



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Paula França Barcelos

**Fachadas verdes como estratégia de
mitigação das alterações no microclima
urbano**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Paula França Barcelos

**Fachadas verdes como estratégia de
mitigação das alterações no microclima
urbano**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Urbana

Trabalho realizado sob a orientação de:
**Professora Doutora Júlia Maria Brandão Barbosa
Lourenço (*in memoriam*)**
Professor Doutor Rui António Rodrigues Ramos

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



**Atribuição
CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus e a Nossa Senhora do Monte Sameiro, que me guiaram e abençoaram até aqui.

Aos meus pais, Janice e José Geraldo, por me apoiarem incondicionalmente em todos os momentos da minha vida e por acreditarem que sou capaz.

À minha avó Maria da Conceição, a "Suinha", fonte inesgotável de amor, incentivo e grande exemplo em minha vida, que, com tanto carinho, sendo professora de Língua Portuguesa, foi responsável pela correção deste trabalho segundo as Normas Ortográficas do Brasil.

À minha avó Lia, pelas orações diárias e torcida constante em todos os momentos.

A Braga, cidade da minha bisavó Arminda, que me acolheu tão bem, com todos seus encantos e me fez sentir em casa.

À Professora Doutora Júlia Lourenço (in memoriam), pelos ensinamentos, disponibilidade e acolhimento desde o primeiro contato. Estará sempre marcada em minha memória.

Ao Professor Doutor Rui Ramos, pela generosidade e competência em assumir e finalizar este trabalho, sem o qual não seria possível alcançar tal intento.

À Universidade do Minho, ao Corpo Docente e à equipe técnica que tanto contribuíram nessa minha caminhada.

À todas as pessoas que, direta ou indiretamente, fizeram parte deste trabalho.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

NOTA

Esta dissertação foi redigida em conformidade com as Normas Ortográficas do português do Brasil. Entretanto, por ser realizada em Portugal, poderá conter a adaptação da ortografia ao português de Portugal.

RESUMO

Atualmente, grande parte da população mundial reside em meio urbano e o número da população urbana tende a crescer. Com esta expansão, especialmente após a Revolução Industrial, houve modificações expressivas no espaço urbano; áreas cobertas por recursos naturais deram lugar ao asfalto e ao concreto (de Jesus *et al.*, 2017). Desta forma, o processo de urbanização vem suprimindo, cada vez mais, espaços destinados à vegetação, o que provoca alterações ambientais como o aumento de temperatura e a redução da humidade relativa do ar. Vários problemas ambientais relativos aos centros urbanos, como as ilhas de calor e emissões de gases de efeito estufa, podem ser atribuídos à densa urbanização (Besir e Cuce, 2018).

A inserção de vegetação no espaço urbano por meio de paredes verdes é uma possibilidade de reinserir infraestrutura verde em áreas consolidadas e que dificilmente teriam capacidade de receber arborização urbana.

De acordo com estudo elaborado por Besir e Cuce (2018), pesquisas demonstram que a temperatura ambiente pode ser reduzida pelo aumento da área verde, porém o espaço horizontal é, na maioria dos centros históricos das urbes, considerado insuficiente para a inserção de vegetação. Por esse motivo, o conceito de fachadas verdes é um fator chave para ampliar a área verde em ambiente urbano, aplicando-se às paredes exteriores de edifícios.

Neste contexto, a presente investigação procurou analisar a adoção de paredes verdes como estratégia de planeamento urbano para a mitigação das alterações climáticas, nomeadamente o fenómeno das ilhas de calor. Os resultados mostram que o acréscimo de vegetação no envelope de edifícios ameniza o desconforto e estresse fisiológico a nível de pedestres. Esta pesquisa demonstra que a implantação de infraestruturas verdes verticais, como as paredes verdes, mostram-se uma opção coerente como recurso para reduzir o calor extremo urbano, sem prejuízo ao tecido urbano já consolidado.

Palavras-chave: Conforto térmico, Fachadas verdes, Microclima urbano, Simulação computacional, Sustentabilidade Urbana.

ABSTRACT

Nowadays, a large part of the world population reside in urban areas and the number of urban populations tends to increase. With this expansion, especially after the Industrial Revolution, there were significant changes in the urban space; areas covered by natural resources gave way to asphalt and concrete (de Jesus et al., 2017). In this way, the urbanization process is increasingly suppressing spaces for vegetation, which causes environmental changes such as an increase in temperature and a reduction in the relative humidity of the air. Several environmental problems related to urban centers, such as the heat islands and greenhouse gas emissions, can be attributed to the dense urbanization (Besir and Cuce 2018).

The insertion of vegetation in the urban space through green walls is a possibility to reinsert green infrastructure in consolidated areas that would hardly be able to receive urban afforestation.

According to a study by Besir and Cuce (2018), research shows that the environmental temperature can be reduced by increasing the green area, but the horizontal space is, in most historical centers of cities, considered insufficient for the insertion of vegetation. For this reason, the concept of green facades is a key factor to expand the green area in an urban environment, applying to the exterior walls of buildings.

In this context, the present investigation sought to analyze the adoption of green walls as an urban planning strategy for the mitigation of climate change, namely the phenomenon of heat islands. The results show that the addition of vegetation in the building envelope alleviates the discomfort and physiological stress at the pedestrian level. This research demonstrates that the implementation of vertical green infrastructures, such as green walls, are a coherent option as a resource to reduce extreme urban heat, without harming the already consolidated urban fabric.

Keywords: Thermal comfort, Green facades, Urban microclimate, Computer simulation, Urban sustainability.

ÍNDICE

Direitos de autor e condições de utilização do trabalho por terceiros	i
Agradecimentos.....	ii
Declaração de integridade.....	iv
Resumo	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Índice de siglas	ix
Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas.	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	2
2 REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 Jardins verticais e a evolução das cidades	4
2.2 Caracterização dos jardins verticais	9
2.2.1 Fachadas verdes	10
2.2.2 Paredes vivas.....	11
2.3 O papel da vegetação no microclima urbano	13
2.3.1 Arquitetura Biofílica Urbana: um futuro resiliente	14
2.3.2 O impacto das fachadas verdes no edificado.....	15
2.3.3 A influência das fachadas verdes no conforto térmico urbano	16
2.3.4 Ilhas de calor urbano	17
2.4 Aplicação de modelos	20
2.4.1 A Modelação computacional em espaço Urbano	20
2.4.2 Os modelos matemáticos de simulação do impacto da vegetação no microclima urbano	21

2.5 Síntese	25
3 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO	26
3.1 Introdução	26
3.2 Etapas de investigação	26
3.3 Estudo de Caso - Modelação	27
3.4 Limitações da pesquisa.....	30
4 ESTUDO DE CASO	32
4.1 Seleção do estudo de caso.....	32
4.2 O clima Urbano de Belo Horizonte.....	35
4.2.1 Delimitação da área de estudo: Definição dos pontos críticos para análise de variáveis microclimáticas.	36
4.2.2 Coleta de dados de variáveis climáticas para modelação	39
4.3 Etapa de modelação: Simulação computacional do Microclima	40
4.3.1 Área simulada.....	41
4.4 Síntese	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1 Extração e análise de dados	46
5.2 Validação dos dados	47
5.3 Modelação.....	47
5.4 Simulações.....	49
5.4.1 Simulação do Cenário Real	49
5.4.2 Simulação do Cenário com adição de fachadas verdes	50
5.5 Síntese	52
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

INDICE DE SIGLAS

DSGF - sigla em inglês para Double Skin Greenery Façade

EHE - Eventos de calor extremo

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

MOCI - sigla em inglês para Mediterranean Out-door Comfort Index

MRT - Temperatura radiante média

OMM - Organização Meteorológica Mundial

PET - sigla em inglês para Physiological Equivalent Temperature

PVC - Policloreto de Vinila

RH - Humidade relativa

T - Temperatura do ar

UGI - sigla em inglês para Urban Green Infrastructure

UHI – sigla em inglês para Urban Heat Island

V - velocidade do ar

VGS - Sistema Vertical de Vegetação

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Os Jardins da Babilónia são o exemplo mais relevante onde se usaram os Jardins verticais.....	5
Figura 2 - Exemplo de "Turfhouses"	6
Figura 3 - Parede viva concebida por Patrick Blanc para uma parede exterior do Museu Caixa Fórum em Madrid.....	8
Figura 4 - Jardins verticais.....	10
Figura 5 - Sistemas extensivos em fachadas verdes.....	11
Figura 6 - a) Exemplo de instalação de parede viva; b) Corte explicativo de uma Parede Viva tipo Muro Cortina Fonte: a) de Jesus <i>et al.</i> 2017; b) Sousa, 2012	12
Figura 7 - Sistemas intensivos em paredes vivas.....	13
Figura 8 - Ilhas de calor: a pouca vegetação faz com que as cidades apresentem temperatura mais elevada do que nas áreas rurais circundantes.....	18
Figura 9 - Fluxo solar difuso calculado pelo software SOLENE.....	21
Figura 10 Modelo Tridimensional elaborado em SketchUP Pro	22
Figura 11 - Aplicação do plug-in STEVE em software SketchUp em estudo de comportamento térmico urbano	23
Figura 12 – Simulação da variação de Temperatura média radiante no software SOLWEIG24	
Figura 13 - Simulação de fachadas verdes no envelope de edifício em Hong Kong, utilizando software Envi_MET.....	25
Figura 14 - Barra de tarefas ENVI-met 4.4.5.....	27
Figura 15 - Ambiente de modelagem "SPACES" do ENVI-met 4.4.5	29
Figura 16 - Barra de tarefas do ENVI-met 4.4.5.....	30
Figura 17 - Barra de tarefas ENVI-met 4.4.5.....	30
Figura 18 - Avenida Afonso Pena e Praça Sete de Setembro em 1948 e 2013	32
Figura 19- Localização do Município de Belo Horizonte no Estado de Minas Gerais – Brasil	33

Figura 20 – Representação esquemática da Região Metropolitana de Belo Horizonte	34
Figura 21 - Evolução da mancha urbana de Belo Horizonte, período 1918 a 1995.....	36
Figura 22 - Mapa climático analítico de Belo Horizonte.	37
Figura 23 - Praça Sete de Setembro.	38
Figura 24- Visão do céu na Praça Sete de Setembro.....	39
Figura 25 - Imagem aérea da área a ser utilizada em simulação	41
Figura 26 - Edifícios circundantes a Praça Sete de Setembro selecionados para a simulação	42
Figura 27 - Edifício UAI em destaque a ser modelado com fachadas verdes	44
Figura 28 - Edifício UAI ao centro da imagem	45
Figura 29 - Modelagem do cenário de estudo	48
Figura 30- Imagem da área utilizada para simulação.....	49
Figura 31 - Modelação de Cenário Real.....	50
Figura 32 - Praça Sete de Setembro com Edifício UAI ao fundo	51
Figura 33 - Modelação do Cenário com Fachadas Verdes	52

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Grau de rotação para modelação	28
Tabela 2 - Dados meteorológicos obtidos no site do INMET para simulação	40
Tabela 3 - Medidas de edifícios existentes para a modelação	42
Tabela 4 - Configurações utilizadas para a modelação	43
Tabela 5 - Intervalos do índice térmico PET	47

1 INTRODUÇÃO

O Planeamento Urbano é um dos instrumentos para estabelecer parâmetros de mitigação às alterações climáticas nas cidades, especialmente no que se refere à gestão mais adequada do uso do solo disponível. No contexto das soluções de desenho urbano, a infraestrutura verde é considerada uma mais-valia no que se refere a mitigação às alterações climáticas, em especial ao aquecimento e ao surgimento de ilhas de calor.

Os espaços verdes urbanos são cada dia mais escassos em muitas cidades face ao crescimento populacional e à expansão urbana; no entanto deveriam ser preservados pela sua extrema importância na criação de um ambiente urbano mais adaptado às necessidades humanas. Por isso, os jardins verticais surgem atualmente como uma solução para aumentar a área verde urbana, revestindo de forma verde e natural as fachadas dos edifícios. Originalmente, estas modalidades surgiram ao serem aplicadas plantas trepadeiras diretamente sob as fachadas de edifícios ou com suporte de apoio ao crescimento das espécies vegetais, sendo também possível atribuir este tipo de vegetação nas coberturas dos edifícios (Francis & Lorimer, 2011).

1.1 Motivação

A mudança climática é um dos desafios mais complexos do século XXI. Uma das principais preocupações em relação às previsões do clima no futuro refere-se à intensificação e aumento da taxa de eventos climáticos extremos, tais como tempestades, enchentes, ondas de calor, secas. No que se refere à temperatura, as cidades são mais altamente vulneráveis a essa ameaça, em especial devido aos fenômenos de ilhas de calor urbano e zonas de efeito estufa. Esta questão é bastante crítica pois afeta diretamente a saúde das pessoas e condiciona a circulação pedonal nos espaços urbanos em que as ilhas de calor surgem. Também, o efeito das ilhas de calor nos edifícios é um fenômeno relevante, pois obriga a aumentar os gastos energéticos com o arrefecimento dos espaços interiores desses edifícios.

Em 2016, no Brasil, aproximadamente 85% (oitenta e cinco por cento) da população vivia em áreas urbanas e estima-se que, atualmente, em 2020, 90% (noventa por cento) dos

brasileiros estejam vivendo em centros urbanos, ou seja, é notória a tendência de crescimento populacional nas cidades (Análise de Vulnerabilidade Às Mudanças Climáticas Do Município de Belo Horizonte - Resumo Para Tomadores de Decisão, 2016).

De forma generalizada, a maioria das cidades brasileiras apresentam uma lacuna em estudos e planos diretores que englobem a temática do clima urbano e seus impactos diretos na qualidade de vida de sua população. O atraso na implementação de infraestrutura adequada para suportar a aceleração do crescimento urbano e os efeitos das mudanças no clima é uma realidade. Neste sentido, a análise da vulnerabilidade de uma cidade às mudanças climáticas torna-se fundamental para a indicação de medidas de adaptação em escalas apropriadas. Por isto, estudar e compreender os fenômenos associados a esta realidade e buscar soluções adaptáveis à realidade das cidades é uma questão de extrema importância.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar a influência da utilização de fachadas verdes em edifícios inseridos no meio urbano como estratégia do planejamento urbano para a mitigação das alterações ambientais. Assim, para atender ao propósito do estudo, formalizam-se os seguintes objetivos específicos:

- i) Compreender e indicar como as estruturas vegetais podem ser incorporadas ao planejamento urbano da cidade;
- ii) Demonstrar como as fachadas verdes podem contribuir para mitigar ilhas de calor;

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos. O primeiro capítulo introduz a temática da investigação, apresenta a motivação para a realização da mesma, identifica a questão de investigação, os objectivos gerais e específicos.

O segundo capítulo apresenta o estado da arte, onde são inicialmente abordados os conceitos e problemáticas relacionados a jardins verticais ao longo da evolução das cidades. O capítulo direciona-se posteriormente para a classificação dos jardins verticais em ambientes construídos, nomeadamente paredes vivas e fachadas verdes, e apresenta tópicos necessários para um melhor e maior entendimento da temática.

No terceiro capítulo analisam-se os principais modelos computacionais utilizados atualmente para o estudo do comportamento microclimático urbano. Apresenta-se, também, a caracterização climática da cidade de Belo Horizonte, o estudo de caso e suas condicionantes em campo.

No capítulo quarto descreve-se o enquadramento metodológico da investigação, seguido dos métodos e coleta de dados realizados em medições in situ publicados na Urban Climate, apresentados por Hirashima et al (2018); são modelados os cenários de fachadas verdes, discutidos os resultados e analisadas as tendências de comportamento térmico observados nas modelações computacionais.

O último capítulo apresenta as principais conclusões sobre a pesquisa, as limitações de modelação encontradas ao longo do desenvolvimento do trabalho, as tendências relevantes de comportamento das fachadas verdes e aponta as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

No Estado da Arte apresentam-se informações básicas necessárias ao entendimento do tema e do método da pesquisa. Esta revisão bibliográfica foi baseada em livros, artigos científicos e dissertações com maior relevância publicados até a atualidade. Para aprofundar o tema e relacioná-lo ao objetivo da pesquisa, um levantamento das principais publicações científicas sobre o fenômeno urbano da ilha de calor e o comportamento das fachadas, bem como sua interferência no microclima urbano foram levantados. São também analisados os principais modelos computacionais utilizados atualmente para o estudo do comportamento microclimático urbano. A aplicação de modelos que simulam e avaliam os efeitos da vegetação nos microclimas urbanos são extremamente úteis para a análise de cenário de adoção de vegetação em contexto urbano e identificação da forma como a sua adoção pode mitigar problemas de formações de ilhas de calor.

