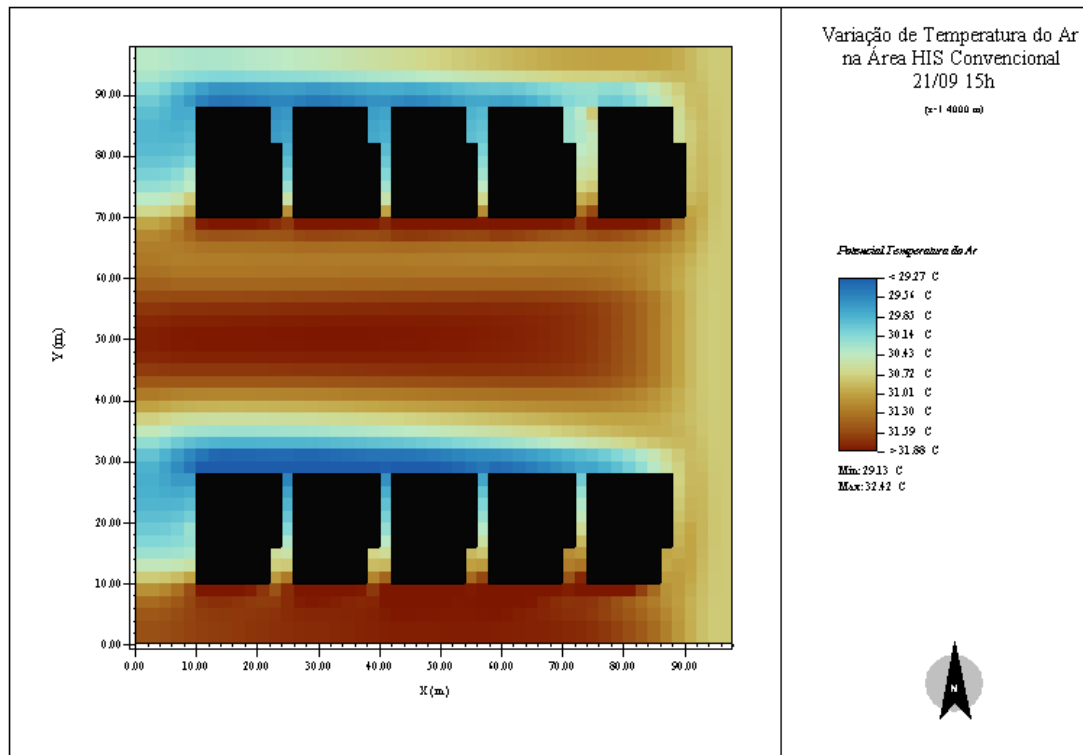
ENV1-act

©2011 Esri

Fonte: Autoral, 2024.

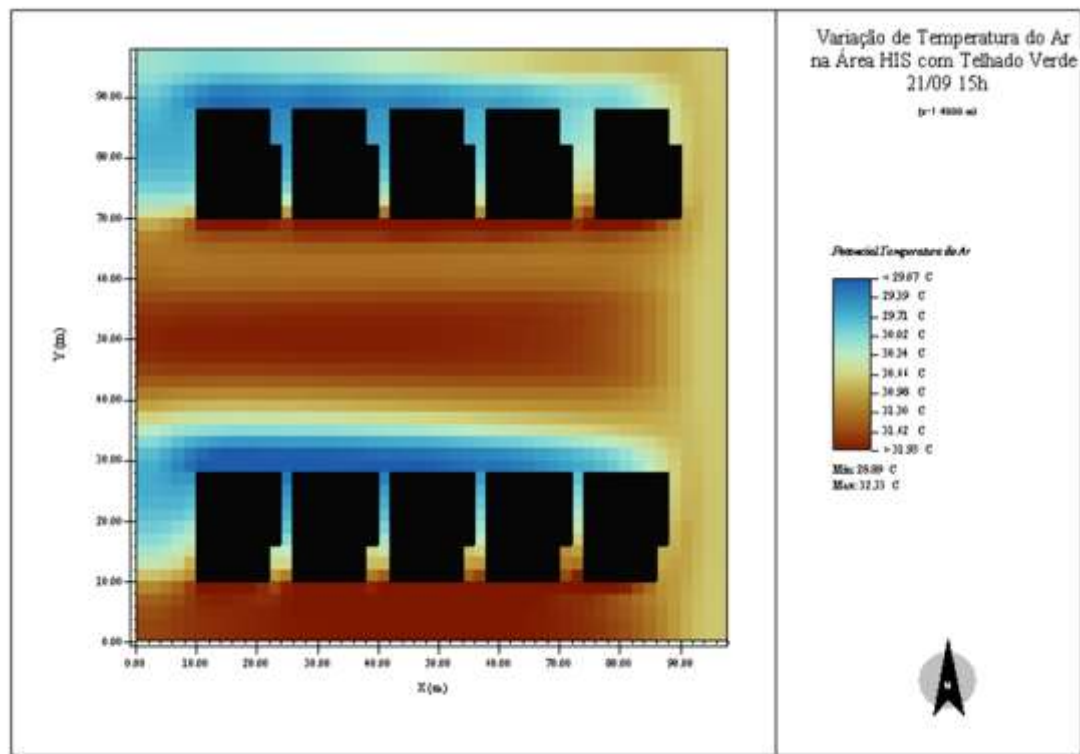
Observando-se as imagens, há pequenas diferenças de temperatura, sendo que a máxima e mínima registradas na área com telhados convencionais foram de 20,88°C e 22,44°C, respectivamente. E para a mesma área com a aplicação de telhados verdes, têm-se temperaturas máxima e mínima de 20,74°C e 22,29°C. Em escala microclimática, essas diferenças mesmo que decimais são significativas em um contexto de ilha de calor, além disto, o horário das 6h normalmente, as temperaturas são baixas em ambas as situações, devido à perda de calor ao longo da noite. A Figura 26 apresenta os dados das simulações para o dia 21/09 às 15h.

