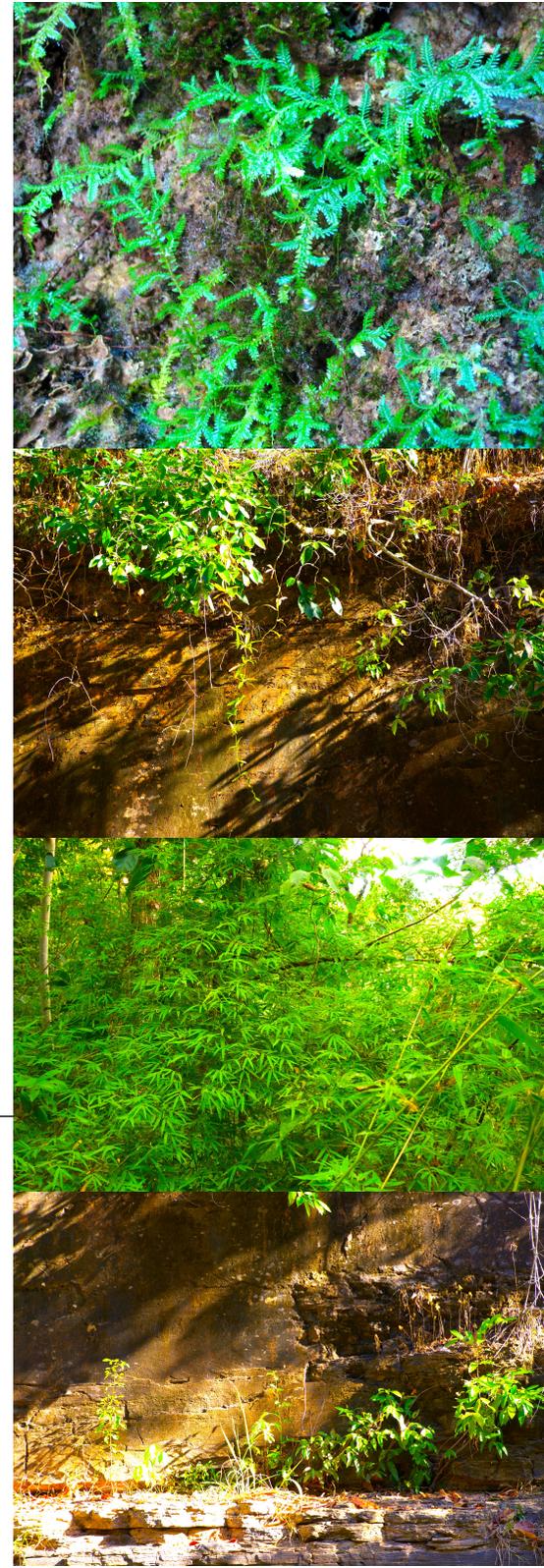


SIMULAÇÃO TÉRMICA

de **PAREDES VERDES**

Compostas de Vegetação Nativa do **CERRADO**

Autor - Pedro Dias Boa Sorte Orientação - Marta Adriana Bustos Romero



Universidade de Brasília

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Programa de Pesquisa e Pós-Graduação

Mestrado em Arquitetura e Urbanismo

SIMULAÇÃO TÉRMICA DE PAREDES VERDES COMPOSTAS DE VEGETAÇÃO NATIVA DO CERRADO.

Autor: Pedro Dias Boa Sorte

Orientadora: Prof^a Dr^a Marta Adriana Bustos Romero

Brasília

2016

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SS0714 Sorte, Pedro Dias Boa
s Simulação Térmica de Paredes Verdes Compostas de
Vegetação Nativa do Cerrado / Pedro Dias Boa Sorte;
orientador Marta Adriana Bustos Romero. -- Brasília,
2016.

120 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Arquitetura e
Urbanismo) -- Universidade de Brasília, 2016.

1. Parede Verde. 2. Vegetação Nativa do Cerrado.
3. Avaliação Térmica. I. Romero, Marta Adriana
Bustos, orient. II. Título.

Termo de Aprovação

Orientadora Profª Drª Marta Adriana Bustos Romero

Prof Dr Caio Frederico e Silva

Prof Dr Rodrigo Studart Corrêa

Dedicatória

A todos que anseiam investigar novos territórios,
que desbravam o desconhecido, que se aventuram no incógnito.

Agradecimentos

À minha pequena e zelosa família, em especial aos meus pais, Denise Vourakis Dias e Antônio Horácio Boa Sorte, por compreenderem minha falta de tempo, e à minha tia, Prof^a Dr^a Rosana Fernandes Otto, pelos conselhos.

À minha amorosa companheira, Elaine Paulucio Porfirio, por todo zelo e disposição.

À minha orientadora, Marta Adriana Bustos Romero, pela confiança, paciência e pelo desenvolvimento que me proporcionou.

Aos professores do Instituto de Ciências Biológicas, Cristiane da Silva Ferreira e Augusto Cesar Franco, por toda a atenção e auxílio durante a coleta de dados e ao André Osório Ribeiro de Souza Gomes, por todo apoio no processo de germinação.

A todos os funcionários do Instituto de Ciências Biológicas e da secretaria do Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo que me auxiliaram durante este período.

Lista de Figuras

Figura 1 – Espectro Eletromagnético	31
Figura 2 – Energia Radiante e a Atenuação Atmosférica	32
Figura 3 - Nebulosidade e Incidência Solar	32
Figura 4 – Latitude e Incidência Solar	34
Figura 5 – Massas de Terra e a Sombra de Chuva	38
Figura 6 – Métodos de Fixação de Vegetação	47
Figura 7 – Casa de Comércio e Industria de Picardie	48
Figura 8 – Casa de Comércio e Industria de Picardie	48
Figura 9 – Sombra Verde	48
Figura 10 – Casa CorManca	48
Figura 11 – Ideo Morph 38	48
Figura 12 – Rua Cecil 158	48
Figura 13 – Balanço Térmico Humano	52
Figura 14 – Distribuição Geográfica do Cerrado	55
Figura 15 – Edificação em Brasília com Parede Verde sem Vegetação Nativa	57
Figura 16 – Zona Bioclimática 4	60

Figura 17 – Caracterização do Clima da Zona Bioclimática 4	61
Figura 18 – Fluxograma de Materiais e Métodos	63
Figura 19 – IRGA Lci	74
Figura 20 - Medição com o IRGA Lci	75
Figura 21 – Exemplo de Caule Utilizado para Medição de LAD	76
Figura 22 – Scanner CI-202 CID Inc	76
Figura 23 – Sementes de <i>Arrabidaea pulchra</i>	77
Figura 24 – Câmara de Germinação tipo B.O.D Marconi	77
Figura 25 – Câmara de Germinação tipo B.O.D Marconi	78
Figura 26 – Germinação de <i>Cissus erosa</i>	78
Figura 27 – Plântula em Copo Plástico	79
Figura 28 – Indivíduo de <i>Cissus erosa</i> em Vaso Plástico	79
Figura 29 – Dados Climáticos Brasília Seca	81
Figura 30 – Área de Estudo com Malha, Edificação e Inserção de solo e Vegetação	82
Figura 31 – Edificação Modelada (preto), com Indicação da localização das Paredes Verdes (verde) e solo (cinza)	83
Figura 32 – <i>PLANTS.DAT</i> do ENVI-met	84
Figura 33 – Indivíduo de <i>Banisteriopsis anisandra</i> plantada em tronco como suporte	113
Figura 34 – Indivíduo de <i>Cissus erosa</i> plantada em treliça metálica como suporte	113

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Média do Comportamento Diário da Temperatura do Ar em ° C	90
Gráfico 2 – Média do Comportamento Diário da Umidade Relativa do Ar em %	91
Gráfico 3 – Variação da Temperatura do Ar em cada Fachada em Relação a Média do Horário 9h	93
Gráfico 4 – Variação da Umidade Relativa do Ar em cada Fachada em Relação a Média do Horário 9h	93
Gráfico 5 – Variação da Temperatura do Ar em cada Fachada em Relação a Média do Horário 12h	94
Gráfico 6 – Variação da Umidade Relativa do Ar em cada Fachada em Relação a Média do Horário 9h	94
Gráfico 7 – Variação da Temperatura do Ar em cada Fachada em Relação a Média do Horário 15h	95
Gráfico 8 – Variação da Umidade Relativa do Ar em cada Fachada em Relação a Média do Horário 15h	95
Gráfico 9 – Variação da Temperatura do Ar em cada Fachada em Relação a Média do Horário 18h	96
Gráfico 10 – Variação da Umidade Relativa do Ar em cada Fachada em Relação a Média do Horário 18h	96
Gráfico 11 – Variação da Temperatura do Ar em cada Fachada em Relação a Média do Horário 21h	97
Gráfico 12 – Variação da Umidade Relativa do Ar em cada Fachada em Relação a Média do Horário 21h	97
Gráfico 13 – Diferença da Temperatura do Ar Obtida por cada Espécie às 9h em Relação a Média do Horário	101
Gráfico 14 – Diferença da Umidade Relativa do Ar Obtida por cada Espécie às 9h em Relação a Média do Horário	101
Gráfico 15 – Diferença da Temperatura do Ar Obtida por cada Espécie às 12h em Relação a Média do Horário	102
Gráfico 16 – Diferença da Umidade Relativa do Ar Obtida por cada Espécie às 12h em Relação a Média do Horário	102