2.1 Jardins verticais e a evolução das cidades

A composição de edifícios aliados à vegetação, no tocante histórico, deu-se através da necessidade de ornamentação, práticas arquiteturais e hortícolas. Os primeiros relatos remontam a 600 a.C. no Antigo Oriente, na antiga Mesopotâmia onde os templos sumérios, babilônios e assírios, denominados de Zigurates, comumente ostentavam vegetação nos seus terraços. Uma das maiores referências em termos de utilização de vegetação em edifícios no Antigo Oriente, são os Jardins Suspensos da Babilônia (Figura 1), considerados uma das Sete Maravilhas do Mundo. Idealizados por Nebuchadnezzar II na intenção de homenagear sua esposa, os jardins foram construídos com cerca de 20m de altura e possuíam diversa vegetação sob paredes e terraços irrigados a partir do rio Eufrates (Dalley 1993).

Os jardins mesopotâmicos localizavam-se em elevações artificiais, nos arredores dos palácios e dos templos. Eram palco de grandes celebrações, banquetes e cerimônias. Tinham um papel de extrema importância religiosa e política e, além da função estética de embelezar, proporcionavam uma atmosfera acolhedora e de sombra aos usuários.

Assumiam também papel fundamental na agricultura, pois nos jardins sagrados do templo eram cultivados legumes, frutas e hortaliças a serem oferecidos aos Deuses cultuados à época (Dalley, 1993).



Figura 1 - Os Jardins da Babilónia são o exemplo mais relevante onde se usaram os Jardins verticais

Fonte: Sousa, 2012

Ainda sobre os jardins da antiguidade, a história remonta à época dos Romanos, os quais buscavam a integração entre a natureza e as edificações. Ornamentar os pátios com fontes, estátuas e vegetação variada, dentre elas flores, arbustos, trepadeiras e árvores foi uma característica comum à arquitetura Romana. Houve maior presença da vegetação disposta na vertical, especialmente pelo desenvolvimento de novas técnicas construtivas como as pérgulas, caramanchões e outros demais trabalhos de treliça que tinham como objetivo unir a vegetação ao edificado. Consequentemente, a aplicação de fachadas verdes à habitação nas Vilas Romanas, tornou-se uma prática comum, a qual, além da função estética de ornamentação, possuía também como finalidade a redução das amplitudes térmicas (Stringheta e Coelho, 2014)

Também neste contexto, as Vilas Romanas localizavam-se nas encostas de colinas, em razão das vistas panorâmicas e também do clima, tirando partido da topografia, aproveitando as irregularidades do terreno e fazendo uso de escadarias e terraços acompanhados de

pequenos canais de água. Tais jardins deveriam unir-se à casa por meio de galerias externas e outras prolongações arquitetônicas (Sousa, 2012).

Outro exemplo histórico interessante dos Jardins Verticais como os conhecemos são as Casas de Turfa (*TurfHouses*), conforme Figura 2. Construídas com materiais naturais disponíveis nas adjacências, revestidas com coberturas verdes em tetos e paredes, estas casas tiveram origem na Islândia. Os primeiros registros de construções desta tipologia foram atribuídos aos Vikings. Estas coberturas tinham como objetivo assegurar maior resistência do edificado diante das condições climáticas extremas do local. Eram construídas com os materiais locais disponíveis como terra, madeira e pedra. As casas apresentavam uma estrutura de madeira assente numa base de pedra e preenchida por uma espécie de tijolos de terra relvada, ficando cobertas de relvado e integrando-se na paisagem envolvente (Brown, 2008).



Figura 2 - Exemplo de "Turfhouses"

Fonte: Brown, 2008

Segundo Besir e Cuce (2018) o uso das plantas escadoras em edifícios expandiu-se bastante no Reino Unido e na Europa Central, durante os séculos XVII e XVIII. Com a Revolução Industrial que esteve na origem da afluência dos migrantes rurais às cidades, originando um crescimento exponencial da população urbana surgiram novos conceitos na área do planeamento urbano. Tal como a integração de espaços verdes na cidade, o que foi evidenciado no conceito de cidade-jardim na Inglaterra, introduzido por Ebenezer Howard (Sousa, 2012). As propostas urbanísticas das cidades-jardim buscavam um equilíbrio entre o

crescimento econômico e os problemas sociais integrados ao desenho da paisagem, sendo necessário que a cidade e o campo “se fundissem”, aliando as vantagens de ambos. Além disso, o uso de vegetação em varandas tornou-se bastante frequente (Köhler, 2008).

De acordo com Manfred Köhler (2008), na Europa Central e do Sul eram comumente populares o uso de videiras. Esta situação foi muito utilizada em várias regiões vinhateiras da Europa, incluindo naturalmente a Europa do Sul, pois permitia o suporte para as vinhas em ramada permitindo a cobertura de um pátio central. Nas paredes ficavam apenas os troncos das videiras e elas cresciam na horizontal por cima de um pátio ou terraço exterior, combinando efeitos de sombra e produção.

Na Europa e cidades norte-americanas, os elementos ornamentais vegetais eram o centro de atração para os moradores das áreas urbanas durante o século XIX. A partir do final do século XIX e início do século XX, as questões ambientais e o impacto da urbanização acelerada das aglomerações urbanas começam a ser objeto de análise. Desta forma, a inserção de vegetação vertical começa a ser considerada uma possibilidade viável como agente mitigador dos problemas ambientais com o objetivo de melhorar a qualidade de vida dos centros urbanos.

Um dos exemplos de referência para o início do século XX é a Casa Scheu projetada por Adolf Loos, sendo um projeto pioneiro ao se utilizar uma cobertura em terraço e jardins verticais. Loos teve como objetivo criar uma sensação de “ar livre” e seu projeto tornou-se referência na Europa tendo a vegetação como revestimento de uma das fachadas (Sousa, 2012).

Em meados da década de 1980, o botânico Patrick Blanc revoluciona o conceito de jardins verticais. Blanc é uma figura um tanto incomum, pois combina uma carreira de pesquisa ativa como cientista no prestigiado Centro Nacional da Pesquisa Científica (CNRS), em Paris, com uma prática de design cada vez mais bem-sucedida, focada na criação de jardins verticais. Concebeu uma parede viva, “*mur végétal*”, composta por uma combinação de estrutura metálica, PVC, uma camada de feltro de poliamida, com um sistema automatizado de fertilização e rega que permite que um conjunto de plantas seja mantido permanentemente contra uma superfície vertical. O projeto desenvolvido traz consigo a possibilidade de ter plantas dispostas ao longo da parede vertical em espaço horizontal sem

a necessidade de substrato, ou seja, plantar sob o solo deixou de ser a única possibilidade sendo possível “plantar sob a parede” (Gandy, 2010).

Dentre suas criações mais célebres ao redor do mundo, três exemplos se destacam dos demais: o Museu Quai Branly em Paris, o Square Vinet em Bordeaux e o edifício Caixa Fórum em Madrid apresentado na Figura 3.



Figura 3 - Parede viva concebida por Patrick Blanc para uma parede exterior do Museu Caixa Fórum em Madrid

Fonte: de Jesus *et al.* 2017

No século XXI, há empresas que produzem de forma industrial, isto é, de forma sistemática e padronizada, estruturas e tabuleiros de verdura e hortícolas, para colocação em paredes verticais.

Atualmente, as fachadas verdes e paredes vivas surgem como um meio de ajudar a melhorar o ambiente urbano e têm sido objeto de estudo e aprofundamento no segmento da sustentabilidade ambiental urbana. Na Europa Central, o movimento dos telhados verdes na década de 1980 se concentrou não apenas nos telhados verdes, mas também em todos os tipos de vegetação da cidade. Foi nesse período que a primeira investigação e o

mapeamento da distribuição e qualidade das fachadas verdes foram realizados. A partir de então, a ideia de trazer a máxima vegetação possível para o ambiente urbano tornou-se uma visão dos ecologistas urbanos (Köhler, 2008) .

2.2 Caracterização dos jardins verticais

Os Jardins Verticais, também denominados como Sistema Vertical de Vegetação (VGS, da sigla em inglês para *Vertical Greenery Systems*) é definido como camada vertical de vegetação (fachadas, paredes, paredes cegas e divisórias) e a intenção principal é cultivar a planta na parede dos edifícios.

Na bibliografia estudada, foram encontrados inúmeros termos que pretendem transmitir o conceito da integração da vegetação na envolvente vertical de um edifício, dentre eles: “Green façades”, “green walls”, “living walls”, “vertical green”, “vertical gardens”, “vegetal greenery systems”, “vegetated wall surfaces”, “vertical landscaping”, “bio walls” e “green infrastructure” (Besir & Cuce, 2018; Coma *et al.*, 2017; de Jesus *et al.*, 2017; Francis & Lorimer, 2011; Gandy, 2010; Köhler, 2008; Morakinyo *et al.*, 2019; Norton *et al.*, 2015; Saaroni *et al.*, 2018).

Dentro da modalidade das VGS, podemos salientar dois sistemas diferentes chamados fachadas verdes e paredes vivas. De uma forma descritiva resumida, e com base em diferentes definições de diversos autores, entende-se por:

- i) fachadas verdes, paredes exteriores diretamente orientadas para arruamentos públicos adjacentes e onde a vegetação cresce sobre o envelope do edifício naturalmente, tendo o chão como base do substrato;
- ii) paredes vivas, paredes compostas de plantas pré-cultivadas, distribuídas e colocadas de forma uniforme em estruturas de revestimento da parede do edifício.

Ambas são consideradas tipologias de paredes verdes e serão exemplificadas na Figura 4 e pormenorizadas em tópicos a seguir.

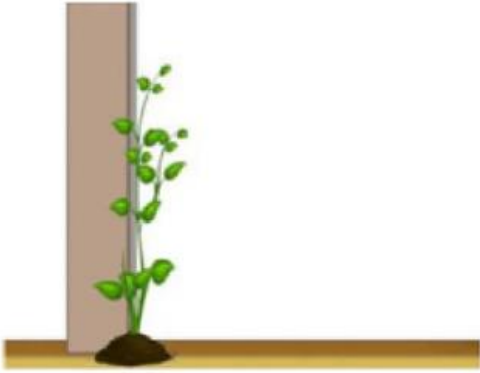
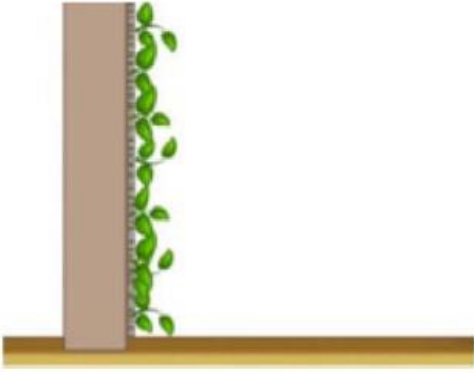
Fachada Verde	Parede Viva
	
<p>Na fachada verde, as plantas têm raízes no solo e crescem sob a elevação da fachada.</p>	<p>Paredes vivas são plantas pré-vegetadas presas a uma parede estrutural ou em armação.</p>

Figura 4 - Jardins verticais

Fonte: Besir and Cuce, 2018.

2.2.1 Fachadas verdes

As fachadas verdes podem ser divididas em duas tipologias principais e três subcategorias que incluem fachada verde tradicional, fachada verde de pele dupla (DSGF, da sigla em inglês para *Double Skin Greenery Façade*) e a treliça modular. De acordo com Besir e Cuce (2018), nas fachadas verdes tradicionais, as plantas usam o envelope do edificado como estrutura de suporte e as raízes da vegetação escaladora permanece em contato com o substrato no solo. As DSGF são baseadas numa estrutura de camada dupla da fachada ao longo de toda a superfície e existe cavidade de ar entre a parede e essa estrutura de suporte vertical.

O método de plantio para as fachadas verdes pode ocorrer da forma mais natural por autoaderência das plantas, quando elas não necessitam de qualquer meio adicional para se sustentarem, ou seja, as ramificações das plantas fixam-se ao longo da superfície da parede, ou em casos mais criativos e tecnologicamente avançados, onde são necessários sistemas de painéis modulares, ou sistemas de cabos exemplificados na Figura 5.

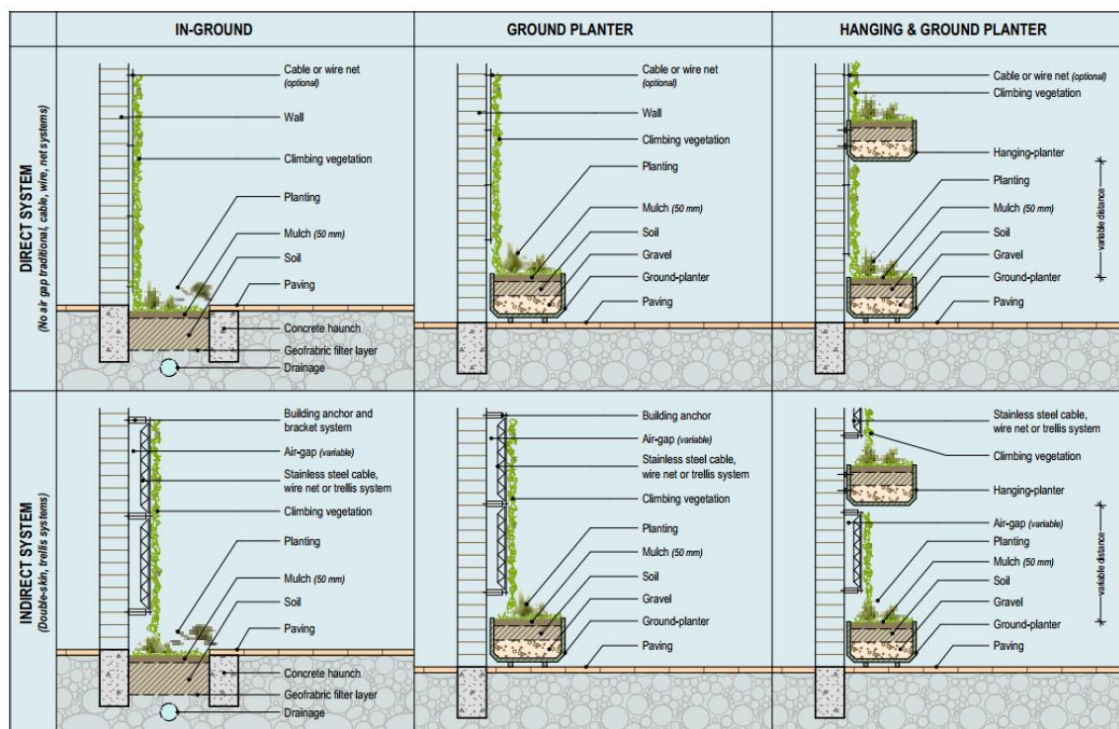


Figura 5 - Sistemas extensivos em fachadas verdes

Fonte: da Silva, 2018

2.2.2 Paredes vivas

As paredes vivas, comparativamente às fachadas verdes, constituem sistemas mais complexos na sua construção e requerem mais manutenção, assim como uma rega mais exaustiva (Sousa, 2012).

Os principais tipos de paredes vivas são descritos como modelos contínuos e sistemas modulares nos quais a principal diferença é a forma de crescimento da vegetação. Nos sistemas contínuos, é utilizada uma membrana geotêxtil cujo material pode ser utilizado em vez do solo (Figura 6).