Figura 26: Variação de temperatura do ar na área HIS com telhados de cerâmica e com telhados verdes no dia 21/09 às 15h.



ENV1-ent

-Rq11 bar-



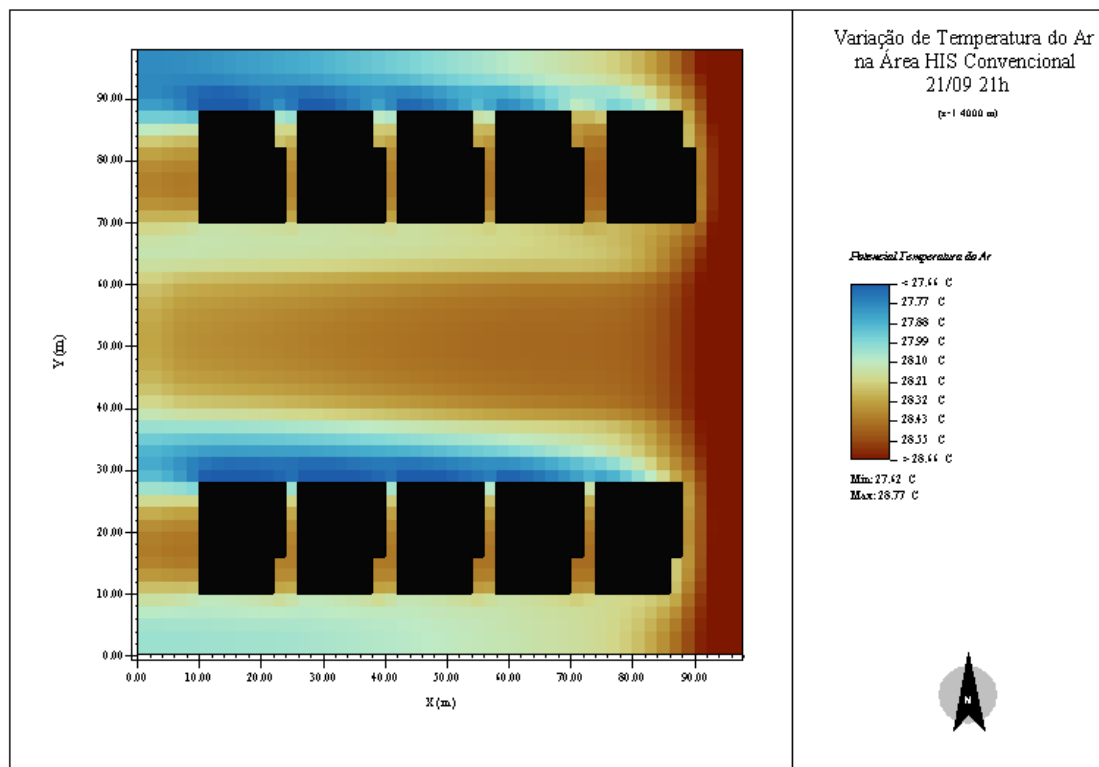
ENV1-ent

-Rq11 bar-

Fonte: Autoral, 2024.

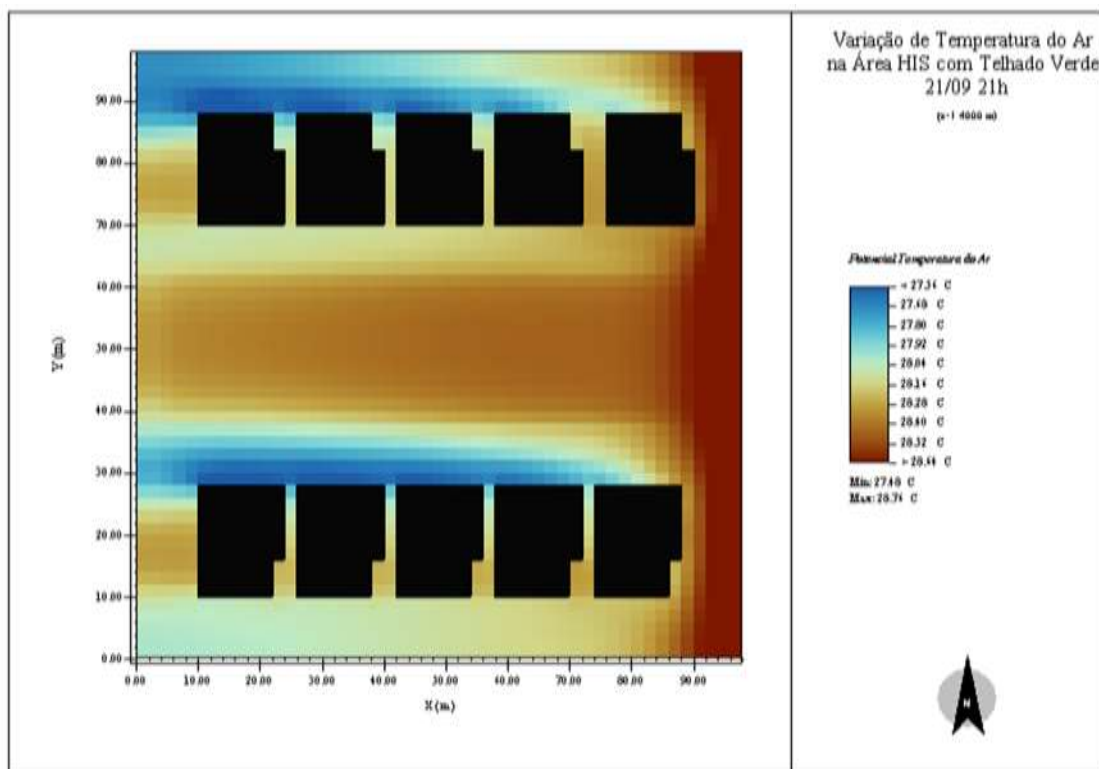
As imagens acima apresentam diferenças mais consideráveis nas temperaturas, sendo a máxima e mínima para a área com telhados convencionais foram de 29,13°C e 32,42°C, respectivamente. E para a área com telhados verdes as temperaturas máxima e mínima foram de 28,89°C e 32,33°C, respectivamente. Este é um horário que tem maior insolação, o que evidencia mais a influência dos telhados verdes em um microclima. A Figura 27 apresenta os dados das simulações para o dia 21/09 às 21h.