Gráfico 17 – Diferença da Temperatura do Ar Obtida por cada Espécie às 15h em Relação a Média do Horário	103
Gráfico 18 – Diferença da Umidade Relativa do Ar Obtida por cada Espécie às 12h em Relação a Média do Horário	103
Gráfico 19 – Diferença da Temperatura do Ar Obtida por cada Espécie às 18h em Relação a Média do Horário	104
Gráfico 20 – Diferença da Umidade Relativa do Ar Obtida por cada Espécie às 18h em Relação a Média do Horário	104
Gráfico 21 – Diferença da Temperatura do Ar Obtida por cada Espécie às 21h em Relação a Média do Horário	105
Gráfico 22 – Diferença da Umidade Relativa do Ar Obtida por cada Espécie às 21h em Relação a Média do Horário	105
Gráfico 23 – ACP de Semelhança Morfofisiológica	109
Gráfico 24 – Regressão Linear entre Temperatura do Ar e LAD	110
Gráfico 25 – Regressão Linear entre Umidade Relativa do Ar e LAD	110
Gráfico 26 – ACP de Influência na Temperatura do Ar	110
Gráfico 27 – ACP de Influência na Umidade Relativa do Ar	111

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Conteúdo por Capítulo e Fluxo de Trabalho	22
Tabela 2 – Absorção e Emissividade de Materiais de Superfície para Temperatura entre 10° C e 40° C	28
Tabela 3 – Coeficiente de Condutividade Térmica de Materiais	29
Tabela 4 – Calor Específico de Materiais	30
Tabela 5 – Porcentagem de Radiação Solar Incidente Refletida	35
Tabela 6 – Caracterização Climática de Brasília em Médias Anuais (1961 – 1990) entre 10° C e 40° C	60
Tabela 7 – Metodologia Aplicada nas Etapas e Fluxo do Estudo	64
Tabela 8 – <i>Plant Database</i> do ENVI-met	65
Tabela 9 – Descrição da Espécie <i>Banisteriopsis anisandra</i>	69
Tabela 10 – Descrição da Espécie <i>Cissus erosa</i>	70
Tabela 11 – Descrição da Espécie <i>Arrabidaea pulchra</i>	71
Tabela 12 – Situação dos Parâmetros do Analisados	73
Tabela 13 – <i>Plant Database</i> das Espécies Estudadas	85
Tabela 14 - Valores Absolutos por Horário e Fachada e Média do Horário para a Temperatura do Ar em °C	90
Tabela 15 - Valores Absolutos por Horário e Fachada e Média do Horário para a Umidade Relativa do Ar em %	91
Tabela 16 – Maiores e Menores Valores Obtidos para Temperatura e Umidade Relativa do Ar	100

Tabela 17 - Valores Absolutos de Temperatura do Ar e Umidade Relativa do Ar	99
Tabela 18 - Espécies com Melhor Desempenho nos Horários e Fachadas	107
Tabela 19 – Taxa de Germinação (%) das Espécies Avaliadas	112
Tabela 20 – Taxa de Crescimento (mm/mês) das Espécies Avaliadas	112

Lista de Equações

Equação 1 – Condutividade Térmica	27
Equação 2 – Resistência Térmica	27
Equação 3 – Calor Específico	29
Equação 4 – Lei de Fourier	40
Equação 5 – Lei de Resfriamento de Newton	41
Equação 6 – Fluxo de Calor por Radiação	42
Equação 7 – Normalização	108
Equação 8 – Padronização	108

Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
CI	Conservation International
FAL	Fazenda Água Limpa
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IB	Instituto de Ciências Biológicas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IRGA	<i>Infrared Gas Analyzer</i>
LAD	<i>Leaf Area Density</i>
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONG	Organização Não Governamental
RECOR	Reserva Ecológica do IBGE
UnB	Universidade de Brasília
PP	Pontos Percentuais

Sumário

Introdução	19
1 Características Térmicas Gerais do Ambiente Construído e Natural e Suas Relações Térmicas com o Homem	25
1.1 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DO AMBIENTE CONSTRUÍDO	26
1.1.1 Absortância e Emissividade	27
1.1.2 Condutividade Térmica e Resistência Térmica	27
1.1.3 Calor Específico	29
1.2 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DO AMBIENTE NATURAL	30
1.2.1 Radiação e Incidência de Energia Térmica	31
1.2.2. Umidade Relativa do Ar e Precipitações	35
1.2.3 Ventos e Pressão Atmosférica	36
1.2.4 Demais Elementos Naturais Moderadores do Clima	37
1.3 RELAÇÃO TÉRMICA ENTRE OS AMBIENTES E O HOMEM	38

2 Paredes Verdes: Características e Adequação para a Flora e Clima do Cerrado	44
2.1 Paredes Verdes	46
2.2 Vegetação e Desempenho Térmico	50
2.3 Paredes Verdes e Ecologia Urbana	53
2.4 Características e Potencial da Vegetação do Cerrado	54
2.5 Clima de Brasília	59
3 Material e Métodos	62
3.1 ESCOLHA DAS ESPÉCIES VEGETAIS	67
3.1.1 Consulta ao Banco de Dados do Herbário do IB	67
3.1.2. Visita <i>in loco</i>	68
3.2 CONSIDERAÇÕES DO ENVI-MET	72
3.2.1 Análise dos Parâmetros Computacionais	72
3.3 COLETA DE DADOS	72
3.3.1 Coleta de Dados dos Parâmetros ENVI-met	72
3.3.2 Coleta de Dados para Cálculo do LAD	75

3.3.3 Coleta de Sementes	76
3.4 GERMINAÇÃO	77
3.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	80
3.5.1 Entrada de Dados	80
3.5.2 Simulação	85
3.5.3 Saída de Dados	85
4. Resultados e Discussão	87
4.1 Análise da Temperatura do Ar e da Umidade Relativa do Ar na Situação nos Horários	89
4.2 Análise da Temperatura do Ar e Umidade Relativa do Ar na Situação controle nas Fachada	92
4.3 Análise Comparativa do Desempenho Térmico de AP, BA e CE em Paredes Verdes	99
4.4 Análise Estatística	108
4.5 Germinação e Crescimento	112
5. Conclusão	114
6. Referências Bibliográficas	118

Resumo

A parede verde é um dispositivo utilizado como estratégia bioclimática e que possui o potencial de integrar a arquitetura com o entorno natural. Este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação do desempenho térmico de paredes verdes compostas por diferentes espécies vegetais, de hábito trepador, nativas do bioma Cerrado. A escolha de espécies ocorreu de acordo com características fisiológicas e morfológicas, tais como tolerância ao sol pleno e apelo paisagístico. A avaliação foi realizada por meio de simulação computacional com o uso do *software* ENVI-met 3.1. Os dados necessários para o estudo foram coletados com o uso do IRGA LCI e do *scanner* de área foliar da CID e inseridos no banco de dados de vegetação do programa. Além dos dados de vegetação, utilizaram-se na simulação, dados climáticos de Brasília-DF, uma malha de 40 m x 40 m, com edificações de 3 m x 1 m x 3 m e vegetação aderida em cada fachada. Os resultados demonstram que a espécie *Arrebidaea pulchra* possibilitou paredes verdes com menores temperaturas de ar e maiores taxas de umidade relativa do ar na maioria das situações, em comparação com as espécies *Banisteriopsis anisandra* e *Cissus erosa*. As taxas de germinação e crescimento foram mais favoráveis para *Cissus erosa*.

Palavras-chave: Parede Verde, Vegetação Nativa do Cerrado, Avaliação Térmica

Abstract

The green wall is a device used as a bioclimatic strategy and it's capable to integrate architecture with natural surroundings. This assignment aims to evaluate the thermal performance of green walls composed of different native climbing *Cerrado* vegetation. The results obtained for the simulations will serve of a comparison of the thermal performance between walls without vegetation cover and with each one of the species studied as well as clarifying the morphological and physiological characteristics that influences its thermal performance. The selection of species occurred according to light tolerance and landscape architecture potential. The evaluation was conducted by computer using the ENVI-met 3.1 simulation software. To fill up the ENVI-met 3.1 database an IRGA LCI was used and a CID leaf scanner. The new data were inserted in the plant database. The simulation area was formed by a 40 m x 40 m mesh with 4 buildings of 3 m x 1 m x 1 m, equally spaced 20 m apart and each one with vegetation in only one facade, North, South, East or West. The results demonstrate that species *Arrebidaea pulchra* compared with *Banisteriopsis anisandra* and *Cissus erosa* , enabled green walls with lower temperatures and higher air humidity rate of the air in most situations. The species *Cissus erosa* revealed higher germination and growth rates.

Keywords: Green Walls, Native Cerrado Vegetation, Thermal Evaluation

Introdução

A busca por soluções inovadoras para problemas que envolvem o ser humano e seu *habitat* é uma tarefa própria dos arquitetos. Essa questão envolve temas que variam desde a solução estrutural para uma edificação até o paisagismo local e, com o progresso da arquitetura, novas preocupações surgem e pedem por soluções adequadas.

Em resposta a essa preocupação, podemos citar o uso de novos materiais de origem natural ou reciclada, de alto desempenho térmico, como compostos isolantes feitos a base de vegetais e revestimentos ventilados que diminuem a condução de energia térmica para o interior de uma construção. Também há o desenvolvimento industrial que busca construir aparelhos climatizadores mais eficientes, ou seja, que realizem o mesmo trabalho com um menor gasto energético do que o modelo anterior.

Há, ainda, um crescente costume em se valorizar as características e riquezas naturais locais, como a preservação de áreas de vegetação nativa, uso dos materiais de construção de origem natural e local, bem como as técnicas construtivas.

Com o objetivo de diminuir o impacto ambiental, a busca por

melhor desempenho térmico através do uso de riquezas naturais locais indica o uso das estratégias que prezam pelo entendimento do entorno natural e de mecanismos climatizadores passivos, sem gasto de energia elétrica. A arquitetura bioclimática, a qual propõe uma arquitetura adequada ao clima local para obter um baixo consumo energético, também conta com uma série de dispositivos que são utilizados com o mesmo propósito

As paredes verdes são um tipo de dispositivo de baixo impacto ambiental, em que se podem utilizar as riquezas naturais locais e pode-se estabelecer um diálogo com o entorno natural. As paredes verdes consistem em uma parede revestida de vegetação, que pode estar localizada no interior ou exterior de uma edificação.