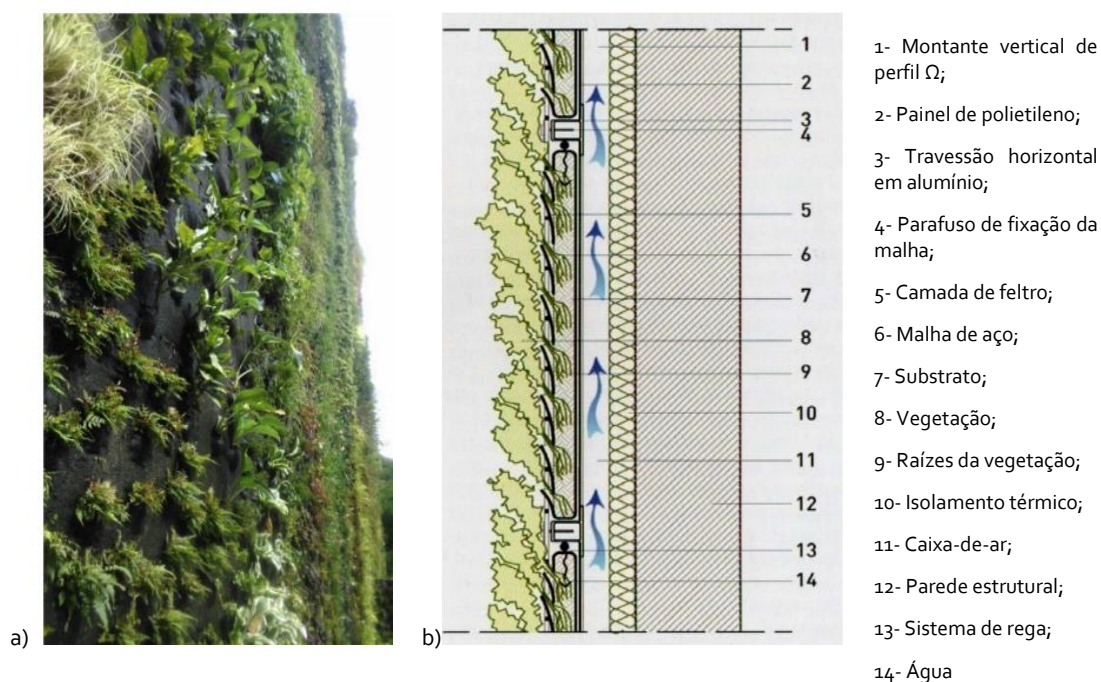


Figura 6 - a) Exemplo de instalação de parede viva; b) Corte explicativo de uma Parede Viva tipo Muro Cortina Fonte: a) de Jesus *et al.* 2017; b) Sousa, 2012

Plantas em sistemas contínuos crescem por irrigação usando técnicas hidropônicas, isto é, sem solo. Segundo Besir e Cuce (2018), os módulos das paredes vivas também podem ser projetados para incluir plantadores, plantadores em forma de bolso e painéis, conforme mostrado na Figura 7.

As paredes vivas podem ser constituídas por painéis modulares previamente plantados com vegetação ou não, ou por tapetes vegetais como exemplificados na Figura 7.

Estes sistemas são mais complexos na sua construção, requerem mais manutenção, assim como uma rega mais exaustiva. Consistem em sistemas construídos no local (*in situ*) ou pré-fabricados, das mais diversas formas ou materiais, capazes de criar condições de sobrevivência para a planta ao longo da parede (Sousa, 2012).

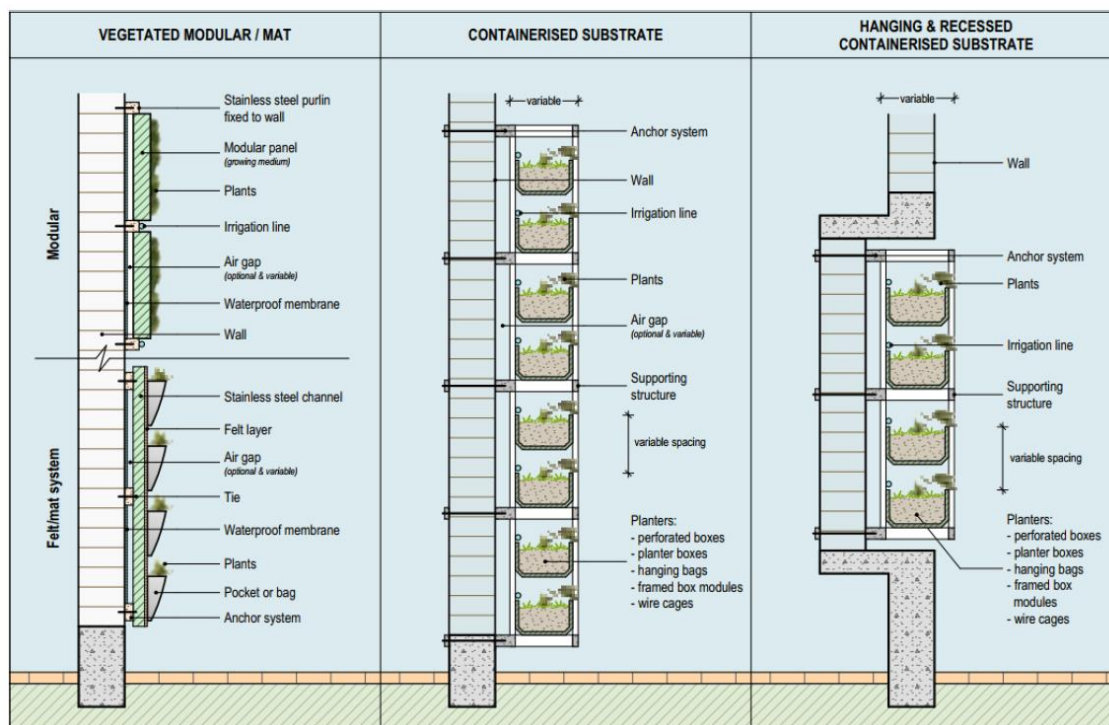


Figura 7 - Sistemas intensivos em paredes vivas

Fonte: da Silva, 2018

2.3 O papel da vegetação no microclima urbano

O aumento do interesse em 'arquitetura verde' e 'urbanismo ecológico' marca uma mudança nas características culturais e políticas da cidade pós-industrial. Novas possibilidades de inserção da vegetação em estruturas arquitetônicas cada vez mais arrojadas são exemplos deste interesse crescente na naturalização das cidades (Gandy, 2010).

Discute-se muito que o aquecimento associado ao desenvolvimento urbano será exacerbado nos próximos anos, principalmente pelo aumento da temperatura devido às mudanças climáticas. Desta forma, aliar o urbanismo à estratégia da infraestrutura verde urbana pode ajudar a obter reduções de temperatura nas áreas urbanizadas, oferecendo diversos benefícios adicionais, como redução da poluição e maior habitat da biodiversidade (Norton *et al.*, 2015).

Segundo Benedict e McMahon, citados por Meerow e Newell (2019), uma estratégia que as cidades empregam para aprimorar a resiliência é expandir a infraestrutura verde, definida como: “Uma rede interconectada de espaço verde que conserva os valores e funções do ecossistema natural e fornece benefícios associados à população humana”. Com base nessa definição, a infraestrutura verde inclui espaços verdes urbanos, caracterizados por múltiplos benefícios sociais e ecológicos, desde a melhoria da saúde pública, do conforto térmico urbano até a retenção aprimorada de águas pluviais.

2.3.1 Arquitetura Biofílica Urbana: um futuro resiliente

Segundo Soderlund e Newman (2015), o espaço urbano construído cada vez mais apresenta problemas relacionados à poluição do ar, da água e das ilhas de calor. De forma crescente geram-se altos níveis de estresse, problemas mentais e de saúde nas cidades contemporâneas. Decorrente dessas preocupações surge um novo conjunto de princípios e práticas de design evidenciando a participação da natureza nas urbanizações denominado “Arquitetura Biofílica”. Este conceito foi popularizado em 1984 pelo sociobiologista, Wilson em seu livro *Biophilia*. Ele utilizou o termo "biofilia" para descrever seus sentimentos profundos de conexão com a natureza numa temporada de imersão em meio à natureza.

A urbanização e estilo de vida nos centros distanciaram o contato do homem com a natureza. De acordo com Ramzy (2015), evidências empíricas, nas últimas três décadas, confirmaram que projetos que priorizam a conexão dos seres humanos à paisagem natural, ajudam a melhorar a sensação geral de bem-estar desses seres, com consequências positivas na qualidade de vida e também são terapêuticas na redução da tensão e do estresse. Por isto, criar meios de reconectar o ambiente construído a esses elementos da natureza é de extrema importância e, desta forma, a biofilia é uma das teorias de reconexão mais recentes e viáveis nesse campo.

Soderlund e Newman (2015), após revisão minuciosa em artigos publicados, sintetizaram benefícios socio-psicológicos associados à arquitetura biofílica, os quais foram listados a seguir:

- Saúde mental melhorada;
- Estresse reduzido;
- Restauração da atenção;
- Maior bem-estar;
- Diminuição da violência e do crime;
- Taxas de cura mais rápidas em hospitais.

Ainda segundo os autores Soderlund e Newman (2015) tais benefícios não são isolados. Evidências demonstram quanto aos benefícios ambientais e econômicos, tais como a redução da poluição pelo sequestro de carbono e conseqüentemente uma melhora na qualidade do ar especialmente pela inserção de tetos, paredes e fachadas verdes no edificado urbano. O aumento da biodiversidade nas cidades atraem espécies diversificadas de pássaros e insetos polinizadores. O uso apropriado da vegetação no ambiente construído pode ajustar o microclima urbano relativamente aos efeitos das UHI e melhorar o comportamento térmico dos envelopes das construções, diminuindo gastos com a climatização interna do volume edificado.

2.3.2 O impacto das fachadas verdes no edificado

Nos últimos anos, novas tendências de design estão sendo aplicadas na arquitetura e na construção, para que os critérios ambientais e sociais sejam considerados juntamente com os de nível estético, econômico e funcional.

Nesse contexto, o conceito de infraestrutura verde urbana foi definido como um conjunto de elementos artificiais que fornece vários serviços ecossistêmicos nas escalas de construção em cenários urbanos. De acordo com Coma *et al* (2017) entre essas funções atribuídas às infraestruturas verdes, destacam-se a economia de energia da construção e a redução do efeito de ilha de calor urbana. Em relação a este conceito, a VGS atua basicamente através de quatro mecanismos: a sombra produzida pela vegetação, o isolamento fornecido pela

vegetação e pelo substrato, o resfriamento evaporativo através da evapotranspiração e, por último, o efeito barreira ao vento. A este respeito, os sistemas de vegetação vertical são considerados uma das soluções sustentáveis mais adequadas para se resolver os problemas relacionados às ilhas de calor urbano.

A partir da análise de estudos anteriores, verifica-se que o efeito de sombra tem o maior impacto sobre a redução da temperatura da parede do edifício e, conseqüentemente, sobre o consumo de energia. Em alguns desses estudos, a economia de energia foi indiretamente calculada com base nas reduções de temperaturas internas ou fluxos de energia através da parede do edifício, considerando as propriedades térmicas dos materiais, mas em nenhum deles foi encontrada uma medição precisa da economia de energia proporcionada pelos sistemas verdes (Coma *et al.*, 2017).

De acordo com Besir e Cuce (2018), a correlação entre a espessura da folhagem e a redução da temperatura são evidenciadas da seguinte forma: o aumento entre 13 e 54% da porcentagem de folhagem permite reduzir a temperatura na superfície do edificado entre 3,7 a 11,3°C. Os resultados comprovam claramente a eficácia na regulação térmica quando a vegetação é aplicada na superfície envolvente do edifício.

Atualmente, está bem documentado na literatura, que as infraestruturas verdes, quer as coberturas, quer as fachadas verdes, têm um ótimo potencial de proporcionar economia de energia no setor de construção e possibilitar condições internas e externas termicamente atraentes e mais confortáveis.

2.3.3 A influência das fachadas verdes no conforto térmico urbano

De acordo com estudo elaborado por Manso & Castro-Gomes (2015), nas últimas décadas, várias pesquisas foram realizadas comprovando que as paredes verdes podem contribuir para melhorar e restaurar o ambiente urbano e melhorar o desempenho dos edifícios. Para entender melhor se os sistemas de paredes verdes podem ser considerados soluções sustentáveis, vários estudos foram realizados por pesquisadores a fim de comparar o desempenho ambiental de diferentes sistemas de paredes verdes durante todo o ciclo de

vida. Como resultado, a revisão efetuada pelo autor supracitado validou que as fachadas verdes diretas são um meio mais sustentável e uma solução mais econômica. Esses sistemas têm uma pequena carga ambiental, considerando que eles não possuem muitos materiais envolvidos e com poucas necessidades de manutenção (Manso & Castro-Gomes, 2015).

As fachadas verdes utilizam a vegetação escaladora (trepadeiras) para cobrir paredes de edifícios, são uma ferramenta flexível e adaptável aos diversos desenhos arquitetônicos possíveis. Como outras formas de infraestrutura verde, elas resfriam as paredes dos edifícios (i) interceptando e absorvendo a radiação solar (sombreamento), (ii) fornecendo resfriamento evapotranspirativo, (iii) aumentando o albedo (refletindo a radiação solar), (iv) fornecendo uma termicamente cavidade de ar isolante, dependendo da distância da face verde da parede e (v) redução da velocidade do vento na superfície da parede (Hunter et al., 2014).

2.3.4 Ilhas de calor urbano

Nas últimas décadas, os eventos de calor extremo (EHE, da sigla em inglês para *Excessive Heat Events*) levaram a altas taxas de mortalidade nas cidades, à medida que as populações urbanas são empurradas para além das suas capacidades adaptativas, especialmente os idosos e outros residentes com alguma fragilidade física. As ilhas de calor ocorrem especialmente em zonas centrais de grandes aglomerados urbanos, como representado na Figura 8, onde se verifica um aumento expressivo da temperatura do ar quando comparado aos espaços em zonas rurais (de Jesus *et al.*, 2017).



Figura 8 - Ilhas de calor: a pouca vegetação faz com que as cidades apresentem temperatura mais elevada do que nas áreas rurais circundantes

De acordo com Salata *et al.* (2017), nos últimos anos, houve um aumento progressivo nos eventos de calor intenso na região do Mediterrâneo e, conseqüentemente, um aumento resultante no estresse térmico das pessoas. Constatou-se que, quando a temperatura atinge valores altos, há um aumento na taxa de mortalidade entre aqueles que estão mais expostos a esses fenômenos.

Dentre diversas aglomerações urbanas ao redor do globo, alguns dados apurados por Norton *et al.* (2015) estimam que devido ao fenômeno das ondas de calor combinado com as ilhas de calor em Chicago (EUA), no ano de 1995, houve um aumento de mortalidade de 31%; em Paris (França), no ano de 2003 contabilizou-se um aumento de mortalidade de 130%; Moscovo (Rússia), em 2010, houve um aumento de mortalidade de 60% e em Melbourne (Austrália); em 2009, deu-se um aumento de 62% na mortalidade. Em muitas cidades estima-se que estes eventos catastróficos correspondentes às ilhas de calor, acontecerão mais vezes, pois a frequência, a intensidade e a duração das EHEs tem vindo a aumentar com as mudanças climáticas.

Com a urbanização em crescimento, o espaço urbano modificou-se rapidamente. As superfícies modificadas do espaço horizontal disponível levam à formação de microclimas urbanos distintos. As superfícies e vegetação naturais são substituídas por uma superfície

impermeável tridimensional complexa que absorve grandes quantidades de radiação solar durante o dia, sendo essa energia liberada lentamente à noite, mantendo as áreas urbanas mais quentes que a paisagem rural circundante e levando às ilhas de calor urbano (UHI – sigla em inglês para “*Urban Heat Island*”) (Norton *et al.*, 2015).

Dada a importância do microclima urbano, é essencial identificar as possíveis ações mitigadoras dos efeitos deste fenômeno *Urban Heat Island* (UHI). De fato, diferentes características urbanas podem determinar uma alta variabilidade nas condições térmicas na mesma cidade.

Por conseguinte, através do *Mediterranean Out-door Comfort Index* (MOCI), Salata *et al.* (2017) realizaram uma pesquisa na qual foi examinado o desempenho de diferentes estratégias de mitigação (telhados frios, pavimento frio, mais vegetação urbana e uma combinação das três configurações) realizando uma comparação sendo apresentadas diferentes configurações para o local: uma é caracterizada por um aumento da área verde, uma segunda configuração apresenta a implementação de um pavimento frio de betão, uma terceira configuração apresenta telhados frescos e outra combinação das soluções anteriores.

A solução mais vantajosa foi implantar telhados frios, pavimento frio e mais vegetação nas superfícies que acumulam calor, ou seja, maior infraestrutura verde em todo o edificado. Ao adicionar maior infraestrutura verde, observou-se uma diminuição do MOCI em relação à configuração atual do local, que em algumas áreas era de -3,37 unidades e uma diminuição média da temperatura do ar de -1,49 °C.