Figura 27: Variação de temperatura do ar na área HIS com telhados de cerâmica e com telhados verdes no dia 21/09 às 21h.



ENV1-act

©Bgt 1 600



ENV1-act

©Bgt 1 600

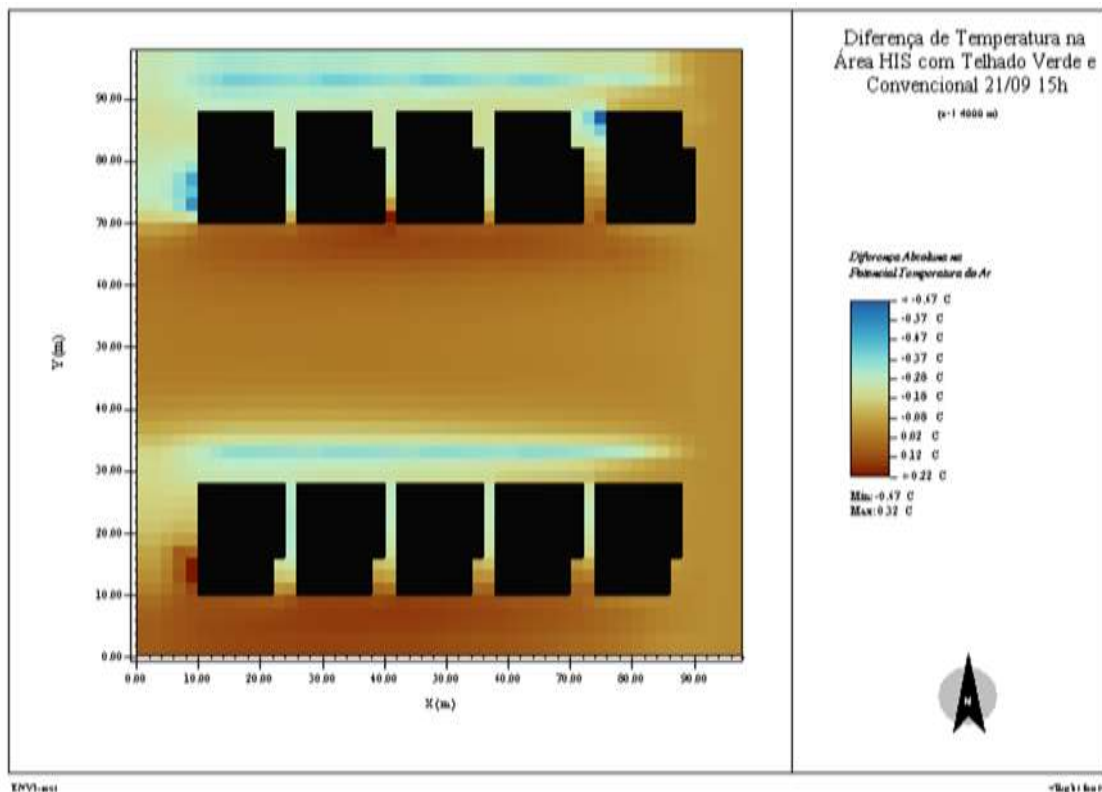
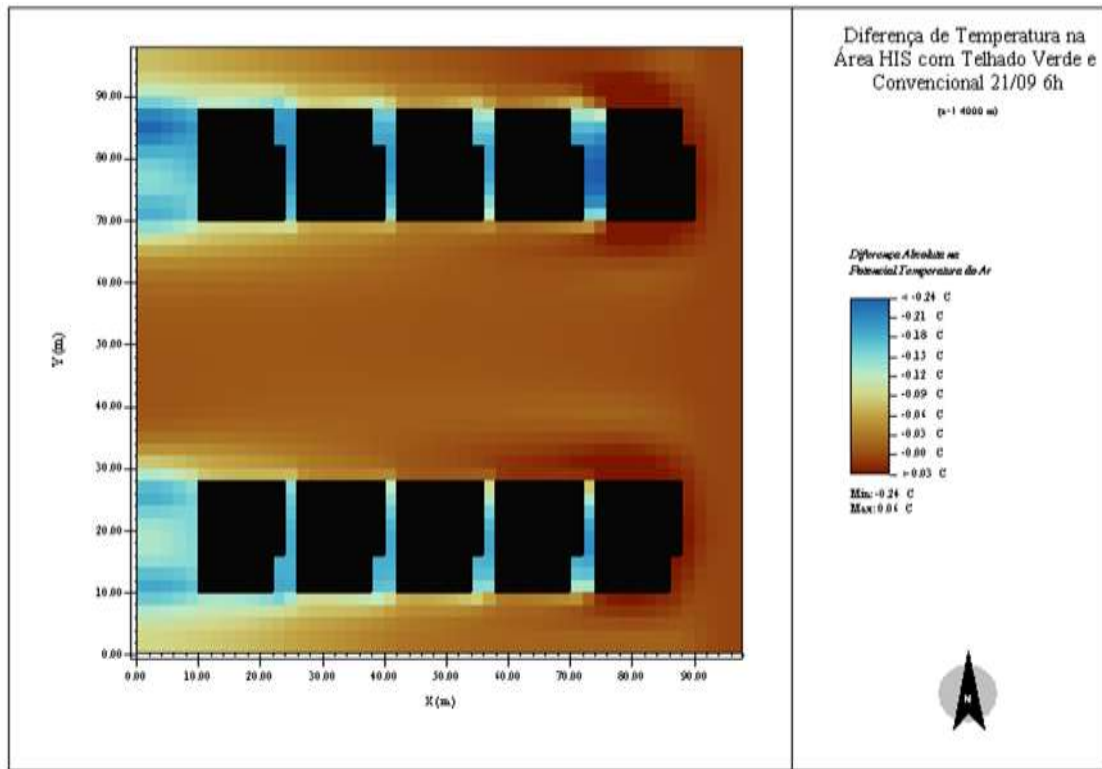
Fonte: Autoral, 2024.