Uma edificação que utiliza vegetação nativa nas paredes verdes pode cumprir o papel de conectar fragmentos vegetais espalhados no tecido urbano. Isso possibilita uma maior chance de preservação da fauna dependente desses fragmentos, pois proporciona novos espaços de alimentação, procriação, e conecta comunidades mais distantes. Em adição, trata-se do retorno da vegetação aos seus espaços que foram

desmatados para a ocupação humana, em uma forma que se apresenta riqueza vegetal à população, o que pode gerar um sentimento de reconhecimento e pertencimento da comunidade em relação aos seus recursos vegetais naturais e sua diversidade. Essa questão de aceitação e admiração social é indispensável para modificar o uso constante de vegetação exótica nas cidades. É comum verificar nas paredes verdes já construídas que a maioria da vegetação utilizada é originária de outros países, principalmente do continente Asiático (Sorte, Silva e Romero, 2015). No caso do Brasil, esse cenário é preocupante, pois trata-se de um país megadiverso, com biomas de destaque, como o Cerrado, que possui milhares de espécies vegetais vasculares catalogadas com potencial para serem utilizadas em paredes verdes.

A presença da vegetação ameniza a temperatura local por meio da sombra que proporciona e mantém a umidade relativa do ar através da evaporação da água do solo e daquela liberada pela transpiração foliar. Em relação à transmissão de energia térmica, a vegetação possui um comportamento diferente no que diz respeito aos materiais construtivos convencionais, como blocos de concreto e cerâmica.

Esse estudo entende que o uso de vegetação nativa é uma atitude de compreensão do entorno, ou seja, de verificação das características naturais locais e conhecimento de seu potencial e uso. Portanto, esse trabalho irá investigar o desempenho térmico de paredes

verdes, compostas de vegetação nativa do Cerrado, no contexto bioclimático de Brasília- DF. Assim, o objetivo geral do estudo é realizar uma avaliação térmica comparativa entre algumas espécies de trepadoras nativas do cerrado para verificar qual delas possui o melhor desempenho térmico. Para tal, existem os seguintes objetivos específicos a serem cumpridos:

1. Descobrir que espécies vegetais devem ser elegidas para a avaliação térmica.
2. Realizar avaliação térmica das espécies escolhidas.
3. Realizar avaliação de viabilidade das espécies estudadas.

O método do primeiro objetivo específico inicia-se pelo levantamento bibliográfico das espécies vegetais do cerrado, de hábito trepador e com potencial paisagístico. Para tanto, foi utilizado o livro "Trepadeiras Ornamentais do Cerrado", de Ramalho e Proença (2004), para selecionar as espécies de estudo. Posteriormente, foi consultado o banco de dados do Herbário do Instituto de Ciências Biológicas da UnB, onde se obtiveram coordenadas geográficas de coletas das espécies selecionadas. Cada ponto foi visitado para verificar se ainda havia a presença de indivíduos de cada espécie e se seu acesso era possível.

Em seguida, a pesquisa seguiu para o segundo objetivo

específico: avaliação térmica das espécies. Para isso, avaliou-se qual seria a ferramenta de análise mais adequada para tal comparação, levando-se em consideração a disponibilidade de espaço físico para o estudo e tempo de crescimento da vegetação até sua idade adulta. Definiu-se então, que o mais adequado seria a utilização de simulação computacional. As simulações computacionais são adequadas para situações, como no caso desse estudo, onde não há viabilidade em se construir um ensaio experimental em escala real, tanto pela limitação de espaço físico quanto pelo tempo necessário para o crescimento da vegetação. Este tipo de estudo é aplicado em diversas pesquisas e possuiu comparações com situações reais, que comprovam sua eficácia em simular situações verdadeiras.

Foi utilizado o *software* ENVI-Met, que é adequado para estudos que envolvem arquitetura, ambiente, clima e vegetação. Portanto, foi necessário alimentar o banco de dados do programa com informações que correspondiam a cada uma das espécies vegetais, tais como o *Leaf Area Density* (LAD), mínima resistência estomática, albedo de onda curta, dentre outros. Dessa forma, cada espécie foi visitada para a coleta dos dados, mediante o uso de um IRGA LCI da ADC Bioscientific LTDA. Em adição, houve coleta de frutos e folhas, que foram levados ao laboratório de Ecofisiologia Vegetal do Instituto de Ciências Biológicas da UnB, para medições de área foliar e avaliação do potencial de plantio.

Com todos os dados levantados, foram realizadas simulações computacionais por meio do *software* ENVI-Met, para determinação e comparação do desempenho térmico das espécies avaliadas.

O último objetivo específico, análise da viabilidade das espécies vegetais, foi alcançado a partir da seleção e coleta dos frutos. As sementes então foram removidas e colocadas em placas de *petri* e germinadas em uma câmara de germinação tipo B.O.D da marca Marconi. As sementes que apresentaram germinação foram então transferidas para recipientes maiores e seu crescimento foi acompanhado. Em seguida, foram plantadas e acompanhadas para se determinar a taxa de crescimento.

Dessa forma, foi possível selecionar espécies nativas do cerrado, de hábito trepador e apelo paisagístico, adequadas para a composição de paredes verdes aplicadas no exterior de uma edificação. O desempenho térmico de cada espécie foi determinada através de simulação computacional com o *software* ENVI-Met. A viabilidade do uso de cada espécie foi determinada pela sua resposta ao método de germinação e crescimento.

Estrutura da Dissertação

Este estudo está estruturado em quatro capítulos: 1 - características térmicas gerais do ambiente construído e natural e suas relações térmicas com o homem; 2 - paredes verdes: características e adequação para a flora e clima do cerrado; 3 - material e métodos; 4 - resultados e discussão e 5 - Conclusão. A tabela 1 resume o conteúdo abordado em cada capítulo e apresenta o fluxo de trabalho desse estudo.

O primeiro capítulo irá tratar sobre conceitos relacionados à área do conforto térmico. O ambiente construído, bem como o natural, serão resumidos às suas características físicas que determinam o modo como se relacionam termicamente. Serão abordados termos como, por exemplo, absorvância, emissividade, condutividade térmica e resistência térmica, radiação e precipitação. As definições e valores apresentados seguem trabalhos de Frota e Schiffer (2001), Givoni (1976) e ABNT (NBR 15220, 2005). Em seguida, será dada ênfase na forma como os ambientes naturais e construído se relacionam com o usuário e como o desempenho térmico dos materiais constituintes desses ambientes afeta o conforto térmico.

Tabela 1 – Conteúdo por Capítulo e Fluxo de Estudo

Capítulo	Conteúdo
1 – Características térmicas gerais do ambiente construído e natural e suas relações térmicas com o homem	Conceitos, termos técnicos e mecanismos de troca térmica que se estabelecem em uma relação térmica entre diferentes corpos e como isso influencia o conforto térmico proporcionado ao homem.
2- Paredes verdes: características e adequação para a flora e clima do cerrado.	Características gerais, exemplos de projeto, vantagens, desvantagens, desempenho térmico, ecologia urbana, Brasília, flora e clima do bioma Cerrado.
3 – Material e métodos	Passos metodológicos do estudo, seleção de espécies, coleta, interpretação e uso de dados.
4 – Resultados e discussão	Apresentação e discussão dos dados relativos à avaliação térmica, análise de viabilidade e taxas de germinação e crescimento da vegetação.
5 - Conclusão	Análise final dos dados, desafios e considerações.

No segundo capítulo serão abordadas características gerais das paredes verdes, bem como alguns exemplos de projetos que usam esta estratégia. O trabalho de Valesan, Fedrizzi e Sattler (2010) servirá para introduzir as desvantagens e os benefícios do uso de paredes verdes bem como para restringir o campo de estudo deste trabalho. Posteriormente serão apresentados conceitos importantes sobre desempenho térmico e conforto ambiental, de acordo com o trabalho de Romero (2003) e da ABNT (NBR 15220, 2005), com o objetivo de esclarecer como os corpos, materiais e ambiente se relacionam termicamente e em que ponto o uso de paredes verdes pode ser benéfico. Também será abordada a visão da ecologia urbana em relação à presença de paredes verdes nos ecossistemas urbanos, bem como o benefício do uso de vegetação nativa para a conservação do bioma em que se encontra uma cidade. O bioma Cerrado será descrito, de acordo com autores como Eiten (1972, 1977 e 1978) e Collinson (1998). Por último, serão apresentadas as definições de clima, de acordo com autores como Maciel (2002) e Olgay (1963), bem como a caracterização do clima da cidade de Brasília.

No terceiro capítulo, serão descritos os passos metodológicos deste estudo. Será apresentado o trabalho de Ramalho e Proença (2004), que possibilitou a primeira seleção de espécies para este estudo, a triagem realizada através de dados do Herbário do Instituto de

Ciências Biológicas da Universidade de Brasília e das visitas *in loco*, que estabeleceram as espécies definitivas. Em seguida, serão explicados todos os procedimentos metodológicos e o uso do IRGA-LCI e do *scanner* de área foliar para obtenção de dados morfológicos e fisiológicos de cada espécie selecionada. Como ferramenta de simulação computacional, com o objetivo de avaliar o desempenho térmico de cada uma das espécies selecionadas, será utilizado o *software* ENVI-met. Serão descritas as características do *software*, sua forma de interpretação da vegetação, os parâmetros que foram fornecidos para criar o perfil de cada espécie, os dados climáticos, o formato da simulação e os dados de saída selecionados para este estudo. Além disso, serão demonstrados os métodos para coleta de sementes e plantio da vegetação estudada.

No capítulo “Resultados e Discussão”, serão apresentados todos os resultados obtidos pelas simulações, com valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar para as situações controle (sem parede verde) e para paredes verdes com cada uma das espécies selecionadas para o estudo. Também será apresentado o comportamento térmico diário do modelo de estudo, para determinar as orientações e horários que mais necessitam de atenção ao se aplicar uma parede verde. Em seguida, serão apresentados os resultados obtidos com o teste de germinação e as taxas de crescimento das espécies estudadas, bem

como o seu potencial.