Entre as soluções analisadas e sugeridas por Salata *et al.* (2017), a instalação de plantas e áreas verdes fornece bons resultados em termos de diminuição da temperatura radiante média e da temperatura do ar. Em suma, nos casos examinados, muitos autores sugerem alterar a morfologia das ruas e praças no nível de pedestres, aumentando o número de árvores (útil para limitar a radiação solar direta) ou instalando um pouco de relva nas superfícies horizontais, e aumentar a presença de telhados e paredes verdes para mitigar o efeito *Urban Heat Island*.

A infraestrutura verde urbana pode ser definida como a rede de espaços verdes planejados e não planejados, abrangendo tanto a esfera pública quanto a privada. Segundo Norton *et al.* (2015), nos cânions urbanos, onde exista luz natural adequada, as paredes verdes e as fachadas, bem como a vegetação ao nível do solo, devem ser priorizadas em detrimento das árvores, devido à menor ocupação de espaço e porque permitem melhor ventilação e resfriamento de ondas longas à noite.

2.4 Aplicação de modelos

A simulação por computadores mostrou-se uma tendência internacional como recurso para avaliar os efeitos da vegetação nos microclimas urbanos (Silva, 2018). A simulação microclimática pode ser usada como método de pesquisa para entender fenômenos relacionados ao clima urbano e avaliar estratégias de mitigação e adaptação antes de se implementar qualquer medida.

2.4.1 A Modelação computacional em espaço Urbano

Diversos modelos foram desenvolvidos nos últimos anos para parametrizar as trocas de calor das superfícies entre as coberturas urbanas e a atmosfera. Um dos objetivos é poder avaliar diferentes estratégias de desenvolvimento urbano para uma determinada localidade em resposta às mudanças climáticas. No entanto, todos os modelos existentes de simuladores computacionais não são capazes de representar a vegetação urbana e seu impacto no microclima com a mesma relevância. De fato, uma das diferenças visíveis entre esses modelos é a possibilidade (ou não) de levar em consideração a vegetação para os ambientes urbanos que incluem áreas verdes, e como essa vegetação é processada por tais modelos (Lemonsu *et al.*, 2012).

2.4.2 Os modelos matemáticos de simulação do impacto da vegetação no microclima urbano

Desenvolvido no laboratório CERMA em Nantes, França, o modelo SOLENE-microclima (baseado no Modelo radiativo SOLENE) é capaz de representar as características evaporativas, de sombreamento e isolamento das paredes e telhados verdes ao serem modelados como superfícies (Redon *et al.*, 2017). A principal vantagem desse software é a representação de todo o ambiente urbano. No SOLENE (Figura 9), é possível considerar tanto a radiação de ondas curtas quanto as de ondas longas, por sua contribuição direta e indireta (após inter-reflexões). Neste simulador, é possível ativar a ferramenta Code_Saturne, com ela, também é possível considerar a influência do ambiente urbano na distribuição do vento nas paredes dos edifícios. Como resultado, a distribuição de temperatura em cada parede dos edifícios é calculada usando essas distribuições de radiação e vento (Morille *et al.*, 2015).

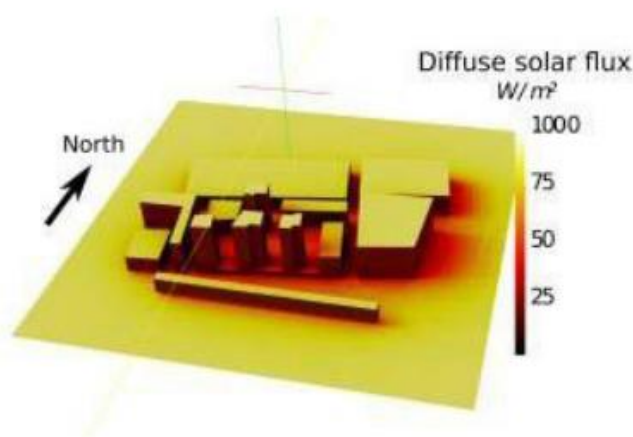


Figura 9 - Fluxo solar difuso calculado pelo software SOLENE

Fonte: Morille *et al.*, 2015; Redon *et al.*, 2017.

O SketchUp é um programa de interface intuitiva e de fácil interação com o usuário, composto por um conjunto de recursos e aplicativos que possibilita a criação de modelos em três dimensões (3D), sendo possível criar ambientes realistas, como exemplificado na Figura 10, é disponibilizado em versão gratuita ou na versão paga denominada Pro, com ferramentas exclusivas. Bastante utilizado por arquitetos, designers e

engenheiros, sendo necessário apenas conhecimentos básicos em desenho técnico. O software ainda é compatível com outras interfaces, como por exemplo o Google Earth, o que torna possível georeferenciar todo o desenho tridimensional e analisar a incidência solar na edificação. Além disto, o SketchUP possui uma galeria de plug-ins que permitem diversas abordagens, desde renders de imagens realistas, a criação de telhados, tubulações e até de geração de energia em painéis solares. Essas extensões são criadas por desenvolvedores independentes e precisam ser instaladas no software original, grande parte destes plug-ins são disponibilizadas de forma gratuita (SketchUP, 2020).



Figura 10 Modelo Tridimensional elaborado em SketchUP Pro

Fonte: SketchUP, 2020

Desenvolvido como um plug-in para o software de modelação 3D gratuito SketchUp (anteriormente Google SketchUp); o STEVE (*Screening Tool for Estate Environment Evaluation*) é utilizado especialmente por arquitetos urbanistas e planeadores urbanos. Este apresenta-se como uma ferramenta de análise direta para durante os processos de estudo de projeto e viabilidade da inserção de infraestruturas verdes em cenários urbanos (Tan, et al. 2017)

No geral, os modelos climáticos disponíveis para mapeamento de temperatura e conforto térmico, podem ser na sua maioria, considerados complicados e menos amigáveis ao usuário; especialmente para profissionais da arquitetura e planeamento urbano. Portanto,

os *Screening Tool for Estate Environment Evaluation* (STEVE Tool) and *Thermal Sensation Vote* (TSV) foram desenvolvidos com a motivação de vincular as descobertas da pesquisa aos planejadores urbanos (Tan, et al. 2017). O STEVE (Figura 11) é capaz de calcular as temperaturas mínimas, médias e máximas para um ponto de interesse de acordo com a situação existente e uma previsão futura. Quando utilizado juntamente com o sistema de informação geográfica (GIS23), mapas de temperatura do ar podem ser desenvolvidos e seus pontos críticos podem ser identificados (Silva, 2018).

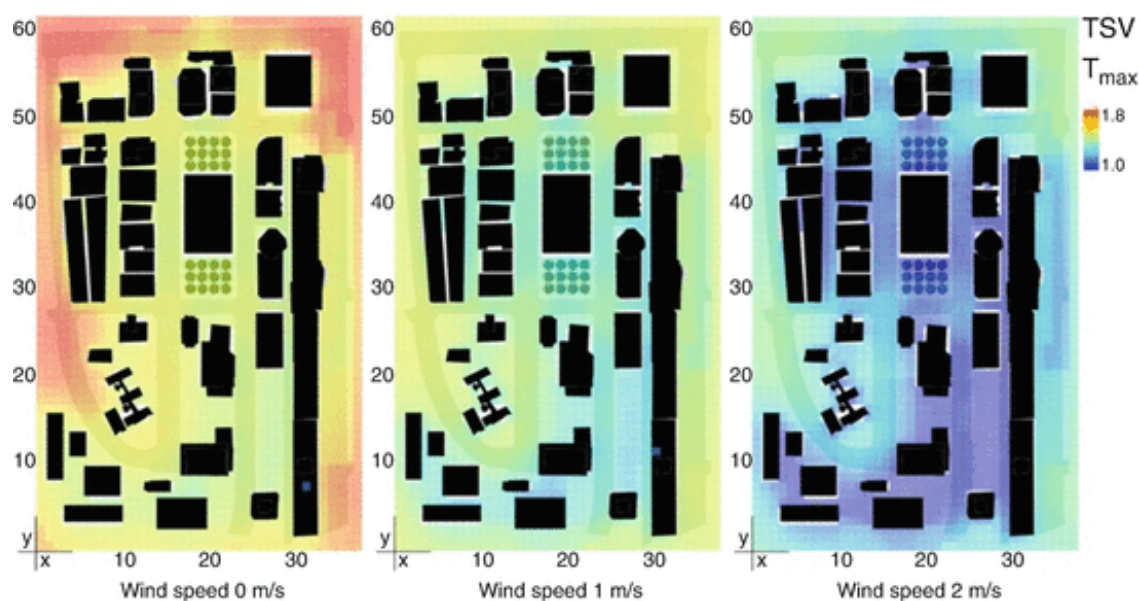


Figura 11 - Aplicação do plug-in STEVE em software SketchUp em estudo de comportamento térmico urbano Fonte: Tan, et al. 2017

O TEB-Veg, uma versão com vegetação para o “*Town Energy Budget*” (TEB), é um software que calcula os fluxos de energia levando em consideração o balanço energético das superfícies artificiais urbanas e a interação solo-biosfera-atmosfera. Em resumo, o TEB-Veg é um software que analisa a superfície e parametriza as trocas de água e energia entre coberturas urbanas e a atmosfera (Sarrat et al., 2006).

O *Vegetated Urban Canopy Model* (VUCM) é um software desenvolvido para uso em modelagem de mesoescala meteorológica e ambiental. No modelo, os processos de troca baseiam-se na interação do calor e umidade acima de superfícies artificiais (teto, parede e estrada) e áreas vegetadas (árvores e solo). O software também contempla a análise dos

processos físicos associados entre as áreas com cobertura em relva, superfícies permeáveis e os efeitos da fotossíntese da vegetação urbana (Lee, 2011).

O *Solar and Long Wave Environmental Irradiance Geometry* (SOLWEIG) simula variações espaciais de fluxos de radiação 3D e temperatura média radiante, como demonstrado na Figura 12. Para o cálculo dos fluxos de radiação 3D e da temperatura média radiante, o SOLWEIG utiliza dados iniciais como radiação global de ondas curtas, temperatura do ar, umidade relativa, informações geográficas (latitude, longitude e elevação) e geometria urbana representada pela topografia e elevação 3D da edificação. Árvores e arbustos são representados por componentes isolados (Lindberg & Grimmond, 2011).

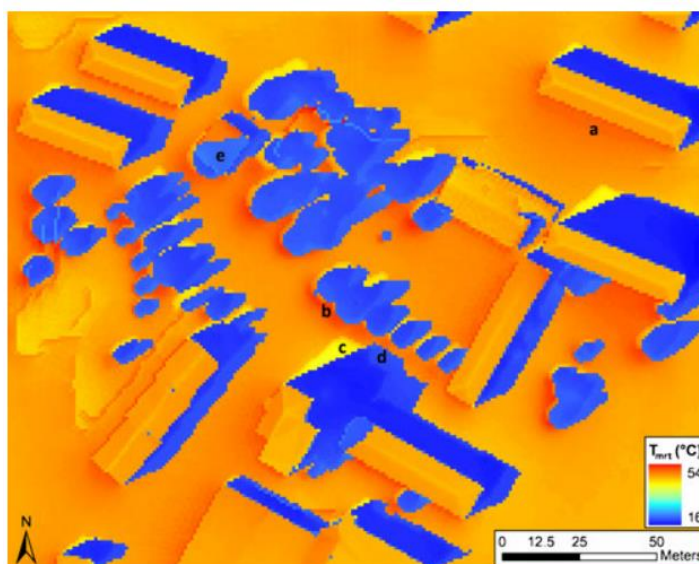


Figura 12 – Simulação da variação de Temperatura média radiante no software SOLWEIG

Fonte: Lindberg & Grimmond, 2011

O ENVI-met é um modelo tridimensional (3D) não hidrostático, microclimatológico e computacional de dinâmica de fluidos. O modelo possui capacidade para simular interações superfície-planta-atmosfera em ambiente urbano complexo, composto por edifícios de diferentes formas, altura e materiais, estrada ou superfície de diferentes materiais e vegetação de diferentes configurações (Morakinyo *et al.*, 2019).

O software ENVI-met (Figura 13) permite criar condições de vida sustentáveis em um ambiente em constante mudança. Com as ferramentas interativas da ENVI-met, podem-se

aprofundar em qualquer aspecto do complexo de microclima e analisar o desempenho de projetos.

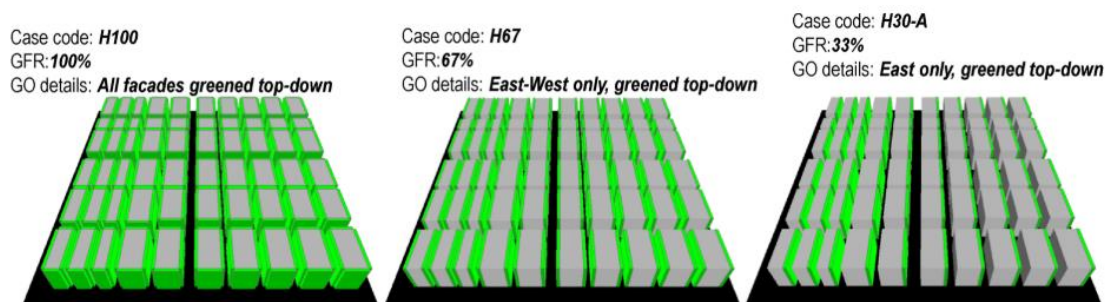


Figura 13 - Simulação de fachadas verdes no envelope de edifício em Hong Kong, utilizando software Envi_MET

Fonte:(Morakinyo *et al.*, 2019)

O modelo de software ENVI-met é aplicado em todo o mundo, dos trópicos às regiões polares. Com mais de 3.000 estudos independentes, o ENVI-met é o modelo de microclima mais avaliado disponível, provando sua capacidade de simular com precisão o microclima externo de qualquer lugar da Terra (Envi_MET, 2020). Ainda possui plugin de código aberto para integração com o SketchUP Pro 2019 e 2020, o que oferece a opção de escrever modelos 2D ENVI-met.

2.5 Síntese

Neste capítulo de revisão da literatura foram apresentados os usos e características dos jardins verticais desde a antiguidade até a era contemporânea. O uso de infraestruturas verdes no cenário urbano e o papel dessa vegetação para o conforto térmico de zonas urbanas, não só a nível físico, mas também psicológico, como foi exemplificado relativamente a arquitetura biofílica. Foi abordado também a utilização de softwares informáticos para o estudo e a viabilização de estratégias de mitigação dos fenômenos de calor urbano.

3 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

3.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as etapas de investigação, bem como a seleção de critérios para o estudo de caso. Para o estudo da área em questão, será apresentado o software escolhido e suas características gerais. Ainda sobre a escolha do simulador computacional, serão apresentadas as limitações de aplicação do software utilizado.

3.2 Etapas de investigação

A metodologia adotada foi estruturada em três etapas distintas: Etapa preparatória, Etapa de modelação e Etapa de análise dos resultados.

- i. Na etapa preparatória, através de uma revisão bibliográfica em publicações relevantes, foram recolhidas e sistematizadas informações de investigações e estudos anteriores relativas a temperatura, qualidade do ar em meio urbano, de forma a se identificar o estado do conhecimento relevante para o estudo. Foi também recolhida informação relativa ao histórico de temperatura ambiente na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Estes dados coletados para o estudo de caso são essenciais para se conseguir modelar através de simulador computacional, condições ambientais de um cenário real e de um cenário hipotético incluindo fachadas verdes, com enfoque em micro simulação térmica e de humidade relativa do ar.
- ii. Na etapa de modelação, os dados coletados anteriormente foram incorporados no cenário criado através do Software de modelação em microclima urbano com a inserção de fachadas verdes. Esta simulação teve como objetivo demonstrar a capacidade de melhoria no microclima urbano pela influência de fachadas verdes, por meio da comparação de variáveis climáticas simuladas no cenário urbano atual e no cenário hipotético proposto, através do software de simulador computacional.
- iii. Na última etapa, realizou-se a análise dos diversos resultados obtidos para o estudo de caso com o objetivo de evidenciar as diferentes situações em que zona de calor de cenário típico de verão afetam as condições térmicas a nível de pedestres.

3.3 Estudo de Caso - Modelação

A seleção de uma área de estudo para implementar o estudo de caso implica identificar e selecionar zonas que possuem o maior número de pessoas vulneráveis ao calor urbano excessivo. O perfil urbanístico dessas áreas afetadas pelas ilhas de calor não corresponde a um padrão específico nos centros urbanos, mas na maior parte dos casos se localizam em áreas urbanas com pouca vegetação e/ou água (Norton *et al.*, 2015). Neste contexto, no capítulo 4 será apresentado com detalhes todos os passos adoptados para a seleção da área de estudo.