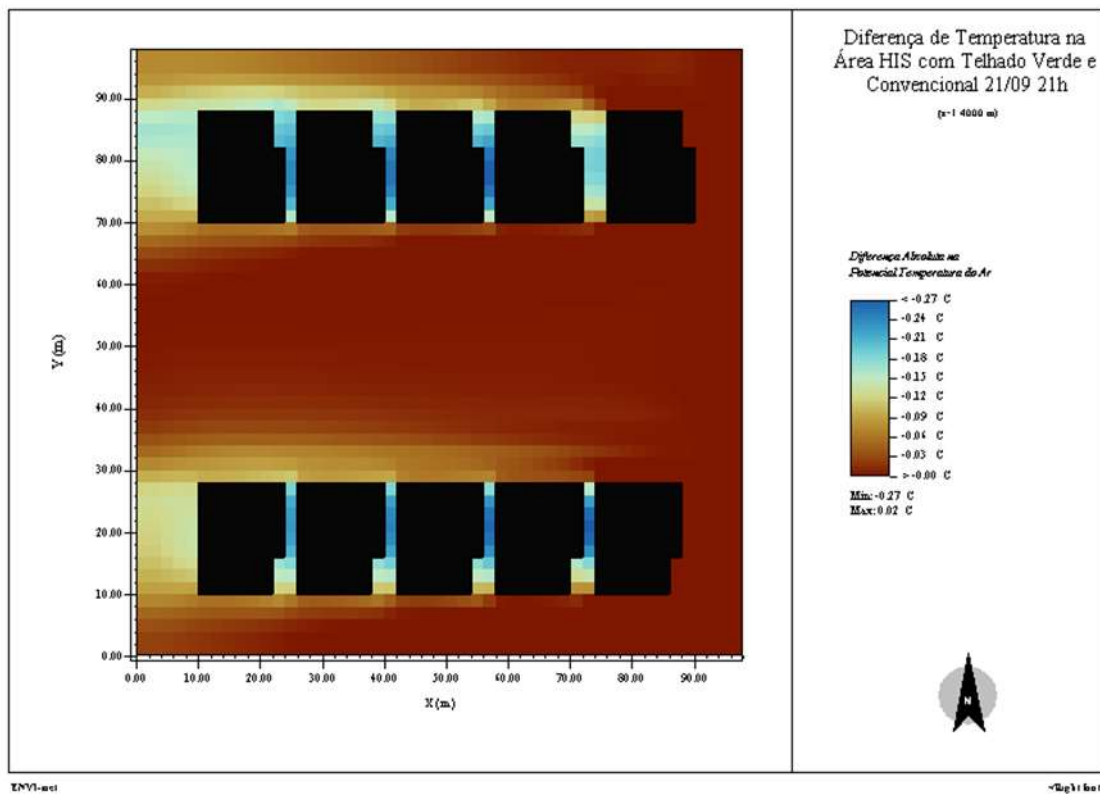
Neste horário, a diferença de temperatura volta a ser menor, sendo a máxima e mínima para telhados convencionais de 27,62°C e 28,77°C, e para telhados verdes de 27,48°C e 28,76°C, respectivamente.

5.4. Avaliação do potencial para mitigação de ICU

Para avaliar o potencial de mitigação de ilhas de calor urbano, para a área HIS escolhida, foi extraído o mapa de diferença de temperatura entre área HIS com telhados verdes e área HIS convencional. O resultado desta diferença, deve ser negativo para demonstrar a mitigação de ilhas de calor urbano, pois os valores da área com a aplicação de telhados verdes devem ser menores do que os encontrados em uma convencional. Quando estes resultados forem positivos, expressam a capacidade dos telhados verdes em manter a temperatura estável, sem quedas bruscas. A Figura 28 traz as imagens que apresentam estes resultados.

Figura 28: Diferenças de temperatura na área HIS com Telhados Verdes e Convencionais para o dia 21/09 nos horários de 6h, 15h e 21h.





Fonte: Autoral, 2024.

Nos três mapas há diferenças de temperatura negativas, próximas às construções com telhados verdes, sendo que para o horário de 6h, esta diferença é de 0,24°C; às 15h de 0,67°C; e às 21h de 0,27°C. Estes valores, mesmo que decimais, em escala de microclima podem ser significativos.