No último capítulo, os resultados serão discutidos, considerando-se o benefício do uso de paredes verdes e a escolha de espécies mais adequadas para a estratégia e para a orientação da fachada. Serão também apresentadas sugestões que podem gerar melhores resultados em avaliações térmicas posteriores, como o plantio controlado de indivíduos representativos de cada espécie. Por último, será discutido de que forma os indivíduos crescidos em viveiro se diferenciam e podem modificar dados em comparação àqueles estudados em áreas de preservação ambiental.

1

CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS GERAIS DO AMBIENTE CONSTRUÍDO E NATURAL E SUAS RELAÇÕES TÉRMICAS COM O HOMEM

Esse capítulo irá se aprofundar nos parâmetros físicos e nas relações térmicas que se estabelecem entre o ambiente natural e o ambiente construído com o homem.

Serão abordados os parâmetros de absorvância, emissividade, condutividade térmica, resistência térmica e calor específico, que podem variar significativamente de acordo com o material utilizado, o que é de grande importância para um estudo de avaliação térmica, que busca compreender o comportamento térmico de determinado material. Os conceitos e valores serão adotados segundo normas da ABNT e trabalhos de Frota e Schiffer (2001) e Givoni (1976).

O ambiente natural será descrito levando-se em consideração os fenômenos e as características físicas relacionados às trocas térmicas que envolvem a atmosfera e a superfície terrestre, tais como radiação, umidade relativa do ar, precipitações, ventos e outros moderadores do clima. Esses elementos serão abordados a partir dos trabalhos de Corbella e Yannas (2003), Givoni (1992), Mascaró (1991) e Romero (2003 e 2013).

Em seguida, os mecanismos de troca de energia térmica serão descritos de acordo com autores como Costa (1971) e Schmid (2005). Nesse momento, será discutida a relação térmica que se estabelece entre os ambientes natural e construído com o homem.

1.1 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DO AMBIENTE CONSTRUÍDO COM O HOMEM

O ser humano sempre buscou se abrigar de condições hostis, evitando condições climáticas extremas de calor, frio e umidade. Segundo Olgay (1998), a moradia é o principal instrumento que nos permite satisfazer as exigências de conforto, as quais podem ser facilmente alcançadas mediante o uso de aparelhos de ar-condicionado, vaporizadores de água e ventiladores em climas quentes.

Infelizmente, essas alternativas são responsáveis pela maior parcela de energia consumida nas edificações. No ano de 2005, por exemplo, as residências consumiram 45% da energia elétrica do sistema brasileiro (Lamberts *et al.*, 2010), sendo os sistemas de acondicionamento de ar responsáveis por 20% a 40% da despesa total. Em adição, entre os anos de 2013 e 2014, o consumo de energia nas residências aumentou 2,9% (EPE, 2014). O elevado dispêndio energético dessas estratégias provoca inquietações em relação à manutenção do sistema elétrico brasileiro.

Dessa forma, surgem alternativas que possuem baixo consumo

de energia. Uma edificação energeticamente mais eficiente proporciona as mesmas condições de conforto ao usuário, com menor consumo de energia (Lamberts *et al.*, 2010). Algo que contribuiu para esta condição é a visão de que a arquitetura deve ser uma área que projeta e constrói elementos que são integrados ao clima local, o que diminui a necessidade da utilização de equipamentos climatizadores de alto gasto energético. Isso fica evidente na visão de Romero (2001), para o qual a arquitetura deve possuir uma forma de desenho lógico, em que sua própria concepção seja um elemento de mediação entre o homem e o meio. Já Yeang (1999) afirma que o estado de eficiência energética é alcançado através da correta configuração da edificação, que entre outros fatores, está relacionada à orientação e ao desempenho térmico dos materiais de construção.

Isso porquê o ambiente construído intermedeia as relações térmicas entre o ambiente natural e o ser humano, ou seja, é um elemento que sofre todas influências do clima local, e as transfere, de

forma amenizada, para o usuário. Isso implica consequências térmicas no interior da edificação. Para prever essas consequências, é necessário compreender as características térmicas dos materiais, bem como os processos de transferência de energia térmica.

1.1.1 Absortância e Emissividade

Absortância e emissividade são grandezas que caracterizam um material em relação ao seu comportamento radiativo. De acordo com a ABNT NRB 15220 (2005), emissividade é a taxa de emissão de radiação por unidade de área, enquanto absortância é o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre essa mesma superfície, sendo um número adimensional. A absortância e a emissividade podem variar de acordo com a geometria, o acabamento superficial e o tipo de material, conforme demonstra a tabela 2.

1.1.2 Condutividade Térmica e Resistência Térmica

A condutividade térmica é uma grandeza que indica o nível de condução

de energia térmica do material. Segundo a ABNT (NRB 15220, 2005), tal grandeza é a propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m², quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro. É expressa pela equação 1.

$$\lambda = \frac{W}{(m \cdot K)} \quad (1)$$

Ainda segundo a ABNT (NRB 15220, 2005), a resistência térmica é quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário, e é expressa pela equação 2.

$$R = \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (2)$$

Dessa forma, um material de elevada condutividade térmica e baixa resistência térmica é classificado como bom condutor, um material com baixa condutividade térmica e alta resistência térmica é tido como isolante

Tabela 2– Absorção e Emissividade de Materiais de Superfície para Temperaturas entre 10° C e 40° C

Adaptado de Frota e Schiffer (2001), ABNT NRB 15220 (2005) e Givoni (1976)

Material de Superfície	Coefficiente de Absorção Solar (α)	Coefficiente de Emissividade (ϵ)
Alumínio e cromo polidos	0.02	0.04
Latão e cobre polidos	0.02	0.05
Latão, alumínio fosco e aço galvanizado	0.2	0.3
Vidro incolor	0.06 – 0.25	0.84
Chapa de alumínio oxidada	0.15	0.12
Vidro metalizado	0.35 – 0.80	0.15 – 0.84
Reboco claro	0.30 – 0.50	0.85 – 0.95
Tijolo, pedra ou telha amarela	0.4	0.6
Verde claro	0.4	0.9
Concreto aparente	0.65 – 0.80	0.85 – 0.95
Verde escuro	0.7	0.9
Tijolo, pedra ou telha vermelha	0.85	0.95
Preto fosco	0.9	0.98
Vidro incolor	0.06 – 0.25	0.84

A tabela 3 , a qual indica a condutividade térmica de diversos materiais, demonstra que essa característica pode variar desde $\lambda=0.04$, para a balsa, uma madeira que pode ser utilizada como um elemento isolante, até o alumínio, com $\lambda=230.00$, sendo, por esse motivo, um excelente condutor de energia térmica.

Tabela 3– Coeficiente de Condutividade Térmica de Materiais

Adaptado de Frota e Schiffer (2001, p.184)

Material	Coeficiente de Condutividade Térmica (λ)
Poliestireno expandido moldado	0.04
Balsa	0.05
Feltro	0.05
Algodão	0.06
Madeira	0.19
Gesso em placa	0.35
Concreto aparente	1.65
Latão	110.000
Alumínio	230.00

1.1.3 Calor Específico

O calor específico de um material é uma grandeza que indica a variação térmica de um material específico ao receber uma quantidade determinada de energia térmica. Segundo a ABNT (NRB 15220, 2005), é definido como o quociente da quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema, pela sua massa, sendo expressa pela equação 3.

$$c = \frac{J}{Kg \cdot K} \quad (3)$$

Um material com elevado calor específico necessita receber uma quantidade elevada de energia térmica para variar a sua temperatura (tabela 4) e é influenciado pelo teor de umidade dos materiais.

Tabela 4 – Calor Específico de Materiais

Adaptado de Frota e Schiffer (2001)

Material	Calor Específico (c)
Aço inoxidável	461
Gesso em placa	837
Cerâmica	837
Granito	837
Concreto aparente	1005
Carvalho	1424
Terra úmida	1465
Areia seca	2093
Água	4187
Areia úmida	8374

As propriedades térmicas dos materiais são importantes para a compreensão dos processos de transmissão de energia térmica e para a sensação de conforto térmico no ambiente construído pois conectam termicamente o ambiente natural e o homem. O ambiente natural é

outro elemento que deve ter suas características térmicas discutidas para que então os mecanismos de troca térmica sejam discutidos. Neste estudo, o clima de Brasília – DF será tomado como o ambiente natural.

1.2 Características Térmicas do Ambiente Natural

O ambiente construído é altamente modificável. É possível propor o uso de diferentes materiais, orientação e elementos de proteção solar. Porém, em relação às características térmicas do ambiente natural, nada pode ser feito para modificá-las. Para proporcionar qualidade de vida ao ser humano, o projeto de arquitetura deve analisar o entorno, estudar as condições climáticas, tais como insolação, vegetação, água e vento, e adequar a arquitetura a esses elementos (Corbella e Yannas, 2003). Segundo Givoni (1992), os principais elementos climáticos que devem ser considerados em edificações são a radiação solar, o comprimento de onda da radiação, temperatura do ar, umidade, ventos e precipitações. Para tanto, é necessário compreender o comportamento dos elementos climáticos que mais influenciam termicamente a edificação e o seu entorno, sendo eles: radiação, umidade, precipitação atmosférica e ventos.

1.2.1 Radiação e Incidência de Energia Térmica

O sol é uma fonte emissora de energia radiante. Essa energia é transportada no vácuo do espaço em forma de radiação eletromagnética, um conjunto de ondas elétricas e magnéticas, com diversos comprimentos. A separação dessas ondas de acordo com o seu comprimento configura o espectro eletromagnético, conforme demonstrado na figura 1.