Como já foi salientado na subsecção 2.5.2, o software ENVI-met é o modelo de microclima mais avaliado disponível e foi o selecionado para realizar a modelação e este foi o principal fato na sua escolha. Por outro lado, a existência de uma versão gratuita também foi relevante já que o estudo realizado não dispunha de nenhum orçamento para a aquisição de software.

O ENVI-met é um software de simulador computacional que permite o estudo de uma malha de modelagem de um espaço urbano onde o modelo proposto é construído. A malha é definida segundo três dimensões espaciais (x, y e z) e é acessada pelo ícone “SPACES”, localizada na aba “ENVI-met V4”, como se identifica na Figura 17.

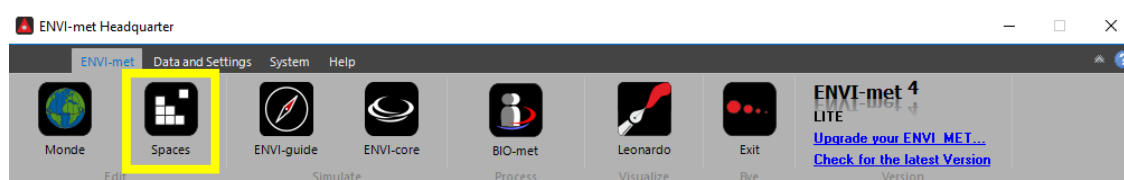


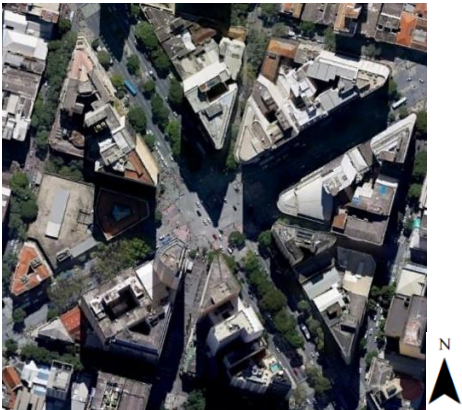
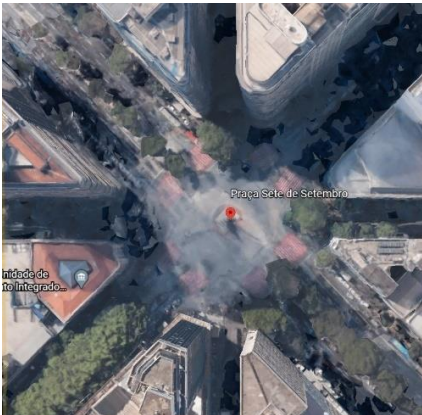
Figura 14 - Barra de tarefas ENVI-met 4.4.5

Na versão gratuita do ENVI-met, a qual foi utilizada para este trabalho, o tamanho máximo da malha é igual a 50(x) x 50(y) x 40(z) grids, enquanto as versões pagas permitem malhas mais extensas. Pode ser atribuída a medida desejada a este grid, recomenda-se que não seja superior a 4m. Esta foi uma limitação assumida no estudo, mas que não é necessariamente para quem utilize a versão paga que, conseqüentemente, permite a modelagem de cenários maiores e mais detalhados.

Os passos necessários à modelação de um espaço urbano no ENVI-met são apresentados em seguida e foram os adoptados na modelação do estudo de caso apresentado na subsecção 4.4.

Para correção do norte geográfico, é necessário inserir o valor do grau de rotação do Norte no ENVI-met, como se salienta nas imagens da tabela 1 e em que o grau de rotação Norte é de -6º. Esta correção do norte geográfico tornará o desenho mais ortogonal, desta forma, facilitando a modelação da malha urbana.

Tabela 1 - Grau de rotação para modelação

Imagem do satélite original	Cenário rotacionado	Grau rotação Norte
		-6º

Na utilização do ENVI-met, após iniciar o “SPACES”, é necessário inserir os dados geográficos da área, dos quais:

- cidade e país;
- latitude e longitude;
- fuso horário;
- altitude em relação ao nível do mar;
- grau de rotação do norte (etapa opcional quando opta-se por modelar em cenário mais ortogonal)

A inserção dos dados é realizada no ícone “Edit Settings/Create New Area” (Figura 15) na aba “Model Settings” dentro do próprio SPACES:

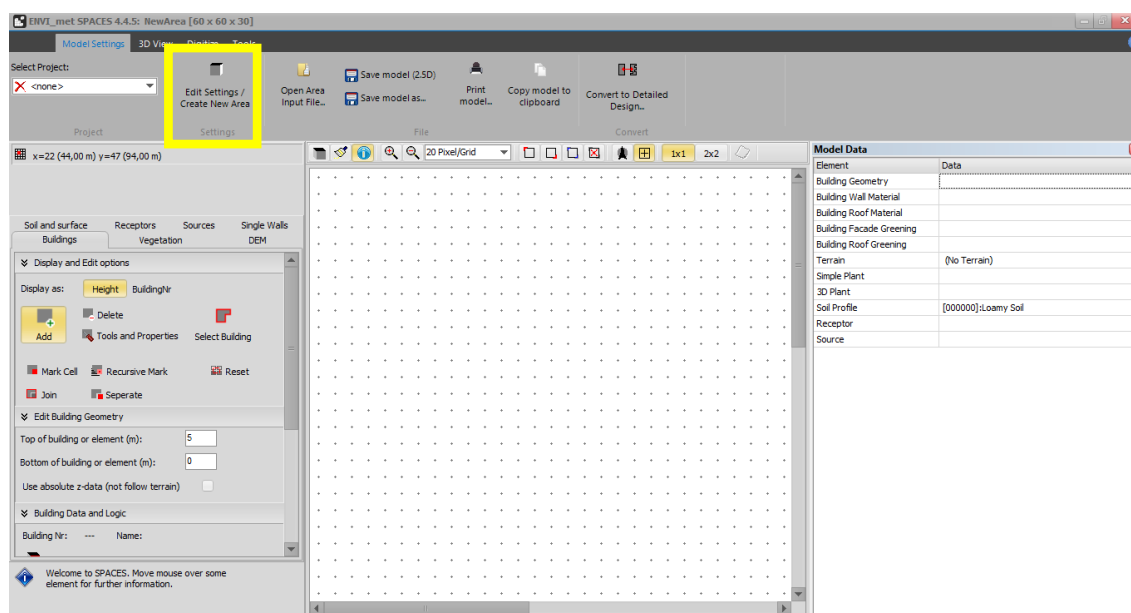


Figura 15 - Ambiente de modelagem “SPACES” do ENVI-met 4.4.5

Nesta etapa de configurações geográficas é importante observar a opção "nesting", pois ela refere-se a área que envolve a modelagem com o objetivo de proporcionar condições estáveis de contorno. O valor de “nesting” deve ser igual, ou preferencialmente maior, à altura do maior edifício identificado na área de estudo. O cenário será modelado a partir de uma imagem de satélite que pode ser retirada do Google Earth, assim como demonstrado nas imagens da Tabela 1. Nesta etapa da modelação é preciso definir a altura dos edifícios, bem como o material da fachada e da cobertura, tipo de solo ou pavimento, materiais de cobertura do solo ou pavimento e vegetação, até que toda a malha de modelagem esteja preenchida. Para isso, o software disponibiliza um banco de dados com materiais e vegetação pré-definidos, além de oferecer a possibilidade de criação de novos elementos.

Para iniciar a simulação computacional do microclima é necessária a inserção dos dados climáticos previamente coletados da área de estudo. O objetivo é criar um arquivo climático que servirá de suporte à simulação a realizar. Esta configuração é realizada no ícone “ENVIGuide” na aba “ENVI-met V4” (Figura 16).

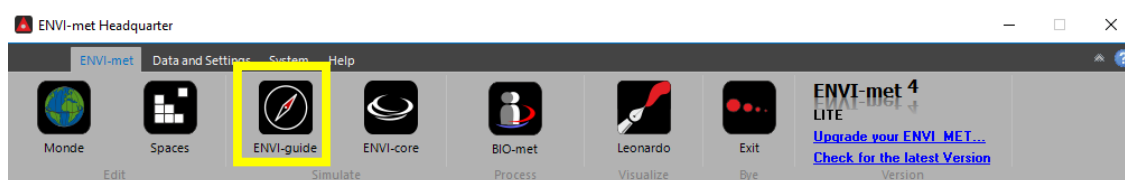


Figura 16 - Barra de tarefas do ENVI-met 4.4.5

Após a configuração do arquivo climático realiza-se a simulação computacional por meio do ícone “ENVI_core”, localizado na aba “ENVI-met V4”. Desta forma criam-se arquivos com dados gerados nos horários estipulados para posteriormente renderizá-los em imagens gráficas no ícone “Leonardo” (Figura 17), também na aba “ENVI-met V4”.

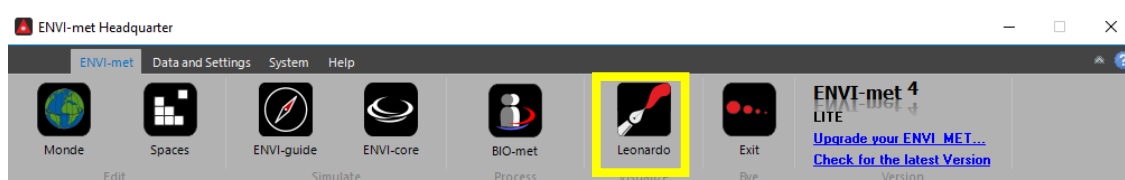


Figura 17 - Barra de tarefas ENVI-met 4.4.5

Após concluir a modelação no ENVI-met é então possível efetuar a simulação do ambiente urbano em diferentes cenários para a respetiva interpretação e análise de resultados.

3.4 Limitações da pesquisa

Um dos principais pontos limitantes na presente pesquisa deve-se à utilização do software ENVI-met na sua versão gratuita. Segundo Bárbara Silva (2020), a versão gratuita (basic) possui diversas limitações no que se refere às funções necessárias para a realização de uma pesquisa mais aprofundada. A limitação no tamanho da malha de modelagem ao máximo de 50 x 50 grids é indicada para o estudo de áreas com um máximo de 200 metros de extensão, o que condiciona em muito o estudo de um espaço urbano real.

Este entrave limita bastante a compreensão e análise de estudo preciso, pois não permite exemplificar a malha urbana com todas as suas particularidades. Outra limitação da versão gratuita face à versão paga, é que também não é possível modelar detalhes arquitetônicos

como janelas, portas, vãos, estruturas em balanço, que conseqüentemente tornam o resultado mais credível face a realidade e melhor modelação da mesma.

No presente estudo utilizou-se o software ENVI-met 4.4.5 para modelagem e simulação do cenário original e com acréscimo de vegetação. Este, mostrou-se adequado em estudos de microclima, uma vez que simula as interações que ocorrem no meio urbano. Esta versão também permite a definição dos materiais da construção, bem como de cobertura, mesmo que de forma simplificada.

Contudo, como foi utilizada a versão gratuita, o método Full Forcing não está disponível, o qual permite a inserção de um arquivo climático EPW já pronto. Como foi apenas possível utilizar a opção Simple Forcing, podem ocorrer falhas no momento em que os dados climáticos são inseridos no modelo.

No entanto, mesmo com as limitações identificadas, foi possível efetuar uma análise efetiva das alterações de condições climáticas e avaliar o efeito de fachadas verdes, que é o objetivo principal do estudo.

4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo caracteriza-se pela seleção e caracterização do estudo de caso, além da delimitação da área a ser simulada na cidade de Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais, Brasil. Após a identificação da área de estudo, são apresentados todos os dados coletados e necessários para o processo informático de simulação do ambiente urbano de forma a se estudar o efeito das fachadas verdes para mitigar ilhas de calor e salientar as vantagens relativas ao controlo da percepção térmica e na qualidade do ar a nível de conforto das pessoas que circulam nas ruas.

4.1 Seleção do estudo de caso

Os critérios utilizados para seleção da área de estudo na cidade de Belo Horizonte consideraram o elevado fluxo de circulação de pessoas nas ruas, pouca vegetação e grande concentração de prédios. O centro da cidade de Belo Horizonte foi se modificando ao longo dos anos, principalmente pela pressão da urbanização em seu centro urbano, como demonstra a Figura 18 em que para a Praça Sete de Setembro se identifica o surgimento de uma área muito verticalizada, com poucas árvores e solo quase todo pavimentado.



Figura 18 - Avenida Afonso Pena e Praça Sete de Setembro em 1948 e 2013

Fonte: (Rey s.d.) (Minas s.d.)

Em termos de contexto geográfico, a cidade de Belo Horizonte localiza-se no Estado de Minas Gerais no Brasil (Figura 19) e é um centro de uma importante aglomeração urbano-industrial da região Sudeste do Brasil. Apesar de contar com inúmeros estudos realizados sobre o seu sítio e desenvolvimento econômico, a produção de trabalhos referentes ao clima urbano ainda é muito escassa. Além disso, há poucos artigos produzidos sobre o comportamento do campo térmico das cidades de clima tropical de um modo geral.

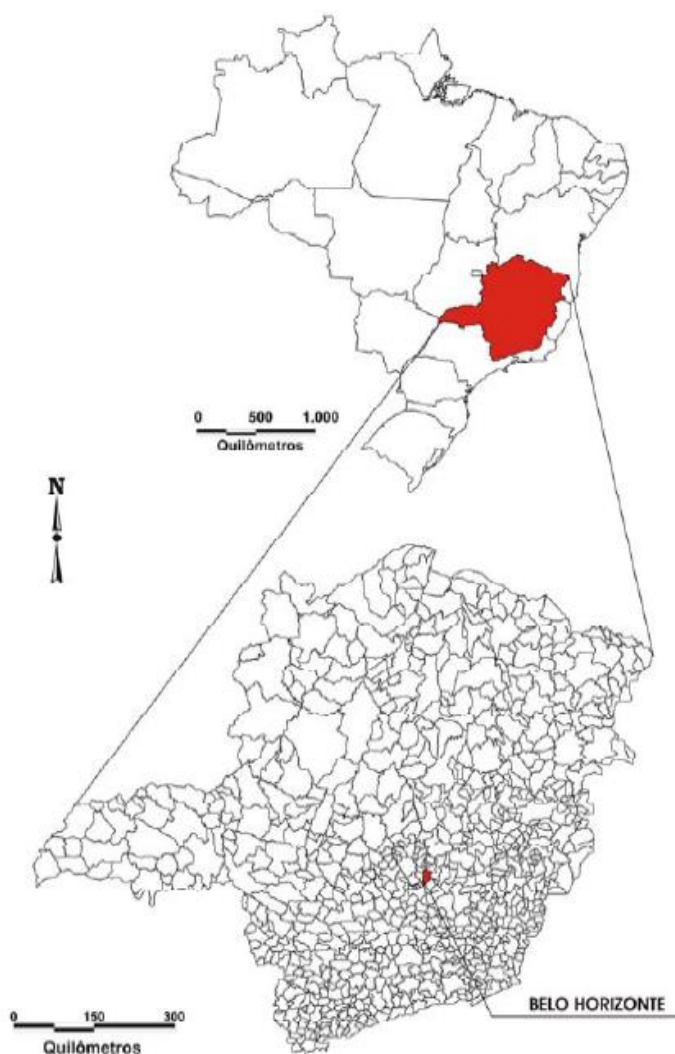


Figura 19- Localização do Município de Belo Horizonte no Estado de Minas Gerais – Brasil

Fonte: IBGE - Malha Digital do Brasil, 1996

O município de Belo Horizonte, capital do Estado de Minas Gerais, é a sexta cidade mais populosa do Brasil (2.513.451 habitantes) e importante centro econômico do país. Devido ao intenso processo de urbanização, a região metropolitana de Belo Horizonte (Figura 20) ocupa, em 2016, o terceiro lugar entre as aglomerações urbanas brasileiras, perdendo apenas para São Paulo e Rio de Janeiro (Análise de Vulnerabilidade Às Mudanças Climáticas Do Município de Belo Horizonte - Resumo Para Tomadores de Decisão, 2016).