Como citado anteriormente, Bass e Koukidis (2016) realizaram simulações de três cenários de áreas em Toronto - CA através do *software Envi-Met*, para comparar a eficácia de telhados verdes com outras técnicas compensatórias envolvendo vegetação, como corredores verdes. O experimento foi feito utilizando-se três áreas suburbanas da cidade, sendo uma residencial, uma urbana, e uma industrial. Os resultados mostraram diminuição da temperatura do ar, e das ilhas de calor nos três cenários estudados; porém na área industrial com pouca presença de vegetação os efeitos dos telhados verdes foram mais significativos, com valores entre 1°C e 2°C de diferença. Nas outras duas áreas residenciais, a redução de temperatura foi menor, devido à presença de outras técnicas mitigatórias e espécies de vegetação, mas os telhados verdes ainda apresentaram efeitos evidentes no verão. De modo geral, os autores puderam verificar que os telhados verdes

sozinhos não conseguem mitigar ilhas de calor urbano da mesma forma que a combinação com outras estratégias utilizando-se vegetação. Mas podem ser utilizados para difundir os efeitos deste fenômeno climático em ambientes urbanos, sobretudo naqueles formados majoritariamente por HIS, em que as áreas verdes e públicas costumam ser escassas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após realizado o experimento e obtidos os resultados, é possível verificar a diferença de temperatura comparando a plataforma com solo exposto e a plataforma com grama amendoim. A redução de temperatura entre 5°C e 6°C na área subsuperficial, e entre 1°C e 2°C na área de base quando há a presença de grama.

Observou-se ainda, que a presença de vegetação contribuiu para manter o calor no período da noite entre 18h e 8h, quando a temperatura diminuiu; já no período do dia entre 8h e 18h a temperatura foi reduzida. Desta forma, o uso de telhados verdes pode contribuir tanto para climas e estações quentes, quanto para climas e estações frias.

As simulações realizadas no *software ENVI-met* revelaram que os telhados verdes podem contribuir na diminuição de ilhas de calor urbano, em escala microclimática. A técnica diminuiu em até 0,67°C, no horário de 15h. Este resultado pode se tornar ainda mais significativo se aplicado para uma escala ainda maior ou em ambientes em que a ação do vento possibilite um maior espalhamento da umidade do ar provocada pela evapotranspiração das plantas dos telhados verdes.

. Entre os estudos que poderiam ser realizados a partir de tais constatações, há o desenvolvimento de análises referentes ao conforto térmico humano provocado no interior e no exterior de habitações. Outra questão que merece atenção de pesquisadores se refere aos efeitos microclimáticos provocados pela ação da umidade dos telhados verdes em determinadas condições climáticas. É provável que o aumento da evapotranspiração influencie significativamente as condições microclimáticas, sobretudo em regiões com clima quente e seco. Entretanto, é válido ressaltar que estes estudos devem considerar as espécies vegetais mais adequadas às condições climáticas, as condições de manutenção e irrigação e as características construtivas predominantes da região a ser analisada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDRI, E. & JONES, P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. **Building and Environment**. vol.43, p.480-493. 2006.

ARABI, R. *et al.* Mitigating Urban Heat Island Through Green Roofs. **Current World Environment**. vol.10, abril 2015.

ARRUDA, A. M.; MASIERO, E. Análise de índices de conforto térmico através dos softwares Rayman e ENVI-met em áreas industriais. *In: III SIMPÓSIO NACIONAL DE GESTÃO E ENGENHARIA URBANA: SINGEURB, 2021, Maceió. Anais...* Porto Alegre: ANTAC, 2021. p. 124-137. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/singeurb/issue/view/14>

BASS, B. e KOUKIDIS, E. **Reducing Urban Heat Islands: Simulating Aggregate Green Roof Performance**. 10th Cities Alive, Annual Green Roof & Wall Conference, 2012. Uploaded in August, 2016.

BATTEMARCO, B. P. *et al.* Urbanização sem controle X Mudanças climáticas. *In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS: SBRH, 2017, Florianópolis, SC: ABRH, 2017.*

BENVENUTI, S. Wildflower green roofs for urban landscaping, ecological sustainability and biodiversity. **Landscape and Urban Planning**. 2014.

CARDOSO, G. T.; & VECCHIA, F. Comparison of thermal performance between test cells with different coverage systems for experimental typical day of heat in Brazilian Southeastern. *Frontiers of Architectural Research*. 2014.

CARVALHO, P. E. R.; & GAIAD, S. Espécies arbóreas brasileiras. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/especies-arboreas-brasileiras/fabaceae>>. Acesso em: Julho de 2023.

COSTA, M. J. G. Simulação microclimática com *ENVI-met* para o bairro Rainha Santa Isabel em Bragança. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2020.

CUNHA, T. **Oito edifícios com os mais encantadores jardins verticais**. VEJA. 2017. Disponível em: < <https://veja.abril.com.br/coluna/modo-aviao/oito-edificios-com-os-mais-encantadores-jardins-verticais>>. Acesso em: Junho de 2023.

DWIVEDI, A. & MOHAN, B. K. Impacto f green roof on micro climate to reduce Urban Heat Island. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**. 2018.

EKSI, M.; ROWE, D. B.; WICHMAN, I. S.; & ANDRESEN, J. A. Effect of substrate depth, vegetation type, and season on green roof thermal Properties. **Energy and Buildings**. vol. 145, p. 174-187, 2017.

EMBRAPA. 2024. Estação da Embrapa Pecuária Sudeste [Dados de serviço]. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: < <http://www.cppse.embrapa.br/meteorologia/index.php?pg=inicio>>. Acesso em: jan., 2024.

EMBRAPA. s.d. **Clima**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: < <https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>>. Acesso em: nov. 2023.

FÁVERO, A. P., & VALLS, J. F.M. *Arachis repens*: Grama- amendoim. In: Ministério do Meio Ambiente. Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região nordeste. Biodiversidade 51. Capítulo 5, p.1085-1888. 2018.

FERNANDES, M.M. A. Análise de um protótipo de telhado verde extensivo no sistema inclinado. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019.

FILHO, J. R. B. A importância do planejamento urbano no crescimento na cidade. Associação dos Arquitetos, Engenheiros e Técnicos de Cotia (AETEC). s.d. Disponível em: < <https://aetec.org.br/a-importancia-do-planejamento-urbano-no-crescimento-na-cidade/>>. Acesso em: jan., 2024.

FIORETTI, R.; PALLA, A.; LANZA, L.G.; & PRINCIPI, P. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. **Building and Environment**. vol.45, p.1890-1904. 2010.