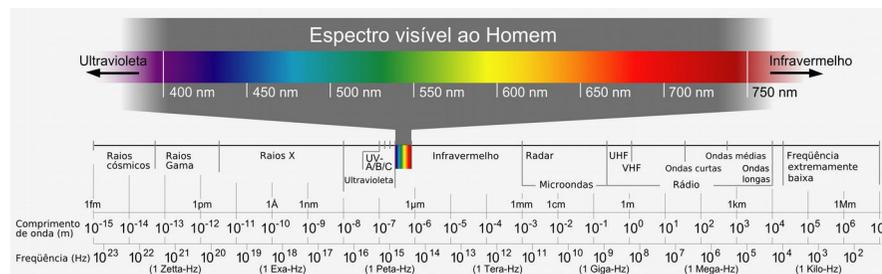


Figura 1 – Espectro Eletromagnético

Fonte: Sociedade Brasileira de Física ¹

¹ - Disponível em:
<http://www.sbfisica.org.br/v1/novopion/index.php/publicacoes/imagens/130-espectro-eletromagnetico> >. Acesso em: 04/04/2016

É possível verificar que a radiação eletromagnética é composta por uma variedade de ondas, sendo para este estudo, as mais significantes as que compõem a radiação visível na forma de luz, com comprimento de onda curta (400 nm a 700 nm) e que correspondem a 44% da radiação eletromagnética, e a radiação infravermelha de onda longa (acima de 700 nm), que corresponde a 48% da radiação eletromagnética (Corrêa, 2015).

A radiação solar é uma fonte de energia térmica que incide sobre o planeta terra, porém, sua intensidade é alterada mediante a ação de diversos fatores naturais, tais como as características atmosféricas e as coordenadas geográficas do local de estudo.

A incidência solar nas faces externas e no interior do ambiente construído é a ação climática de maior influência térmica. Segundo Corbella e Yannas (2003), a radiação solar é a principal causa de desconforto térmico, pois as superfícies dos ambientes construídos absorvem a energia solar, convertendo-se em energia térmica, o que aumenta imediatamente a temperatura do ar que está em contato com elas e faz com que as superfícies emitam e reflitam mais energia infravermelha para outros elementos de construção.

A energia radiante total sofre atenuação por diversos fenômenos

ao atravessar a atmosfera terrestre, conforme ilustra a figura 2. As nuvens, os gases e as partículas atmosféricas refletem cerca de 30% da radiação incidente (Pereira *et al.*, 2006).

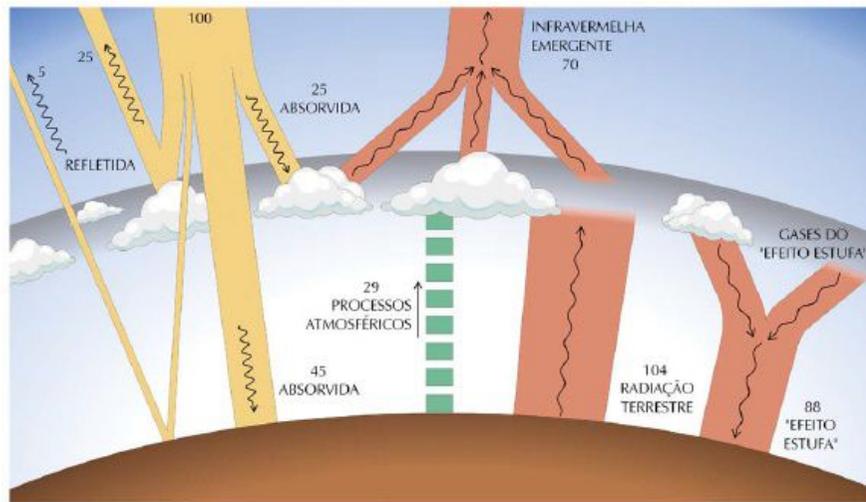


Figura 2 – Energia Radiante e a Atenuação Atmosférica

Fonte: Pereira *et al.* (2006, p.14)

As nuvens atuam como um elemento de difusão e reflexão da energia radiante. Cidades pouco nebulosas recebem mais radiação solar do que outras com pouca ocorrência de nuvens. Porto Alegre, por exemplo, é a cidade brasileira que possui a maior incidência de radiação

solar no verão, nos dias de céu claro (Mascaró, 1991). A nebulosidade também atua como um elemento que absorve e emite a radiação refletida pela superfície terrestre (Romero, 2013), ou seja, quanto maior a nebulosidade, maior é a presença de vapor de água, menor é a incidência de radiação solar na superfície terrestre (figura 3) e menor é a sua dispersão de volta para a atmosfera.

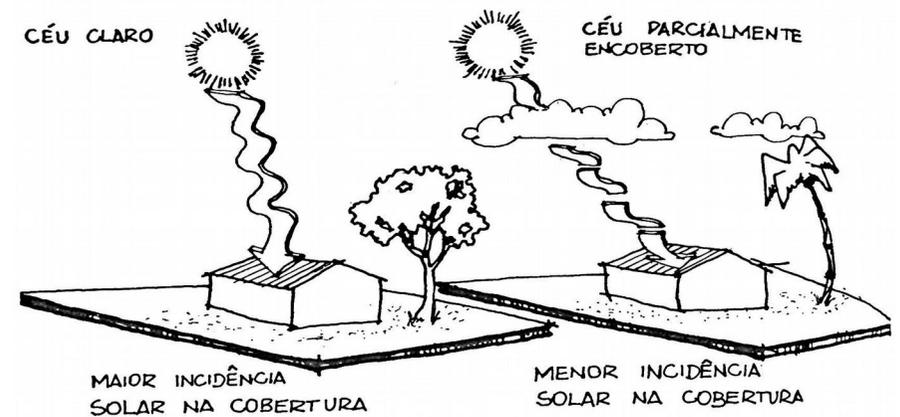


Figura 3 – Nebulosidade e Incidência Solar

Fonte: Mascaró (1991, p. 50)

Em relação aos gases, o gás ozônio, absorve radiação eletromagnética ultravioleta e de onda curta, moderando a quantidade que atinge a superfície terrestre (Romero, 2013). Já o dióxido de carbono (CO_2) e o gás metano (CH_4) são gases que absorvem radiação infravermelha de onda longa e são responsáveis pela manutenção da temperatura na terra. Quanto maior for a sua concentração atmosférica, maior será a quantidade de energia radiante absorvida e mantida em forma de energia térmica. Consequentemente, haverá elevação da temperatura terrestre.

Outras partículas atmosféricas que atenuam a energia radiante são basicamente constituídas de poeira. Assim, a radiação que passa pela atmosfera causa o aquecimento do ar atmosférico, das superfícies terrestres e das superfícies artificiais.

A energia radiante total incidente também varia de acordo com a posição geográfica do local estudado e é majoritariamente determinada pela altitude em relação ao nível do mar e pela latitude.

Levando-se em consideração que a atmosfera terrestre é uma barreira para a radiação solar e que, sua espessura é contada à partir do nível do mar, a altitude de um local determina o tamanho da atmosfera que influencia o seu clima. Segundo Romero (2003), é um dos fatores que

exerce maior influência na temperatura, pois em elevadas altitudes, o ar contém menos partículas sólidas e líquidas, que são responsáveis pela absorção da radiação solar e amenização da temperatura do ar.

A latitude, que é o ângulo entre o plano da linha do Equador e o local de referência, determina o ângulo de incidência dos raios solares na superfície terrestre (figura 4). Coordenadas próximas ao Equador recebem os raios em um ângulo de 90° em relação à superfície terrestre. Conforme a latitude avança para os polos, o ângulo de incidência diminui, e, consequentemente, a área de superfície incidida aumenta. Dessa forma, há uma maior área para a mesma quantidade de energia radiante, e, portanto, ao se afastar da linha do equador, a tendência é que a temperatura local diminua. A intensidade máxima de incidência de radiação solar durante o ano ocorrerá em cidades ao redor das latitudes a 15° N e 15° S em dias de céu claro (Mascaró, 1991).

Além disso, o movimento de rotação e translação varia a distância entre o Sol e a Terra, ou seja, há uma variação da distância entre a fonte de energia e o corpo que a recebe, alterando-se a quantidade de energia radiante total que incide no planeta terra, o que é observado pela duração dos dias, noites e estações do ano.

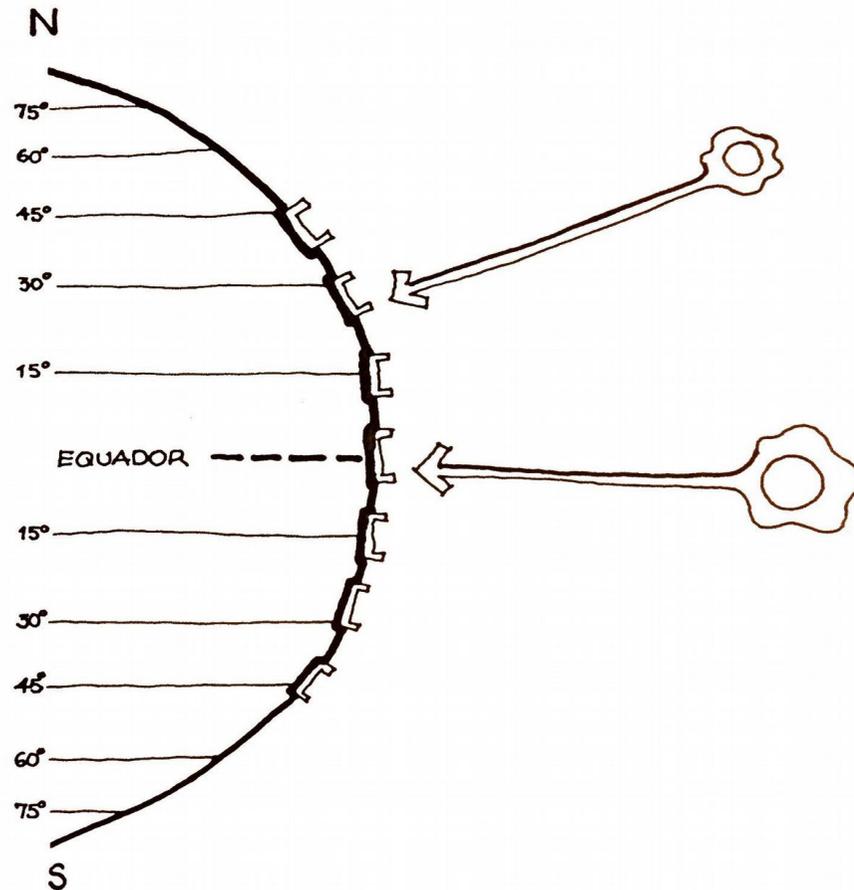


Figura 4– Latitude e Incidência Solar

Adaptado de Romero (2013, p. 26)