A cidade de Belo Horizonte, fundada em 12 de dezembro de 1897, localiza-se na porção central do Estado, situado na região sudeste do Brasil. A sede do município localiza-se na latitude 19°55` Sul e na longitude 43°56` Oeste. A área total do município corresponde a 331km², e a divisão administrativa do município o divide em nove regionais e 148 bairros. A cidade situa-se no domínio do clima tropical de altitude. O vento predominante é de direção leste (Hirashima, 2010; Hirashima *et al.*, 2018).



Figura 20 – Representação esquemática da Região Metropolitana de Belo Horizonte

Fonte: PBH, 2016

Desde a Lei de Uso e Ocupação do Solo (LUOS) municipal de 1996, todo o território do município é considerado zona urbana (Arts. 4º e 5º da Lei n. 7.166, de 27 de agosto de 1996).

4.2 O clima Urbano de Belo Horizonte

Belo Horizonte está em uma região de clima tropical chuvoso, com estação seca distinta no inverno. O clima local é quente e úmido durante o verão e quente e seco durante o inverno. Os dados climatológicos do período de 1961 a 1990 pesquisados por Sad De Assis et al (1999) mostram que a temperatura média anual em Belo Horizonte é 21,1°C, com extremos de 36,9°C e 3,1°C nesse período. A temperatura média máxima no mês mais quente, em fevereiro, é de 28,8 ° C e a temperatura média mínima no mês mais frio, em julho, é de 13,1°C. As amplitudes térmicas mensais variam entre 8° (no verão) e 13° (no inverno). Já de acordo com as normais climáticas brasileiras de 1981 a 2010, Belo Horizonte tem uma média anual de temperatura de 21,8 ° C, umidade relativa do ar de 67%, velocidade anual do vento de 1,7 m /s (Krüger *et al.*, 2020).

Alguns estudos analisados por Ferreira *et al.* (2017) apontam o efeito da urbanização na alteração das condições do clima local. Em uma análise temporal de elementos climáticos, principalmente relacionados à taxa de ocupação do solo ao longo do primeiro século de fundação da cidade, demonstrado na Figura 21, foi possível verificar mudanças nas variáveis climáticas, que apontaram para um ligeiro aquecimento da atmosfera local e uma redução da umidade. Também foi observado que o aumento da verticalização e o adensamento do tecido urbano provocaram alterações na velocidade do vento, reduzindo sua magnitude na maior parte do território da cidade.

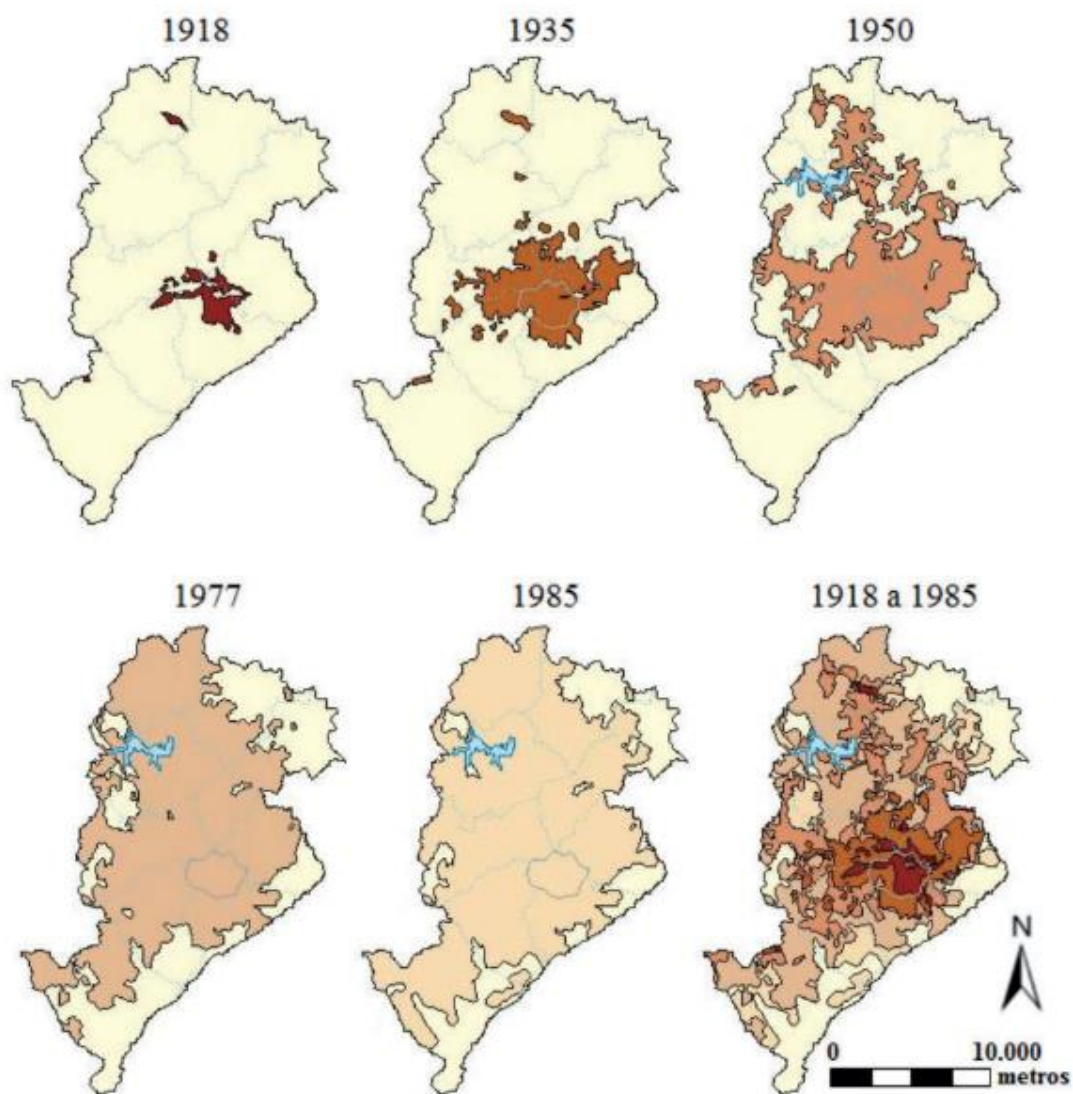


Figura 21 - Evolução da mancha urbana de Belo Horizonte, período 1918 a 1995.

Fonte: Ferreira *et al.*, 2017

4.2.1 Delimitação da área de estudo: Definição dos pontos críticos para análise de variáveis microclimáticas.

Em uma pesquisa para a construção do mapa climático e analítico de Belo Horizonte, Ferreira *et al.* (2017) constatou diversas camadas no balanço energético no perímetro urbano, exemplificados na Figura 22. Foi observado que os limites do município ao sul, sudeste e

nordeste, que concentram as maiores extensões de áreas verdes, favorece o resfriamento noturno e as condições de conforto térmico a nível de peões, por terem menor carga térmica. As áreas densamente urbanizadas por edificações, que correspondem ao centro da cidade, por sua vez exemplificadas pelas cores laranja, vermelho e marrom na Figura 22, têm baixa capacidade de resfriamento noturno, pois a carga térmica acumulada e o baixo potencial dinâmico favorecem o aquecimento das superfícies, o que pode levar a condições de maior desconforto humano.

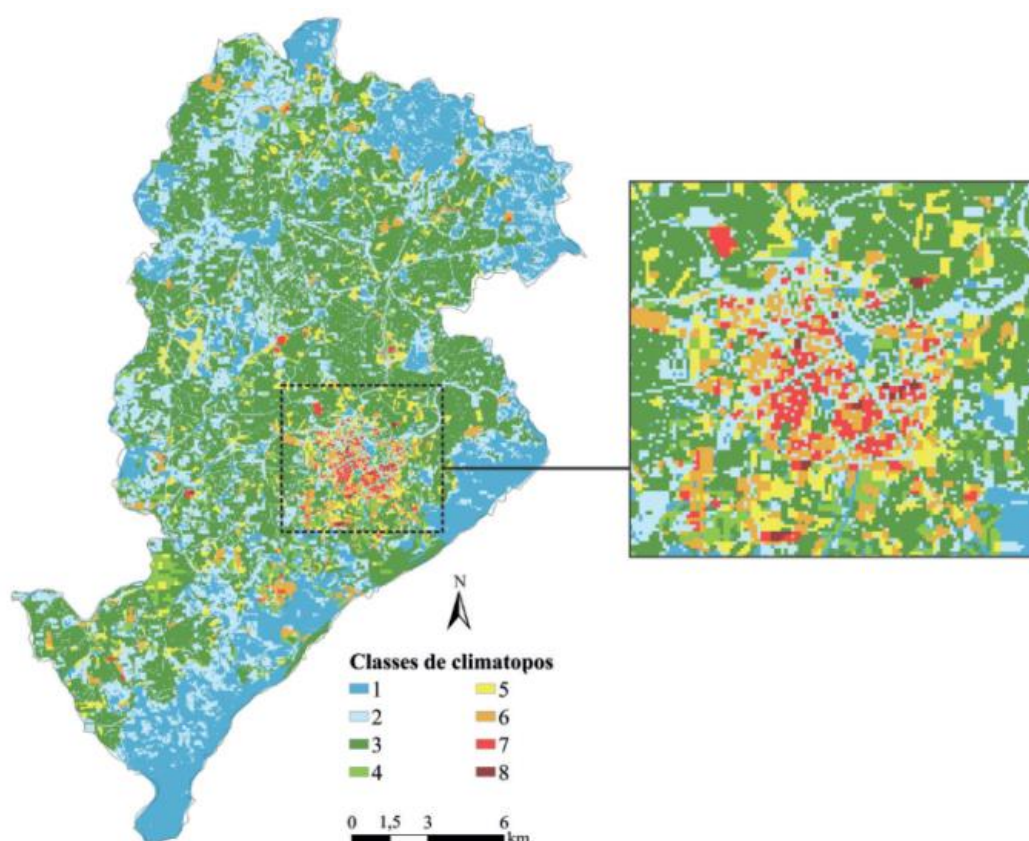


Figura 22 - Mapa climático analítico de Belo Horizonte. (A área ampliada corresponde à área central da cidade) Fonte: Ferreira *et al.*, 2017

Por estar no ponto mais central de Belo Horizonte e estar caracterizada dentro de uma zona considerada de alta carga térmica em estudo levantado por Ferreira *et al.* (2017), a Praça Sete de Setembro foi escolhida para este estudo. A praça está localizada na região do

hipercentro, no cruzamento das avenidas Afonso Pena e Amazonas e das ruas Rio de Janeiro e Carijós, a uma altitude média de 855m (Hirashima, 2010).



Figura 23 - Praça Sete de Setembro: área muito verticalizada, com poucas árvores, com menor fator de visão do céu, com solo menos permeável – quase todo pavimentado e sem fontes de água.

Fonte: Hirashima, 2010

A Praça Sete de Setembro pode ser considerada um “Cânion Urbano”, caracterizada pela escassa presença de vegetação e a ausência de fontes ou espelhos d’água (Figura 23), expressiva taxa de impermeabilização do solo e o pequeno fator de visão do céu como exemplificado em fotografia tirada com uma lente olho-de-peixe na Figura 24.



Figura 24- Visão do céu na Praça Sete de Setembro.

Fonte: Hirashima, 2010

4.2.2 Coleta de dados de variáveis climáticas para modelação

Todos os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O INMET representa o Brasil junto à Organização Meteorológica Mundial (OMM) e, por delegação desta Organização, é responsável pelo tráfego das mensagens coletadas pela rede de observação meteorológica da América do Sul e os demais centros meteorológicos que compõem o Sistema de Vigilância Meteorológica Mundial (INMET, 2020).

Os dados coletados, como a seguir na Tabela 2, serão utilizados na simulação computacional.

Tabela 2 - Dados meteorológicos obtidos no site do INMET para simulação

DATA	HORA (UTC)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	TEMPERATURA MINIMA (°C)	UMIDADE. REL. MAXIMA (%)	UMIDADE. REL. MINIMA (%)	VENTO (m/s)
29/01/2010	14:00	25,5	23,7	67	60	3,7
29/01/2010	15:00	27,3	25,3	64	57	3,2
29/01/2010	16:00	27,7	25,9	62	54	3,1
29/01/2010	17:00	29	26,4	60	52	2,3
29/01/2010	18:00	29,1	27,8	58	52	3,3
		27,72	25,82	62,2	55	3,12

O Banco de Dados Meteorológicos do INMET já incorporou, de forma digital, em seu acervo, informações diárias coletadas desde 1961. A rede de estações meteorológicas automáticas utiliza o que há de mais moderno internacionalmente. Os dados coletados por essa rede são disseminados, de forma democrática e gratuita, em tempo real no site oficial do INMET (INMET, 2020).

4.3 Etapa de modelação: Simulação computacional do Microclima

Após a compreensão da teoria e da prática, esta fase caracteriza-se pelo processo informático de desenvolvimento de metodologia de interpretação e simulação do ambiente urbano em diferentes cenários. Ou seja, os dados coletados na área de estudo serão inseridos nos simuladores e os seus parâmetros serão ajustados até que os resultados obtidos correspondam à realidade de forma adequada. Para avaliar objetivamente o nível de conforto térmico num espaço, índices térmicos são comumente derivados de quatro parâmetros físicos fundamentais e necessários para a modelação: temperatura do ar (T), humidade relativa (RH), velocidade do ar (v), e temperatura radiante média (MRT).

O programa foi desenvolvido por Bruse e Fleer (1998) e baseia-se nas leis da termodinâmica e dinâmica dos fluidos para simular as interações entre o edifício, a superfície e a vegetação, a partir da modelagem tridimensional do cenário e das características climáticas da área de estudo. Assim, o software permite a análise dos impactos de intervenções urbanas em

microescala, a partir da especificação de materiais de solo, características da construção e presença da vegetação.

4.3.1 Área simulada

No âmbito do software, é modelada a área de 40.000 m², resultante de um quadrilátero de 200 metros de lado, configurando o cenário. Esta medida refere-se ao tamanho máximo útil na versão gratuita do software ENVI-met. Foi utilizada a área assinalada na Figura 25 como base para a modelação do arquivo de simulação.

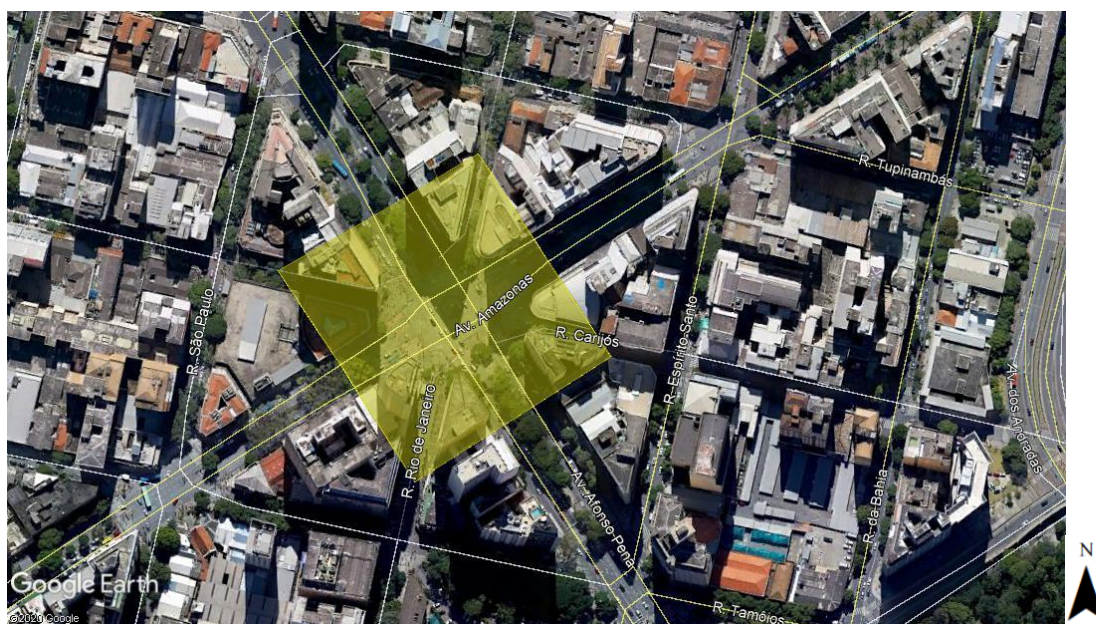


Figura 25 - Imagem aérea da área a ser utilizada em simulação

Fonte: Google Earth

Relativamente à composição da geometria construtiva circundante à Praça Sete de Setembro, foram destacados e selecionados para a simulação os edifícios na Figura 26.