GALUSIC, Bojana. **Ilhas de calor urbanas em São Carlos, SP e os impactos da permeabilidade dos revestimentos urbanos horizontais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. doi:10.11606/D.102.2019.tde-09092019-103920. Acesso em: 2024-03-07.

GALVAN, C. T. G.; FLÁVIO, L. C. Estudo Bibliográfico sobre o processo de industrialização, a urbanização e o desenvolvimento da habitação no Brasil. **E-Revista Unioeste**. 2007. Disponível em: < <https://e-revista.unioeste.br/index.php/fazciencia/article/view/7497>>. Acesso em: jan.,2024.

GIACOMETTI, K.; DOMINSHECK, D. L. Ações antrópicas e impactos ambientais: industrialização e globalização. **Caderno Intersaberes**. v. 7. p. 140-156. 2018.

GNECCO I., PALLA A., LANZA L. G., LA BARBERA P. A green roof experimental site in the Mediterranean climate: the storm water quality issue. *Water Sci Technol*. 2013.

GURGEL, R. G. A. Principais espécies e variedades de grama. *In: I SIGRA – Simpósio sobre Gramados*. Unesp – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, SP, 2003.

HEAVISIDE, C. Urban Heat Island and their Associated Impacts on Health. 2020 *In: Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. Oxford University Press: Oxford, UK. URI: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10106446>.

HELBLING, M.; MEIERRIEKS, D. Global warming and urbanization. **Journal of Population Economics**. vol.36, p.1187-1223. 2022.

HENZ, S. C.; OLIVEIRA, T. D.; BERTOLLO, F. H. Planejamento urbano: Conceitos, reflexões e uma breve análise plano diretor do município de Santo Augusto – RS. *In: XXIV SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*. 2016.

HOSSAIN, M.A. *et. al.* Perception and barriers to implementation of intensive and extensive green roofs in Dhaka, Bangladesh. **Buildings**. vol.9, n.79, april, 2019.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo de São Carlos de 2010**. IBGE, 2023. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-carlos/panorama>>. Acesso em: jan. 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo de São Carlos de 2022**. IBGE, 2023. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-carlos/panorama>>. Acesso em: jan. 2024.

IPAM Amazônia – Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. Como os países do Anexo I pretendem atingir suas metas de redução de emissões estabelecidas pelo Protocolo de Quioto? s.d. Disponível em: < <https://ipam.org.br/entenda/como-os-paises-do-anexo-i-pretendem-atingir-as-suas-metas-de-reducao-de-emissoes-estabelecidas-pelo-protocolo-de-quioto/> >. Acesso em: nov., 2023.

JAMEI, E.; CHAU, H. W.; SEYEDMAHMOUDIAN, M; & STOJCEVSKI, A. Review on the cooling potential of green roofs in different climates. **Science of The Total Environment**. vol.791. 2021.

JIN, C. *et. al.* **Effects of green roofs' variations on the regional thermal environment using measurements and simulations in Chongqing, China**. Urban Forestry and Urban Greening. vol. 29, p. 223-237. 2018.

JOBIM, A. L. Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo da água pluvial. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

KARACHALIOU, P.; SANTAMOURIS, M.; & PANGALOU, H. Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on na office Building in Athens. **Energy and Buildings**. 2015.

KOWALSKI, Luiz Fernando. **Influência do albedo de pavimentos no campo térmico de cânions urbanos: estudo de modelo em escala reduzida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

KRÜGER, E. L.; LANGE, S. C.; FERNANDES, L.; ROSSI, F. Avaliação do potencial de resfriamento de um sistema teto-reservatório para condições subtropicais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 107-125, jul./set. 2016. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

LUNDHOLM, J. T.; & WILLIAMS, N. S. G. Effects os Vegetation on Green Roof Ecosystem Services. **Green Roof Ecosystems**. Ecological Studies 223. R. Sutton, 2015.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. s.d. Acordo de Paris. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>>. Acesso em: nov., 2023.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. s.d. Protocolo de Quioto. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>>. Acesso em: nov., 2023.

MADRE, F. *et. al.* Green roofs as habitats for wild plant species in urban landscapes: First insights from a large-scale sampling. **Landscape and Urban Planning**. Vol.122, p.100-107. 2014.

MUTANI, G. E TODESCHI, V. The Effects of Green Roofs on Outdoor Thermal Comfort, Urban Heat Island Mitigation and Energy Savings. **Atmosphere**. January 2020.

NANAYAKKARA, S. *et. al.* Analysis of urban heat island effect, heat stress and public health in Colombo, Sri Lanka and Shenzhen, China. **Atmosphere**. n. 14. May 2023.

NIACHOU, A. *et. al.* Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. **Energy and Buildings**. vol.33, p.719-729. 2001.

NOBRE, C. A.; REID, J.; VEIGA, A. P. S. **Fundamentos Científicos das Mudanças Climáticas**. 1. ed. São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE, 2012. 44 p.

OKE, T. R.; e MAXWELL, G. B. Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. **Atmospheric Environment**. vol. 9, p. 191-200. 1975.

OLIVEIRA, L. L. **Cidade: História e Desafios**. Rio de Janeiro: Ed. Fundação Getúlio Vargas, 2002. 295 p.

PERUSSI, R. **Comportamento Térmico de um Sistema de Cobertura Verde: Um Experimento Utilizando Plataformas de Teste**. Dissertação de Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

PIVETTA, M. Ilha de calor na Amazônia. **Revista Pesquisa Fapesp**. ed. 200. 2012. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/ilha-de-calor-na-amazonia/>>. Acesso em: jan. 2024.

PIVETTA, M. Efeito das ilhas de calor urbano esquentam até cidades de médio e pequeno porte. **Revista Pesquisa Fapesp**. ed. 331. 2023. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/efeito-das-ilhas-de-calor-urbano-esquentam-ate-cidades-de-medio-e-pequeno-porte/>>. Acesso em: jan. 2024.