Após sofrer os processos de atenuação, atravessar a atmosfera e atingir a superfície terrestre, a radiação solar irá contribuir para a variação da temperatura do ar. Tipos diferentes de superfícies naturais apresentam variação na taxa de reflexão e absorção da radiação solar incidente, conforme demonstra a tabela 5. A radiação refletida pelo entorno é uma variável importante, pois se constitui em energia térmica que irá afetar uma pessoa ou edifício. Superfícies molhadas tendem a equilibrar as temperaturas, ao contrário de materiais como areia, que tendem a apresentar temperaturas altas durante o dia e baixas durante a noite (Romero, 2003). Dessa forma, é interessante que o entorno seja constituído de superfícies com baixa reflexão. Porém, o mesmo não é recomendado para uma edificação, para uma edificação em climas quentes, pois suas superfícies devem ser de alta reflexão, ou baixa emissividade, para que o aumento de temperatura no interior de edifício seja reduzido.

A atenuação da radiação solar nos ambientes construídos pode ser alcançada pela própria arquitetura, ao se proporem soluções de volumetria, implantação e uso de elementos de proteção solar, o que segundo Givoni (1994), pode minimizar a elevação média total de temperatura diurna causada pelos ganhos solares diretos ou indiretos.

Tabela 5 – Porcentagem de Radiação Solar Incidente Refletida

Adaptado de Mascaró (1991, p.51)

Superfície	Reflexão Estimada (%)
Terreno seco	10 - 25
Terreno úmido	8 - 9
Areia seca	18 - 30
Areia úmida	9 - 18
Rocha	12 - 15
Campo verde	3 - 15
Bosque escuro	5
Deserto	24 - 48

1.2.2 Umidade Relativa do Ar e Precipitações

A umidade do ar está relacionada à quantidade de vapor de água presente na atmosfera. Define-se como “umidade absoluta do ar úmido” o peso de vapor de água contido em cada m³ de mistura vapor-ar, o qual não é ilimitado e depende da temperatura da mistura. O ar encontra-se

saturado quando contém o peso máximo de umidade para uma dada temperatura e é um parâmetro para o cálculo da “umidade relativa do ar”, que nada mais é do que a relação entre peso de vapor de água por m³ de ar úmido da mistura avaliada e o peso de vapor de água que esse peso conteria se estivesse saturado (Costa, 1974).

Segundo Ginovi (1976), devido ao fato de a altitude ser um determinante da pressão de vapor, locais em maior altitude possuem ar com menor concentração de vapor de água e menor umidade relativa do ar. De forma semelhante, a pressão de vapor de água atinge seu valor máximo antes da noite, o que gera correntes de ar ascendentes e diminuição da pressão de vapor de água próxima ao solo. Em locais com grande amplitude de temperatura do ar, a umidade relativa do ar segue a mesma tendência, atingindo os valores mais baixos no início da tarde, quando as temperaturas são mais elevadas, e os valores mais altos durante à noite (Romero, 2013).

Em uma mistura saturada (100% de umidade relativa do ar), a adição de umidade gera o surgimento de água no estado líquido, na forma de nuvens, neblinas e precipitação. Nos subtropicais, há maior frequência de precipitações. Devido à incidência dos raios solares nos trópicos, há uma menor quantidade de água percolada pelo solo, pois a

maioria é rapidamente evaporada por conta da temperatura das superfícies. Segundo Givoni (1992), existem três tipos de precipitação: 1 - a convencional, na qual as massas de ar carregadas de umidade são aquecidas pelas superfícies e adquirem movimento ascendente, esfriam-se e condensam-se, típica de zonas tropicais, geralmente de curta duração; 2 - a precipitação orográfica, na qual as massas de ar adquirem movimento ascendente e condensam-se pelo choque com elevações topográficas; 3 - e a precipitação convergente, que ocorre pelo encontro de massas de ar com temperaturas diferentes, o que eleva a massa de ar quente e úmida até que ocorra a precipitação.

Dessa forma, atmosferas com alta umidade relativa favorecem a ocorrência de chuvas, que podem minimizar a temperatura de ar e formar nuvens para filtrar a radiação solar. Também promovem retenção de calor, assim, a diferença entre os extremos de temperatura é menor. Já atmosferas com baixa umidade relativa apresentam baixa frequência de chuvas, baixa nebulosidade, maior incidência de radiação solar e maior diferença de extremos de temperatura, ou seja, temperaturas altas durante o dia e baixas durante a noite.

Apesar de a umidade do ar ser responsável por tantas características climáticas como nebulosidade e precipitação, e

consequentemente influenciar de forma significativa a temperatura do ar, ela é diretamente modificada pela ação dos ventos.

1.2.3 Ventos e Pressão Atmosférica

A pressão atmosférica é a pressão exercida por uma camada de ar sobre a superfície terrestre e varia em cada localidade por conta de características geográficas como latitude, longitude, continentalidade e maritimidade. Além disso, ela é influenciada pela diferença de temperatura das massas de ar. A radiação solar é responsável pelo aquecimento do ar atmosférico, por meio de sua incidência direta e dos processos de troca térmica a partir do aquecimento de outras superfícies, como a terra e o mar. Porém, como a intensidade de radiação varia no planeta, há um gradiente de temperatura no globo, tanto em superfícies continentais como em marítimas, e esses fatores, aliados ao movimento de rotação da terra, geram massas de ar com temperaturas diferentes (Frota e Schiffer, 2001).

Massas de ar com diferentes temperaturas geram áreas com diferentes pressões atmosféricas. Massas de ar frio, por possuírem maior densidade, descem em direção à superfície terrestre e, ao fazerem esse

movimento, resultam em áreas de alta pressão. No hemisfério norte, o ar desloca-se no sentido horário e, no hemisfério sul, no sentido anti-horário (Frota e Schiffer, 2001). Massas de ar quente, por possuírem menor densidade, sobem a partir da superfície terrestre e resultam em áreas de baixa pressão, circulam no sentido horário no hemisfério sul e no sentido anti-horário no hemisfério norte.

Áreas com diferentes pressões atmosféricas, causadas por massas de ar com diferentes temperaturas, são os principais fatores que determinam a intensidade e direção dos ventos. A troca de posição e a mudança na temperatura das massas geram o vento, que parte de áreas de maior pressão para as de menor pressão atmosférica. Além disso, o movimento das massas sofre influência do movimento de rotação da terra; como o sentido de rotação da terra é de oeste a leste, os ventos que seguem esse sentido sofrem aceleração, enquanto os que vêm do sentido contrário, de leste para oeste, diminuem sua velocidade pelo atrito com a superfície terrestre (Romero, 2013; Tubelis e Nascimento, 1984).

Os ventos modificam a temperatura e a umidade do clima local. O suor é mais rapidamente evaporado da pele se sobre ela incide um fluxo de ar, o que causa a sensação de resfriamento. Esse fenômeno é

especialmente importante para a sensação de conforto térmico em climas quentes com elevada umidade relativa do ar. Ademais, a ventilação que traz uma massa de ar com temperatura abaixo da massa anterior causa a sensação de resfriamento.

1.2.4 Demais Elementos Naturais Moderadores do Clima

Outras características morfológicas que ainda podem ser classificadas como naturais e que afetam a maneira como os elementos climáticos citados anteriormente atuam localmente são as massas de água, a topografia e a vegetação local.

A água, por apresentar alto calor específico (c), é um elemento que retém pouca energia calorífica e isso tende a diminuir as variações de temperatura entre o dia e a noite, pois equilibra o acúmulo de energia calorífica das massas de terra.

Já a topografia, é um elemento que limita primariamente o movimento de massas de ar. Cadeias montanhosas geralmente fazem as massas de ar com alta umidade ganharem altitude, resfriarem-se e se condensarem (figura 5). Ao ultrapassar a área montanhosa, a massa de ar segue seca – fenômeno denominado sombra de chuva (Romero, 2013).

Assim, pequenas elevações modificam o percurso dos ventos próximos da superfície da terra, de acordo com a declividade, orientação e sua elevação.

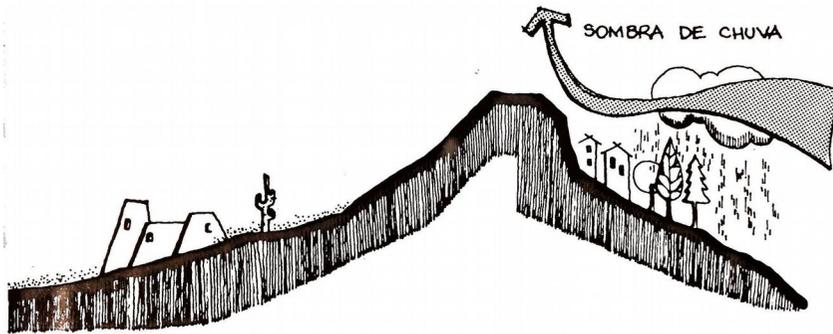


Figura 5 – Massas de Terra e a Sombra de Chuva

Fonte: Romero (2013, p.29)

Já a vegetação possuiu diversos efeitos no clima local, pois sua presença é responsável por diminuir a incidência de energia radiante nas superfícies naturais e construídas, através do resfriamento, além de possibilitar um incremento na umidade relativa do ar pelo processo de evapotranspiração, pois nesse fenômeno, a água em estado líquido, liberada pela planta, é convertida em vapor, o que retira calor do

ambiente, diminui a temperatura do entorno e eleva a umidade do ar.