Figura 26 - Edifícios circundantes a Praça Sete de Setembro selecionados para a simulação

Para composição do cenário no processo de modelação da malha urbana, na Tabela 3, foram consideradas de forma aproximada, as respectivas alturas para os edifícios existentes na modelação tridimensional em software ENVI-met.

Tabela 3 - Medidas de edifícios existentes para a modelação

Edifício	Altura aproximada
1	14m
2	60m
3	70m
4	70m
5	24m
6	30m
7	60m
8	60m

Para a configuração dos parâmetros gerais necessários para a simulação da área de estudo, foram considerados os dados a seguir na Tabela 4:

Tabela 4 - Configurações utilizadas para a modelação

Descrição	Métrica utilizada
Location	Latitude -19.92 / Longitude -43.94
Grid Geometry in meter	X=4 y=4 z=4
Model Rotation	354
Georeferency	Level 852
Default settigns	Wall: Concrete wall hallow block Roof: Concrete wall filled block
Nesting grids	18
Soil A/D	Sandy Soil
Vegetation	Legacy / Hedge and others / 15m
Roads and paviments	Concrete Grey

Após a simulação computacional, faz-se a extração dos mapas com os resultados para 15h para o período climático quente-seco de Belo Horizonte, com o auxílio dos plugins Biomet e LEONARDO. Relativamente aos dados simulados, foram utilizados os dados da Tabela 2, obtidos através do portal do Instituto de Nacional de Metereologia. A simulação foi feita iniciando-se às 14h e com o término às 18h. Foi utilizada uma média matemática dos valores obtidos no turno da tarde para a simulação.

Por se tratar de uma simulação que envolve a utilização de fachadas verdes, com substrato de origem no solo, o Edifício do UAI, no destaque em amarelo na Figura 27 foi o escolhido para receber esta infraestrutura verde.

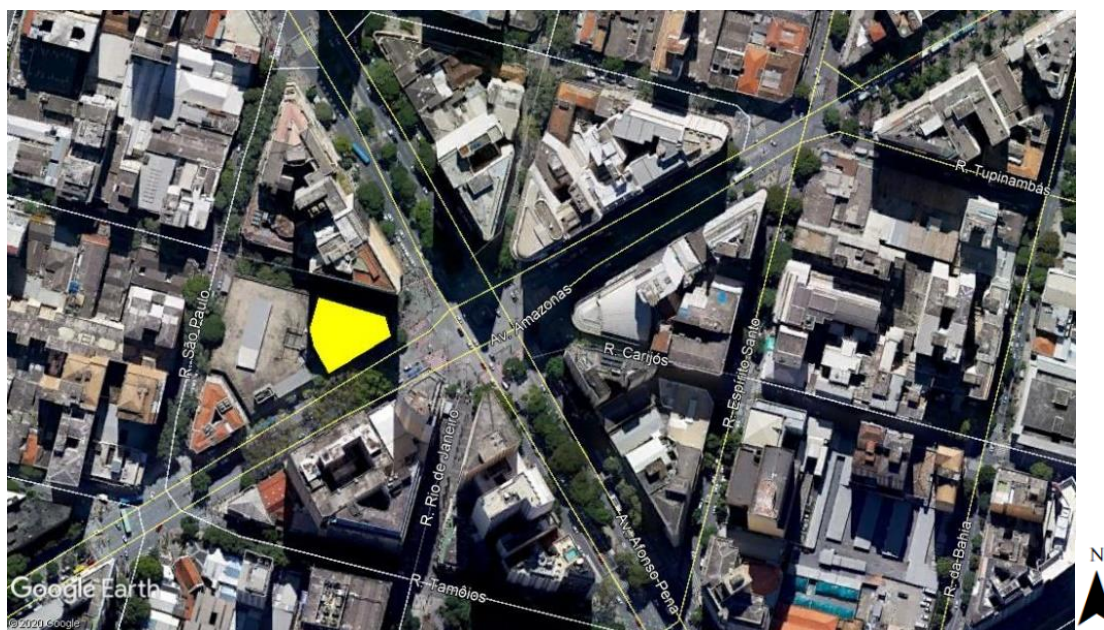


Figura 27 - Edifício UAI em destaque a ser modelado com fachadas verdes

Fonte: Google Earth

O Edifício possui apenas 14m de altura, encontra-se em um ponto com menor densidade vegetal e entre dois edifícios de aproximadamente 60m, como pode-se verificar na figura Figura 28 . Em estudo realizado por Hirashima (2020), com medições feitas *in loco*, pode-se perceber que o ponto de maior carga térmica encontrava-se no entorno imediato deste edifício.



Figura 28 - Edifício UAI ao centro da imagem

Fonte: Google Street View

4.4 Síntese

Neste capítulo foram abordadas as características principais que delimitaram a escolha da zona de estudo. Foram definidos os pontos críticos e os dados necessários para a análise das variáveis microclimáticas a serem simuladas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos das simulações realizadas para a área de estudo utilizando o ENVI-met tendo por base os dados utilizados para a modelagem da malha urbana a ser simulada: temperatura do ar (T), humidade relativa (RH), velocidade do ar (v). As simulações foram realizadas no período do verão no hemisfério Sul, correspondendo ao dia 29 de janeiro de 2010, sendo utilizados os dados meteorológicos do Instituto Nacional de meteorologia (INMET 2020), a seguir como base referencial o estudo realizado por Hirashima (2018). Os gráficos foram gerados para um dos três horários que seguem a recomendação da Organização Mundial de Meteorologia (OMM) para estudos de clima urbano: 09h, 15h e 21h, representando os turnos manhã, tarde e noite, respectivamente. Nesta pesquisa foi simulado o horário das 15h. A análise de conforto térmico desta pesquisa teve como base a Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) de Höppe (1999) e é apresentada em forma de gráfico de manchas distribuídas espacialmente no nível do pedestre. Como resultados são apresentados os gráficos obtidos após simulação do cenário existente e o cenário proposto com as fachadas verdes.

5.1 Extração e análise de dados

Para a análise dos dados de conforto, utiliza-se o parâmetro de conforto térmico Physiological Equivalent Temperature (PET) ou Temperatura Fisiológica Equivalente quando traduzido para português, desenvolvido por Höppe (1999), que considera a fisiologia do corpo humano em condições de estabilidade e as variáveis climáticas da área de estudo para avaliar o balanço térmico do corpo conforme Tabela 5, e poderão ser complementados com a análise de temperatura e umidade relativa do ar. O software ENVI-met 4.4.5 utiliza como padrão para extração de dados de PET, um ser humano com as características definidas pela ISO 7730/2005: homem com 35 anos de idade, 75 kg, altura de 1,75m e taxa metabólica igual a 86,21 W/m².

Tabela 5 - Intervalos do índice térmico PET para diferentes graus de percepção térmica dos seres humanos, considerando produção interna de calor de 80W e resistência térmica da vestimenta

PMV	PET (°c)	Percepção térmica	Percepção fisiológica
-3,5	abaixo de 4	Muito frio	Extremo estresse de frio Forte
-2,5	4 a 8	Frio	Forte estresse de frio
-1,5	8 a 13	Pouco frio	Moderado estresse de frio Leve
-0,5	13 a 18	Ligeiramente frio	Leve estresse de frio
0	18 a 23	Confortável	Não há estresse térmico
0,5	23 a 29	Ligeiramente calor	Leve estresse de calor
1,5	29 a 35	Pouco calor	Moderado estresse de calor
2,5	35 a 41	Calor	Forte estresse de calor
3,5	acima de 41	Muito Calor	Extremo estresse de calor

5.2 Validação dos dados

A validação dos dados ocorre quando se faz a análise crítica dos resultados para verificação da margem de erro. Neste sentido, por falta de um sistema de validação do software ENVI-met, é feita a comparação dos dados simulados referentes à temperatura e umidade relativa do ar extraídos programa e os dados históricos registrados pela estação do INMET para o dia simulado neste estudo, às 12h e 18h visto que são estes os horários disponibilizados pelo instituto.

5.3 Modelação

Para a modelagem desta simulação, foi necessário considerar todas as características físicas da área de estudo. Foram levantadas medidas aproximadas das edificações, o tipo de cobertura do solo e a contabilização da vegetação existente. Para simplificar a modelação, foram considerados os revestimentos cimentícios como material das fachadas dos edifícios, bem como os telhados também revestidos por telhas cimentícias. Tanto a vegetação escaladora da fachada verde quanto as árvores nas vias públicas, foram considerados

padrões pré configurados definidos pelo software Envi_Met. Após a recolha desses dados, fez-se a simplificação do cenário para a simulação, como pode ser visto na Figura 29.

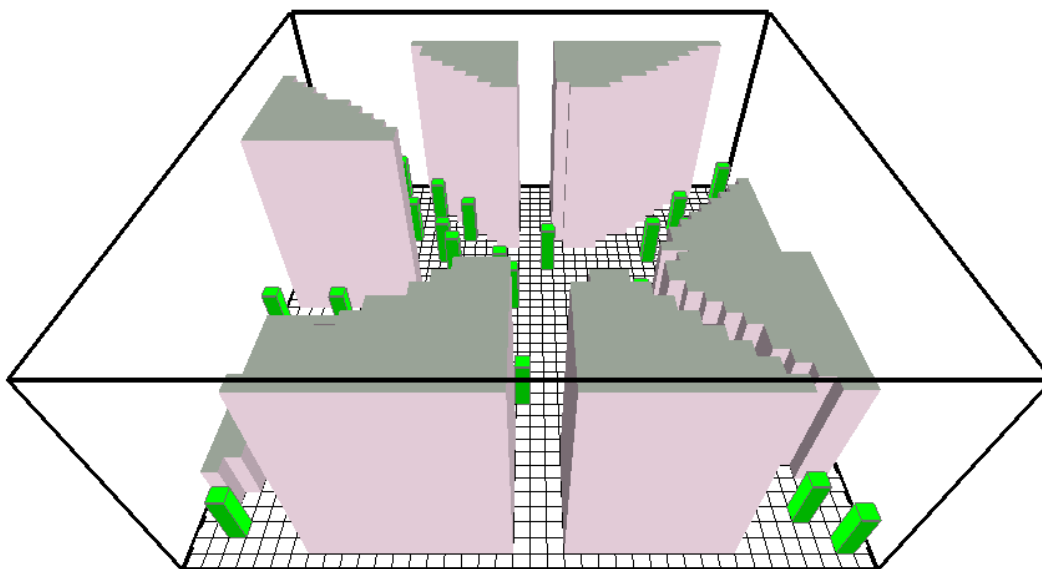


Figura 29 - Modelagem do cenário de estudo

Em seguida, posiciona-se a área de estudo da forma mais ortogonal possível, o que facilita a modelagem no software, que é realizada em uma malha quadriculada de 50 x 50 grids, onde cada grid corresponde a quatro metros. Para correção do norte geográfico, é necessário inserir o valor do grau de rotação do Norte no ENVI-met, neste caso, foi-se rotacionado 6º a imagem para modelação, como na Figura 30.

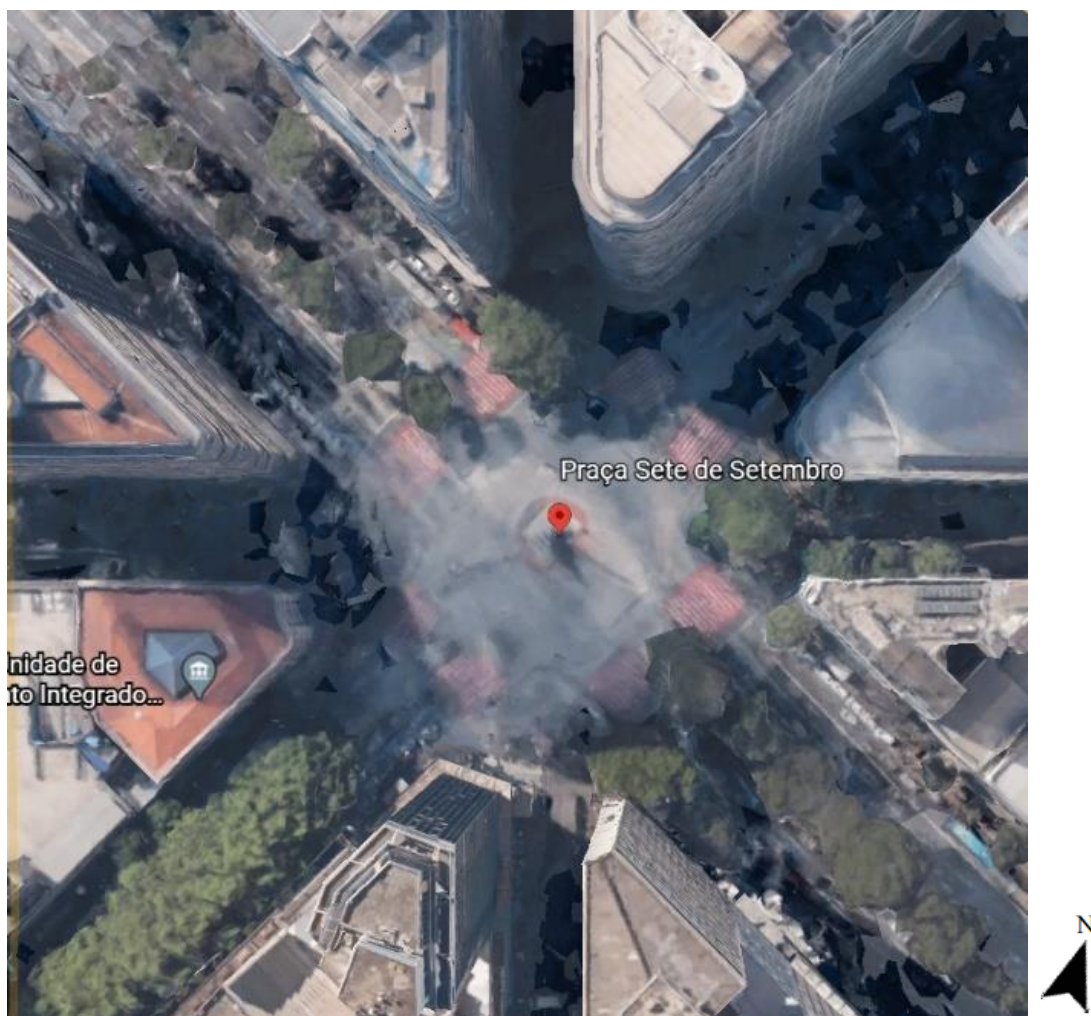


Figura 30- Imagem da área utilizada para simulação

Fonte: Google Earth

5.4 Simulações

As simulações foram feitas em duas etapas. A primeira em espaço real, com inserção da temperatura, humidade relativa do ar e vento.

5.4.1 Simulação do Cenário Real

No primeiro cenário de simulação, exemplificado na Figura 31, percebe-se uma maior concentração de calor no Edifício do UAI (quadrante inferior esquerdo). Possivelmente,

deve-se ao fato de ser um prédio com maior incidência solar e com menor fator de sombra proveniente dos prédios circundantes.