RAJAK, M. K.; RAVISH, K.; BISWAS, R. Vertical Greenery Systems: a comprehensive review. **International Center for Research and Resources Development (ICRRD Journal)**. v. 3. p. 117-135. 2022.

RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S.; & SALEMI, T. The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. **Urban Forestry & Urban Greening**. vol.15, p.89-102. 2015.

RIBEIRO, W. C. Impactos das mudanças climáticas em cidades no Brasil. **Parcerias Estratégicas**, Brasília, DF. n. 27, p. 297- 321. 2008.

SAADATIAN, O. *et. al.* A review of energy aspects of green roofs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. vol.23, p.155-168. 2013.

SANTOS, S. M. *et. al.* **Desempenho térmico de telhados verdes no semiárido brasileiro**. In: SILUSBA, 13, 2017, Porto-Portugal.

SÃO CARLOS. Prefeitura Municipal. **História de São Carlos**. São Carlos - SP, 2014 Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/historia-da-cidade/115269-historia-de-sao-carlos.html>>. Acesso em: nov. 2023.

SCROCCARO, M. P.; LIMA, C. A.; TAVARES, S. F. Coberturas verdes convencionais e a mitigação das ilhas de calor urbano. **Mix Sustentável**. Florianópolis. v. 4. n. 3. p. 109-121. out./mar. 2018.

SENADO (Federal). Protocolo de Kyoto. s.d. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/protocolo-de-kyoto>>. Acesso em: nov., 2023

SCOVAZZI, T. Do protocolo de Kyoto ao Acordo de Paris. **Revista Faculdade Direito**. UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. n. 78. p. 469-476, jan./jun. 2021.

SILVA, C. F. *et. al.* Simulação microclimática com o *Envi-met* 5.0: Guia Metodológico. Brasília, DF. Editora Universidade de Brasília. 2022.

SILVA, M. S. Vegetação e o microclima urbano em área de ocupação consolidada: aplicação do modelo ENVI-met ao Conjunto Confisco em Belo Horizonte, MG.

Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

SPOSITO, M. E. B. **Capitalismo e Urbanização**. 1. ed. Contexto. 1988. 97 p. Disponível em:

<https://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/1415/capitalismo_e_urbanizacao___maria_encarnacao_beltrao_sposito__pdf_rev.pdf>. Acesso em: jan. 2024.

TAM, V. W. Y. *et al.* Applications of extensive greef-roof systems in contributing to sustainable development in densely populated cities: a Hong Kong study. **Australian Journal of Construction Economics and Building**. vol.11, p. 15-25. 2011.

UNIFAP – Universidade Federal do Amapá. Memorial de Paisagismo. 2020. Disponível em: < <https://www2.unifap.br/arquitetura/files/2020/07/Silva-2017-MEMORIAL-DE-PAISAGISMO.pdf>>. Acesso em: jan., 2024.

UNITED NATIONS. *The Kyoto Protocol. Climate Changes*. s.d. Disponível em: < <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol/mechanisms/emissions-trading>>. Acesso em: nov. 2023.

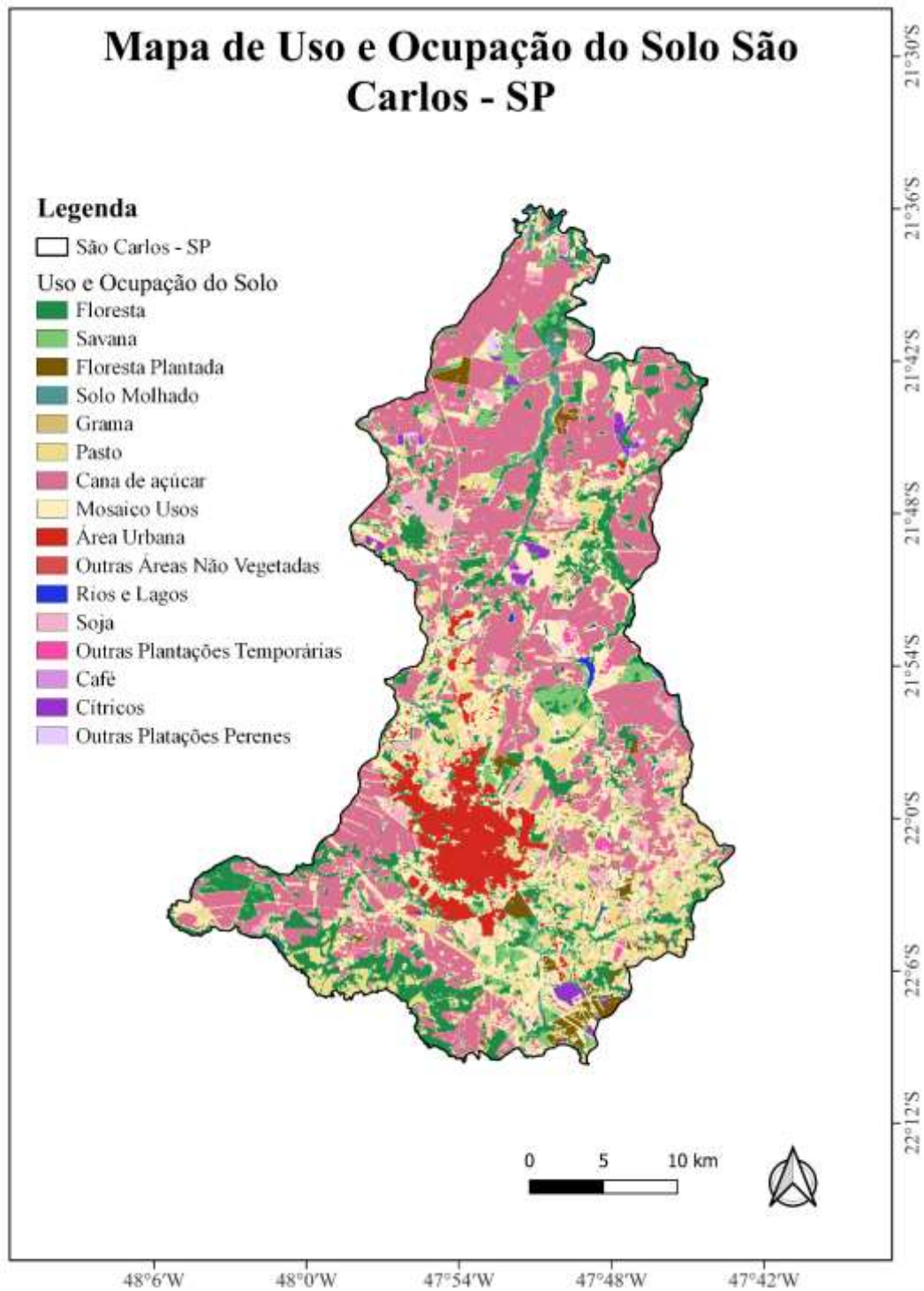
USP. Universidade de São Paulo. **A cidade de São Carlos**. s.d. Disponível em: <<http://saocarlos.usp.br/a-cidade-de-sao-carlos/>>. Acesso em: nov. 2023.