1.3 Relação Térmica entre os Ambientes e o Homem

É necessário compreender a troca de calor entre o meio em que o indivíduo se encontra e seu corpo. Segundo Schmid (2005), o calor pode ser transferido por um processo latente ou sensível. O calor latente envolve mudança no estado físico da matéria, que ocorre a temperatura constante para substâncias puras. Já o calor sensível proporciona apenas mudança na temperatura, por meio dos processos de condução, convecção e radiação (Costa, 1974). A temperatura do corpo e o conforto térmico são o resultado da aplicação dos mecanismos de calor sensível e latente entre o indivíduo e o ambiente.

Após a verificação das características térmicas de todos os integrantes do sistema térmico, composto pelo ambiente natural – ambiente construído – e pelo homem, é possível entender os mecanismos de troca térmica que ocorrem entre eles.

Para melhor assimilação dos mecanismos de trocas térmicas, cabe esclarecer que essas trocas são discutidas a partir de uma relação entre apenas dois corpos. Porém, em uma situação real, existem relações

térmicas entre todos os corpos de um determinado sistema. Por exemplo, no caso de um sistema composto por uma habitação unifamiliar, com dois ocupantes, mobília e equipamentos, inserida em uma floresta de clima quente-úmido, as relações térmicas se estendem por todos componentes, o que inclui a radiação solar, folha e caule da vegetação, cobertura e pisos da residência, até da mobília com os seus ocupantes, ou seja, todos os corpos se relacionam termicamente. Desde que haja diferença de temperatura entre eles, haverá troca térmica, sempre do corpo de maior temperatura para o de menor. Essa transmissão de energia térmica ocorre por 5 mecanismos diferentes, separados entre mecanismos de trocas secas, sendo eles a condução, a radiação e a convecção, e os mecanismos de trocas úmidas, que correspondem à evaporação e à condensação. As paredes verdes se diferenciam dos demais materiais de construção também pela forma como se relacionam termicamente com os demais corpos do ambiente. A transmissão de energia térmica por condução é menor, por exemplo, em comparação com uma placa de alumínio, pois seu coeficiente de condutibilidade é menor. Sua superfície também é menos absorvente e radiante do que uma parede de cor preta, o que resulta em uma menor troca térmica pelo mecanismo de radiação. A evaporação é outro mecanismo de trocas térmicas presente das paredes verdes e que atribui

uma vantagem a este dispositivo, pois possibilita a redução da temperatura do ar, quando a água presente na superfície foliar recebe energia térmica do ambiente para ir do estado líquido para o gasoso. Demais mecanismos como convecção e condensação também são importantes para a compreensão das trocas térmicas que ocorrem entre o ambiente construído e o homem.

- **Condução**

A condução é um mecanismo de troca térmica explicado pelo movimento das moléculas de um corpo, o qual é diretamente proporcional a sua temperatura, ou seja, quanto mais elevada for a temperatura, maior será o grau de agitação molecular desse corpo. O movimento vibratório das moléculas de um corpo origina choque com as moléculas de outro corpo, as quais absorvem essa energia cinética e conseqüentemente adquirem mais movimento (Costa, 1974). Portanto, a transmissão por condução, envolve dois corpos em contato direto e com temperaturas diferentes.

A transmissão de calor por condução é afetada pela área de superfície de contato entre os dois corpos e pelo gradiente de temperatura e obedece à lei de Fourier, demonstrada na equação 4.

$$\varphi = \frac{\lambda A \Delta t}{e} \quad (4)$$

Em que:

Φ = fluxo de calor (W/m²)

λ = coeficiente de condutibilidade do material

Δt = diferença de temperatura dos corpos em Celsius

e = espessura do material em metros

Dessa forma, é importante verificar que, como a condução envolve o contato entre dois corpos, o fluxo de calor também será influenciado pelas propriedades térmicas de cada um dos corpos envolvidos. Como citado anteriormente, cada material possui um valor de λ (coeficiente de condutibilidade) diferente. Portanto, quanto maior for o λ de um material, maior será a sua condução térmica. Por exemplo, uma parede de bloco cerâmico ($\lambda = 1.2$) irá transmitir mais calor recebido pela radiação solar na sua superfície externa para a superfície interna do que outra parede, de mesma espessura, feita de bloco de terra argilosa seca ($\lambda = 0.45$). Em adição, o fluxo térmico por condução

será influenciado pela resistência térmica do material, a qual também varia com λ . Logo, a mesma parede de bloco cerâmico, com espessura de 15 cm, terá menor resistência térmica do que outra parede de 30 cm de espessura e , portanto, haverá menor fluxo de calor.

O desempenho térmico desses materiais de construção devem ser levados em consideração caso se deseje criar um isolamento térmico em relação ao meio externo, ou seja, se o objetivo for que a temperatura da superfície da envoltória interna seja significativamente menor do que a superfície externa.

- **Convecção**

Diferentemente da condução, que implica em corpos sólidos, a convecção é um mecanismo de troca térmica que envolve fluidos. É a responsável, por exemplo, pelos movimentos de massas de ar por diferença de pressão citados anteriormente. Um fluido é composto por partículas que possuem movimento relativo. Quando uma porção deste fluido recebe um fluxo de calor, as partículas mais próximas da fonte de calor aumentam o seu movimento e transmitem para outra zona do fluido. Segundo Costa (1974), a transmissão térmica por convecção pura

não existe, somente em combinação com a condução. Segundo a teoria das correntes de Prandtl, os fluidos em proximidade com superfícies sólidas possuem movimento particular reduzido nas áreas de contato, sendo a condução, nesse caso, o principal mecanismo de troca térmica atuante. O fluxo térmico originado apenas pela convecção é expresso pela Lei de Resfriamento de Newton (equação 5)

$$\Phi = ha \Delta t \quad (5)$$

Em que:

Φ = fluxo de calor (W/m^2)

h = coeficiente de troca térmica por convecção

a = área de superfície de contato em m^2

Δt = diferença de temperatura em Celsius entre a superfície e o fluido

A troca térmica por convecção é diretamente afetada pelo fluido em questão, bem como a temperatura da fonte de calor e a área de contato com o fluido. Isso é relevante ao se analisar a transmissão por convecção entre uma parede e o ar do interior de uma habitação. Primeiramente, o material da parede – tal como a absorvância do material de sua superfície

externa, a resistência térmica, o calor específico e a espessura do material intermediário – e a área de contato da superfície interna com o ar irão influenciar o aquecimento das partículas do ar e sua movimentação ascendente pela habitação.

- **Radiação**

Segundo Costa (1974), todos os corpos emitem energia térmica em forma de radiação eletromagnética, em uma intensidade que depende basicamente da natureza do corpo e de sua temperatura. Dois corpos, distantes entre si, imersos em um meio permeável, comunicam-se termicamente por meio da radiação eletromagnética. A atmosfera terrestre e o vácuo são meios permeáveis, enquanto vapor de água e a maioria dos gases combustíveis são barreiras para alguns comprimentos de onda da radiação, porém, a maior parte dos líquidos pode ser considerada não permeável.

Diferentemente das trocas térmicas pelos mecanismos de condução e convecção, a emissão térmica por meio de radiação não é proporcional à diferença de temperatura entre o corpo e o seu meio. O coeficiente de transmissão de calor por radiação é variável de acordo

com a temperatura, dimensão, forma, disposição e absorvência das superfícies radiante e irradiada (Costa, 1974). O fluxo de calor por radiação é calculado pela equação 6, semelhante à adotada para cálculo através de condução, mas nesse caso, não cabe considerar a condutividade de um dado material nem a sua espessura, pois a radiação pode ocorrer até no vácuo.

$$\Phi = \alpha a \Delta t \quad (6)$$

Em que:

Φ = fluxo de calor (W/m^2)

α = coeficiente de troca térmica por convecção

a = área de superfície da superfície em m^2

Δt = diferença de temperatura em Celsius entre as superfícies

- **Evaporação**

Frota e Schiffer (2001) afirmam que a evaporação é a troca térmica proveniente da mudança do estado líquido para o estado gasoso. No caso da água, a evaporação se dá de forma natural, abaixo

da temperatura de ebulição. A quantidade de vapor de água no ar é limitada para cada temperatura e igual ou inferior ao peso do vapor saturante. A relação entre a quantidade de vapor de água no ar e o peso do vapor saturante é denominado estado higrotérmico do ar e, assim como o vento, influencia a velocidade de evaporação da água.

A evaporação é um mecanismo de troca térmica utilizada como estratégia de conforto térmico, pois a água possui um elevado calor específico, ou seja, é necessário uma grande quantidade de energia térmica para mudar a água de seu estado líquido para o estado gasoso. Por exemplo, um litro de água líquida consome 700 J para evaporar (Frota e Schiffer, 2001), o que significa que água no estado líquido, de acordo com o vento e com o estado higrotérmico do ar, absorve energia térmica do ambiente, amenizando a temperatura e incrementando a umidade relativa do ar local. Isso é relevante quando se utilizam dispositivos como espelhos d'água, vaporizadores de água ou, no caso deste estudo, a presença de vegetação, pois, durante a transpiração foliar, a água fica disponível na superfície foliar. Tanto a superfície da folha como o ar do seu entorno fornecem energia térmica para que a água passe do seu estado líquido para o gasoso.