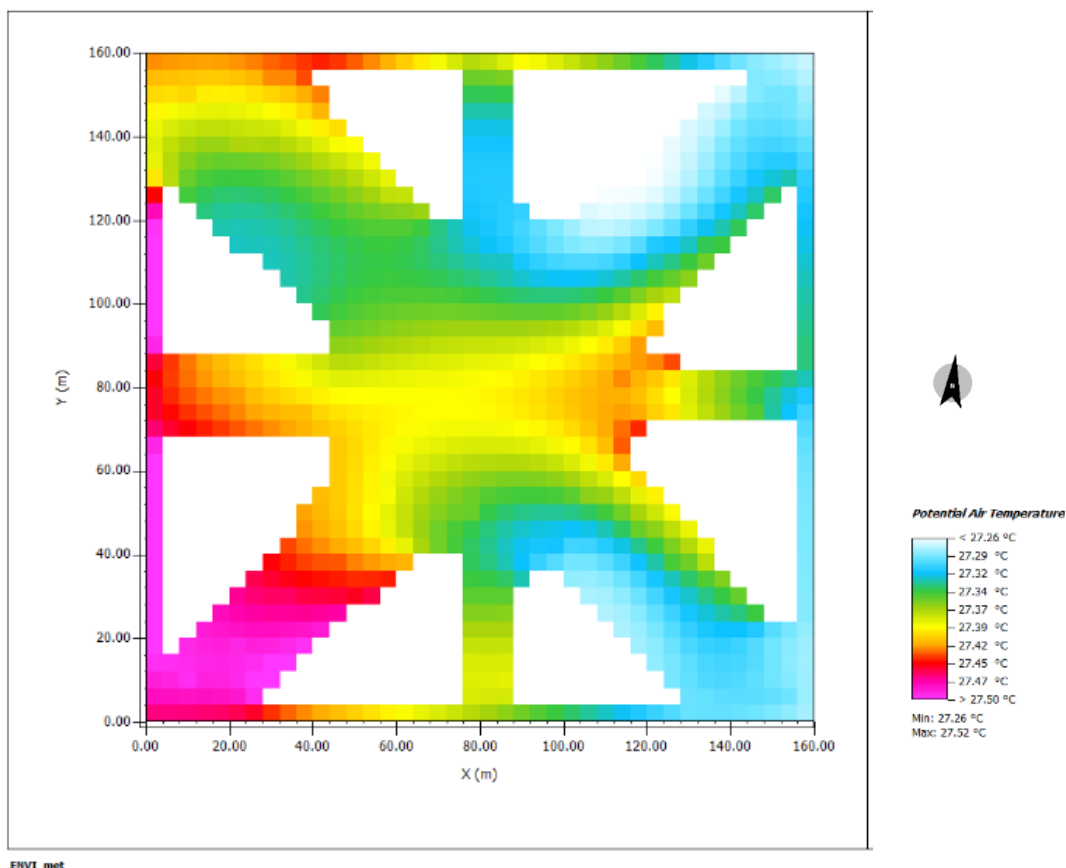


Figura 31 - Modelação de Cenário Real

5.4.2 Simulação do Cenário com adição de fachadas verdes

Na segunda modelagem, inseriu-se a vegetação vertical do tipo escaladora no Edifício do UAI, que possui apenas 3 pisos, como pode ser visto na Figura 32, sendo o prédio menor no centro da imagem, circundado por outros 2 prédios de aproximadamente 60m de altura.



Figura 32 - Praça Sete de Setembro com Edifício UAI ao fundo

Fonte: Google Earth

Para às 15h, observa-se grande melhora na percepção térmica para o cenário com acréscimo de vegetação na Figura 33. Percebem-se apenas que áreas circundantes ao Edifício do UAI (quadrante inferior esquerdo) mantém-se com maior acumulação de calor tanto no cenário original quanto com acréscimo de vegetação. Porém a vegetação melhora o conforto térmico no entorno imediato da fachada verde. Também é possível perceber uma melhora no quadrante superior esquerdo, bem como uma leve melhora de um modo geral nos demais quadrantes.

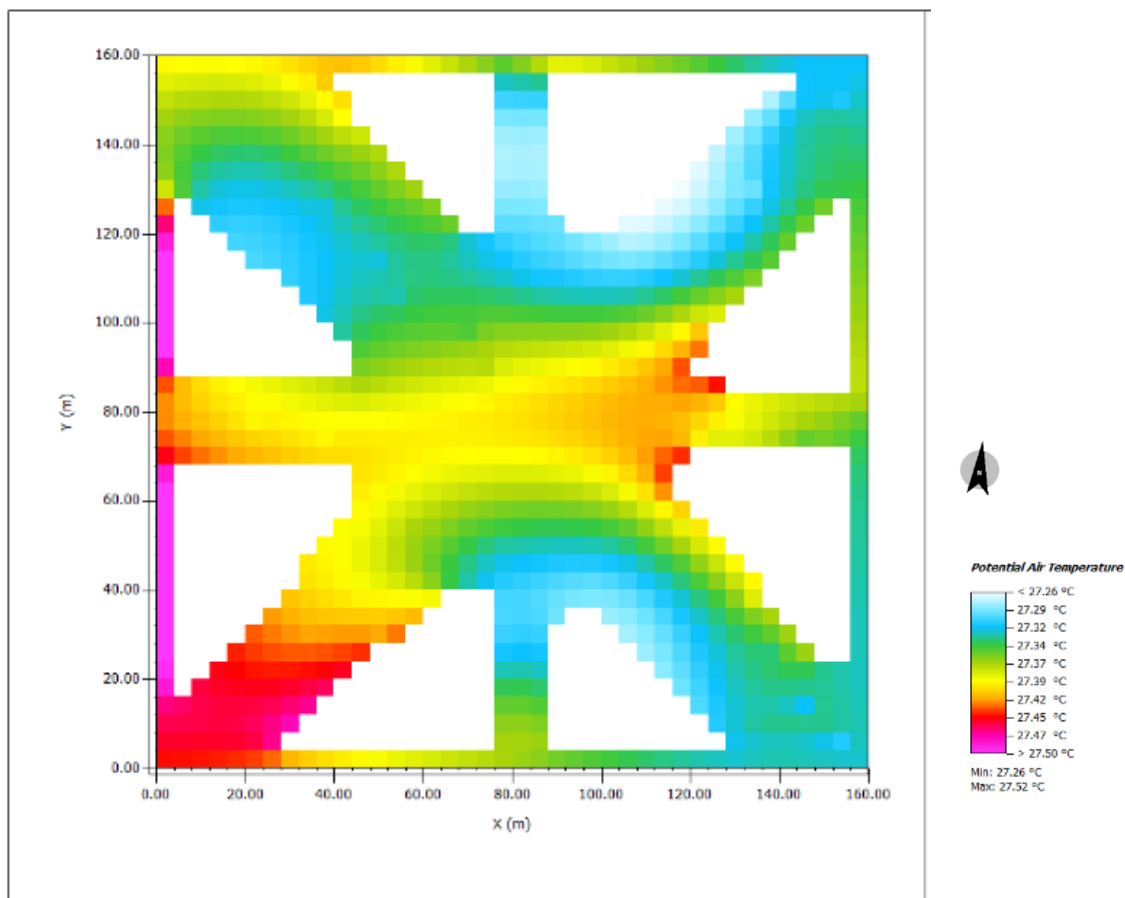


Figura 33 - Modelação do Cenário com Fachadas Verdes

5.5 Síntese

Neste capítulo foram apresentados os dados utilizados para a modelagem da malha urbana a ser simulada: temperatura do ar (T), humidade relativa (RH), velocidade do ar (v). Foram descritos de forma sucinta como foi modelado a área de estudo em software e apresentados os gráficos obtidos após simulação do cenário existente e o cenário proposto com as fachadas verdes.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas últimas décadas, os eventos de calor extremo (EHE) levaram a altas taxas de mortalidade nas cidades, à medida que as populações urbanas cresceram dentro da malha urbana já consolidada.

Com a urbanização em crescimento, o espaço urbano modificou-se rapidamente. As superfícies modificadas do espaço horizontal disponível levam à formação de microclimas urbanos distintos, especialmente em zonas centrais de grandes aglomerados urbanos, denominados “canions urbanos”, onde ocorrem as chamadas “ilhas de calor urbano”. Como estratégia de mitigação para a formação de “ilhas de calor” e atenuação dos eventos de calor extremo em contexto urbano, este trabalho buscou analisar através de diversas pesquisas previamente realizadas, como as infraestruturas verdes urbanas podem contribuir para melhorar e restaurar um ambiente urbano mais adaptado à vivência das pessoas. Neste sentido, as fachadas verdes surgem como uma alternativa eficaz para a atenuação das ilhas de calor em cidades que já possuem sua malha urbana consolidada e pouco espaço horizontal para vegetação. Importante ressaltar que a redução das temperaturas nos espaços urbanos é um fator a se considerar, pois melhoram o desempenho dos edifícios face a necessitarem de menor consumo de energia para arrefecimento dos espaços interiores dessas edificações.

A presente dissertação buscou avaliar e exemplificar como a simulação computacional microclimática pode quantificar a contribuição do aumento da vegetação em espaço urbano consolidado para a promover o conforto térmico do pedestre, nomeadamente as fachadas verdes. O uso do software ENVI-met mostrou-se eficaz para as análises realizadas, apesar das limitações da versão utilizada no estudo realizado (gratuita-basic), tais como no que se refere a maiores parâmetros da área de análise. Ainda assim foi possível perceber que o acréscimo de vegetação contribuiu de forma a amenizar a carga térmica na área de estudo.

As simulações realizadas para a Praça Sete de Setembro na cidade de Belo Horizonte, no Brasil, demonstraram a eficiência das fachadas verdes em melhorar o microclima urbano em espaço consolidado e que não teria capacidade de receber arborização urbana de forma diferente face às características que possuem. Dos resultados obtidos, pode-se perceber ligeiro decréscimo no nível PET na área de estudo, onde se verificaram melhorias no conforto

térmico na zona imediatamente circundante ao edifício em que se aplicou a solução em fachadas verdes. O cenário estudado, e tendo em conta os resultados obtidos com a implantação de vegetação, demonstrou elevado potencial como uma possível opção para a redução de temperaturas em diversos contextos e meios urbanos e, conseqüentemente, ser uma forma efetiva de nas zonas centrais de grandes aglomerados urbanos, se conseguir amenizar o efeito das “ilhas de calor” resultantes das alterações climáticas.

6.1 Considerações futuras

Estudos como este podem colaborar para o desenvolvimento da pesquisa aplicada ao contexto urbano, com adequação dos aspectos climáticos e de vegetação, ainda pouco desenvolvidos e disseminados junto ao poder público.

Outros tipos de infraestruturas verdes, tais como telhados verdes, paredes verdes e corredores verdes podem vir a ser estudados como estratégia eficiente para mitigação das alterações climáticas em grandes centros urbanos. Não só no âmbito do conforto térmico, mas também a nível de poluição urbana, nomeadamente no estudo da absorção de materiais particulados poluentes, ou quanto à qualidade acústica em termos de ruídos urbanos.

O software ENVI-met, em sua versão paga, possui diversos recursos que permitem a modelagem de espécies arbóreas a partir da inserção de dados como o tipo de folha, fixação de CO₂, albedo, evapotranspiração, profundidade e diâmetro das raízes e altura da árvore. Portanto, estudos mais profundos podem ser viabilizados acerca da questão ambiental. Recomenda-se alargar a pesquisa em todas as estações climáticas do ano e em três horários que estejam de acordo com a recomendação da Organização Mundial de Meteorologia (OMM) para estudos de clima urbano: 09 h, 15h e 2 h, que representam respectivamente os turnos manhã, tarde e noite.

Outro ponto importante a se ressaltar atrela-se à sustentabilidade dos edifícios, ao se mensurar eficiência energética no interior dos prédios após a utilização de barreira física vegetal, a qual recebe menor carga térmica em seu envelope exterior. Quantificar a

economia energética em grandes estruturas é de extrema importância para estimular e incentivar sua aplicabilidade.

Estudos futuros acerca da utilização de infraestruturas verdes também podem ser ferramentas na tomada de decisão quanto à reabilitação urbana e concepção de novos espaços. Seja na estrutura urbana, caracterizada pelas dimensões dos edifícios, os espaços entre eles e a largura das ruas, seja pela adaptação em espaços já existentes consolidados, ou com restrições quanto ao reconhecimento de patrimônio.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Besir, A. B., & Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(July 2017), 915–939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- Brown, N.M. (2008). Building With Turf
Besir, A. B., & Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(July 2017), 915–939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M., & Cabeza, L. F. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, 111, 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>
- da Silva, P. W. S. (2018). *O Impacto das Fachadas Verdes nos microclimas urbanos*.
- de Jesus, M. P., Lourenço, J. M., Arce, R. M., & Macias, M. (2017). Green façades and in situ measurements of outdoor building thermal behaviour. *Building and Environment*, 119, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.041>
- Ferreira, D. G., Assis, E. S. de, & Katzschner, L. (2017). Construção de um mapa climático analítico para a cidade de Belo Horizonte, Brasil. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 9(suppl 1), 255–270. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.009.supl1.ao01>
- Francis, R. A., & Lorimer, J. (2011). Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management*, 92(6), 1429–1437. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.012>
- Gandy, M. (2010). The ecological facades of Patrick Blanc. *Architectural Design*, 80(3), 28–33. <https://doi.org/10.1002/ad.1071>
- Hirashima, S. Q. da S. (2010). *Calibração do índice de conforto térmico temperatura fisiológica equivalente (PET) para espaços abertos do Município de Belo Horizonte, MG*.
- Hirashima, S. Q. da S., Katzschner, A., Ferreira, D. G., Assis, E. S. de, & Katzschner, L. (2018).

- Thermal comfort comparison and evaluation in different climates. *Urban Climate*, 23, 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.007>
- Hunter, A. M., Williams, N. S. G., Rayner, J. P., Aye, L., Hes, D., & Livesley, S. J. (2014). Quantifying the thermal performance of green façades: A critical review. *Ecological Engineering*, 63, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.021>
- Köhler, M. (2008). Green facades-a view back and some visions. *Urban Ecosystems*, 11(4), 423–436. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0063-x>
- Krüger, E. L., Silva, T. J. V., da Silveira Hirashima, S. Q., da Cunha, E. G., & Rosa, L. A. (2020). Calibrating UTCI'S comfort assessment scale for three Brazilian cities with different climatic conditions. *International Journal of Biometeorology*. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01897-x>
- Lee, S. H. (2011). Further Development of the vegetated urban canopy model including a grass-covered surface Parametrization and photosynthesis effects. *Boundary-Layer Meteorology*, 140(2), 315–342. <https://doi.org/10.1007/s10546-011-9603-7>
- Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., & Pearlmutter, D. (2012). Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geoscientific Model Development*, 5(6), 1377–1393. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1377-2012>
- Lindberg, F., & Grimmond, C. S. B. (2011). The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: Model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(3), 311–323. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0382-8>
- Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 863–871. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>
- Meerow, S., & Newell, J. P. (2019). Urban resilience for whom, what, when, where, and why? *Urban Geography*, 40(3), 309–329. <https://doi.org/10.1080/02723638.2016.1206395>

- Morakinyo, T. E., Lai, A., Lau, K. K. L., & Ng, E. (2019). Thermal benefits of vertical greening in a high-density city: Case study of Hong Kong. *Urban Forestry and Urban Greening*, 37(November 2017), 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.010>
- Morille, B., Lauzet, N., & Musy, M. (2015). SOLENE-microclimate: A tool to evaluate envelopes efficiency on energy consumption at district scale. *Energy Procedia*, 78, 1165–1170. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.088>
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>
- Análise de vulnerabilidade às mudanças climáticas do Município de Belo Horizonte - Resumo para tomadores de decisão, (2016).
- Ramzy, N. S. (2015). Biophilic qualities of historical architecture: In quest of the timeless terminologies of “life” in architectural expression. *Sustainable Cities and Society*, 15, 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.11.006>
- Redon, E. C., Lemonsu, A., Masson, V., Morille, B., & Musy, M. (2017). Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0. *Geoscientific Model Development*, 10(1), 385–411. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-385-2017>
- Saaroni, H., Amorim, J. H., Hiemstra, J. A., & Pearlmutter, D. (2018). Urban Green Infrastructure as a tool for urban heat mitigation: Survey of research methodologies and findings across different climatic regions. *Urban Climate*, 24(October 2017), 94–110. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.02.001>
- Sad De Assis, E., & Barros Frota, A. (1999). Urban bioclimatic design strategies for a tropical city. *Atmospheric Environment*, 33(24–25), 4135–4142. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00155-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00155-7)
- Salata, F., Golasi, I., Petitti, D., de Lieto Vollaro, E., Coppi, M., & de Lieto Vollaro, A. (2017).

Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: An analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment. *Sustainable Cities and Society*, 30, 79–96.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.006>

Sarrat, C., Lemonsu, A., Masson, V., & Guedalia, D. (2006). Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmospheric Environment*, 40(10), 1743–1758.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.11.037>

Silva, B. G. (2020). *SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS DO DISTRITO FEDERAL : A CONTRIBUIÇÃO DA VEGETAÇÃO INTRAURBANA.*

Soderlund, J., & Newman, P. (2015). Biophilic architecture: a review of the rationale and outcomes. *AIMS Environmental Science*, 2(4), 950–969.
<https://doi.org/10.3934/environsci.2015.4.950>

Sousa, R. B. de. (2012). *Jardins Verticais : um contributo para os espaços verdes urbanos e oportunidade na reabilitação do edificado.* 188.
<http://recil.grupolusofona.pt/handle/10437/3078>