WAHBA, S. M. *et al.* Effectiveness of Green Roofs and Freen Walls on Energy Consumption and Indoor Comfort in Arid Climates. **Civil Engineerind Jpurnal**. vol. 4, n. 10, october 2018.

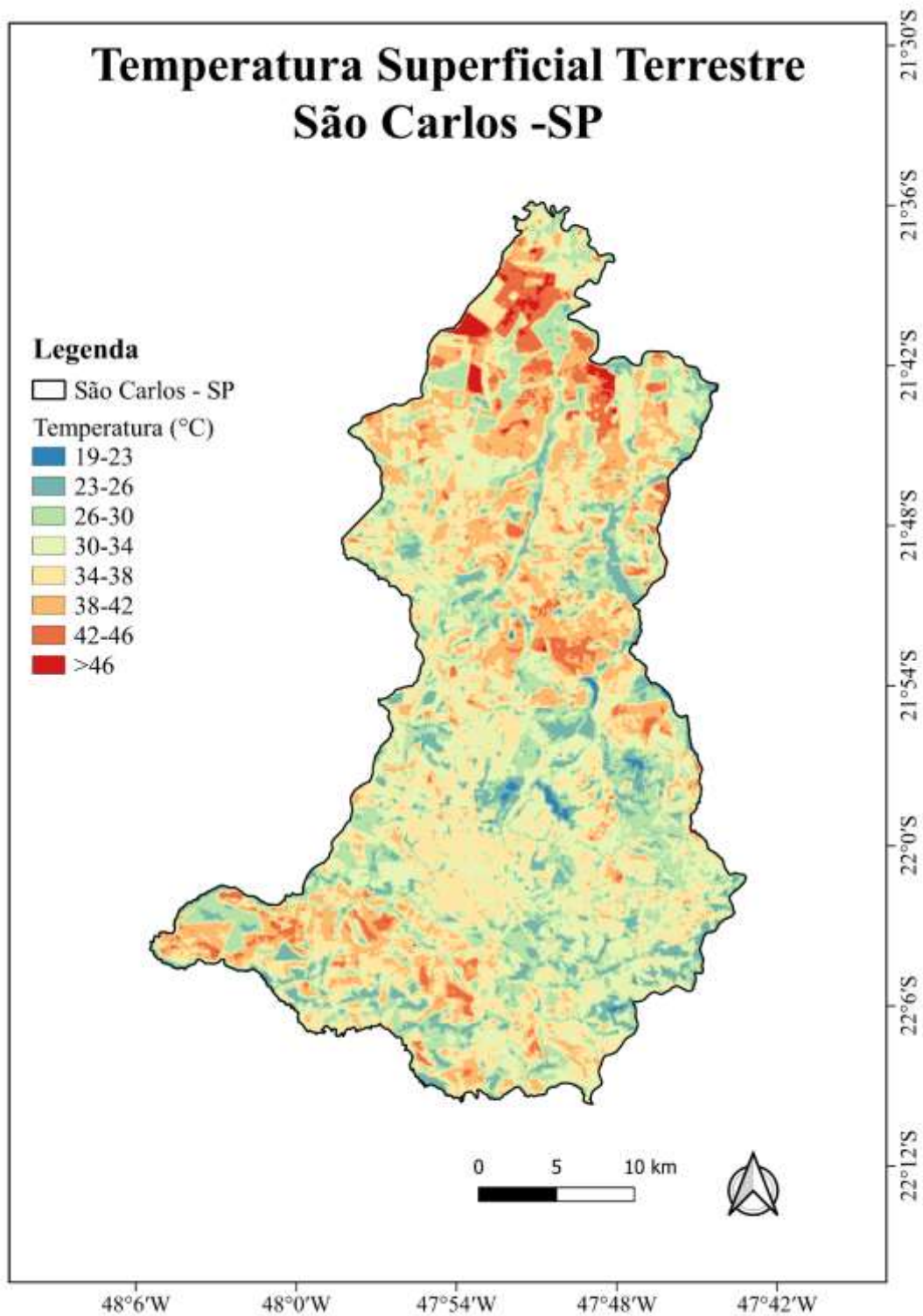
ZHANG, X. *et al.* Barriers to implement extensive green roof systems: A Hong Kong study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. vol.16, p.314-319, 2011.

ZUO, J. *et al.* Quantitative valuation of green roffs' cooling effects under different urban spatial forms in high-density urban áreas. **Building and Environment**. vol.222. 2022.

ANEXO I



ANEXO II



ANEXO III