- **Condensação**

Ao contrário da evaporação, a condensação é a troca térmica decorrente da mudança do estado gasoso para o líquido. Quando o ar está saturado de umidade (elevado grau higrotérmico), a quantidade de água que se adiciona ao sistema se condensa, dissipando energia.

A condensação é um fenômeno que geralmente está associado ao ganho térmico no ambiente; sendo assim, a estratégia mais recomendada para ambientes com elevada umidade relativa do ar e possibilidade de condensação é a ventilação local.

Ao analisar os mecanismos de troca de energia térmica vemos que condução, radiação e evaporação são os mais relevantes para a determinação do desempenho térmico de uma parede verde. O distanciamento da fachada por contada posição da parede verde, e o sombreamento causado por suas folhas diminuem a incidência de radiação solar da fachada, bem como a transmissão por condução, para o interior da edificação e outros pontos da fachada. A água que é liberada pelas folhas na transpiração foliar é logo evaporada, através do uso da energia térmica do ambiente, o que mitiga a temperatura do entorno. Porém, os outros mecanismos, como condensação e convecção ocorrem

simultaneamente com os mecanismos principais, e seu entendimento é necessário para uma compreensão sistêmica das trocas térmicas que envolvem os elementos naturais, construídos e o homem,

2

PAREDES VERDES: CARACTERÍSTICAS E ADEQUAÇÃO PARA A FLORA E CLIMA DO CERRADO

Neste capítulo, são abordadas as características gerais e os indícios históricos de uso das paredes verdes, bem como são apresentados alguns exemplos de projetos que utilizam essa estratégia. Em seguida, será apresentado o trabalho de Valesan, Fedrizzi e Sattler (2010), que aborda as vantagens e desvantagens do uso de paredes verdes em edifícios, segundo seus usuários. Assim, como observações que incentivaram este estudo, serão utilizadas as vantagens “integração do meio urbano com a natureza”, bem como o efeito que a vegetação exerce na temperatura e na umidade do ar.

O desempenho térmico da vegetação é contextualizado dentro de um sistema de trocas térmicas, que inclui o ambiente natural, nesse caso a vegetação e clima local, o ambiente construído, ou seja, as edificações, e o ser humano. Essa relação será resumida pelo balanço térmico de Romero (2000) e será determinante para o conforto térmico, definido pela ABNT (NBR 15220, 2003) e ASHRAE (Norma nº 55, 2010). O potencial do uso de vegetação para influenciar o microclima local será exemplificado pelos estudos de Labaki (2011), Romero (2003), Tsoumarakis *et al.* (2008) e Gupta *et al.* (2011).

Também serão abordadas a importância do uso de vegetação nativa e a forma como a Ecologia Urbana compreende a presença desse

recurso vegetal dentro do ecossistema urbano. Em seguida, o bioma Cerrado será caracterizado de acordo com Raven *et al.* (2007), Eiten (1972, 1977, 1978), Collinson (1998) e Silva (2008). A distribuição geográfica e os tipos de clima predominantes no Cerrado, bem como sua riqueza em espécies vegetais, serão abordados para afirmar o potencial do uso paisagístico dos recursos vegetais deste bioma.

Por fim, serão discutidas as características térmicas da cidade de Brasília – DF, que é integrante do ambiente natural do sistema de trocas térmicas deste estudo. Serão apresentadas as definições de clima e considerações de acordo com Grisolet *et al.* (1962), Maciel (2002) e Olgay (1963). A caracterização climática da cidade de Brasília – DF será feita com base nas médias anuais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2015) e a NBR 15220 (ABNT, 2003).

2.1 PAREDES VERDES

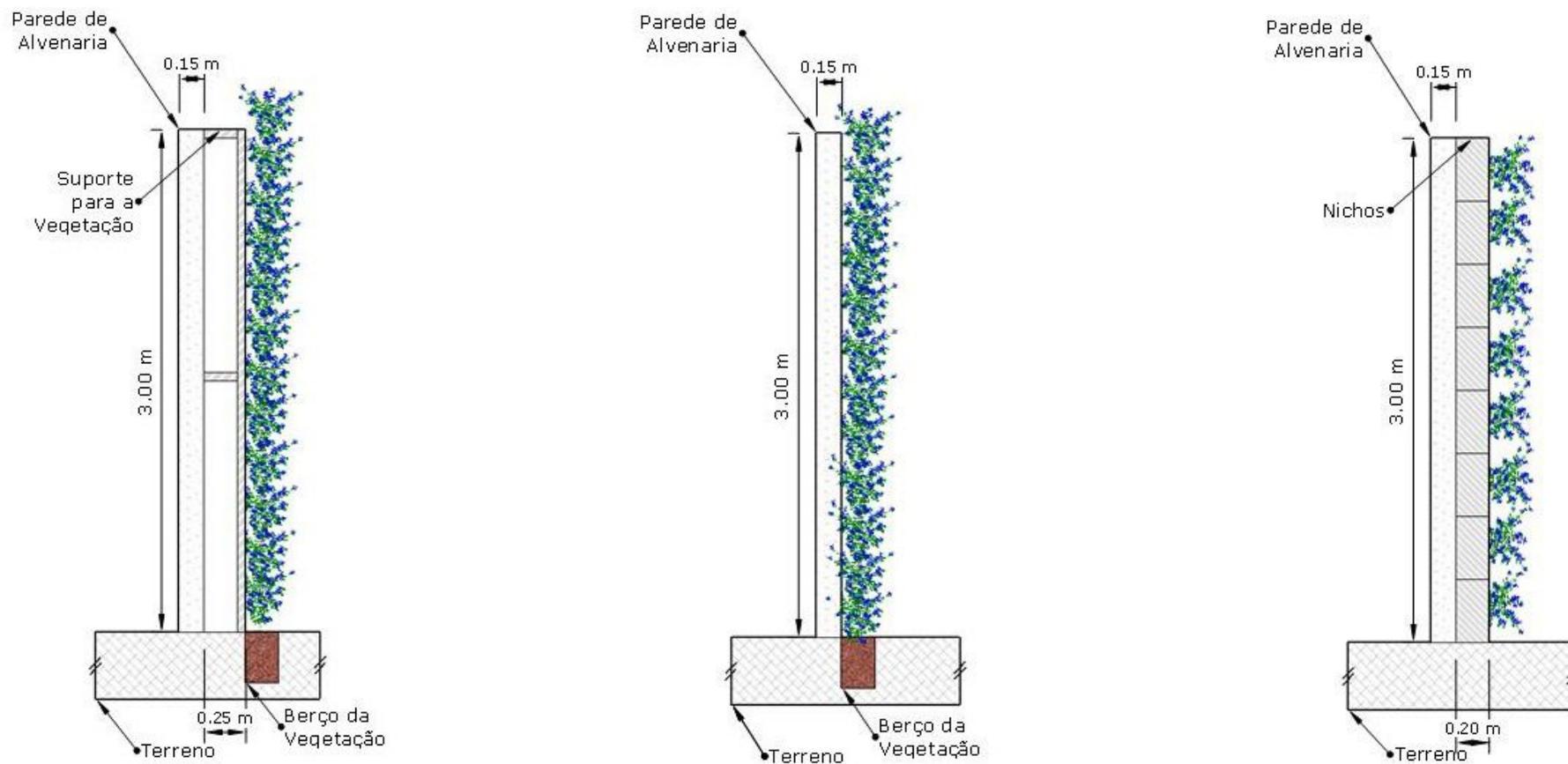
O uso de vegetação integrada às edificações é uma prática milenar. O caso mais antigo já documentado é o tipo arquitetônico encontrado na antiga cidade da Babilônia, há quase três mil anos. Os chamados jardins suspensos da Babilônia foram erguidos pelo comando do rei *Nebuchadnezzar* como um presente para a sua esposa, *Amystis*, que sentia saudades da vegetação de sua terra natal, na Persia. Os registros sugerem que as edificações eram compostas de terraços cobertos por vegetação, que, ao crescer, ficava pendurada em direção aos pavimentos inferiores, o que criava a impressão de esses estarem suspensos.

Atualmente, para integrar a vegetação com a edificação, a prática mais comum é utilizar a vegetação como um material de revestimento, em vez de plantar indivíduos arbóreos nos níveis, como ocorreu na antiga Babilônia. Dessa forma, a vegetação pode ser utilizada nas coberturas, sendo denominada *teto verde*, ou como revestimento de fachadas ou vedações no interior da edificação, o que recebe o nome de *parede verde*.

Essa vegetação pode ser fixada por meio de três métodos básicos, os quais estão apresentados na figura 6: 1 – através do uso de espécies de hábito trepador e de um suporte para o seu crescimento, tal como uma cerca, que fica instalado próximo à parede; 2 – pelo uso destas mesmas espécies, mas aderidas diretamente à superfície da parede; 3 – através do plantio de vegetação herbácea, em nichos de uma estrutura preparada para esse uso. O primeiro método de fixação é o mais adaptável à morfologia que será revestida, além de requerer menor consumo de recursos naturais e se aproveitar da especialização da vegetação de hábito trepador, sendo método mais indicado e utilizado nesse estudo.

As paredes verdes estão cada vez mais presentes na arquitetura, sendo utilizadas em residências, edificações comerciais e instituições públicas, com variada possibilidade de espécies e hábitos de vegetação e materiais, o que permite diversas combinações de cor, textura e formas, como é indicado nas figuras de 7 a 12.

Figura 6 – Métodos de Fixação de Vegetação



Vegetação Aderida à um Suporte

Vegetação Aderida à Fachada

Vegetação em Nichos



Figura 7 – Casa de Comércio e Indústria de Picardie

Fonte: Minguet. 2014, p.12



Figura 8 – Casa de Comércio e Indústria de Picardie

Fonte: Minguet. 2014, p.10



Figura 9 – Sombra Verde

Fonte: Minguet. 2014, p.20



Figura 10– Casa CorManca

Fonte: Minguet. 2014, p.33

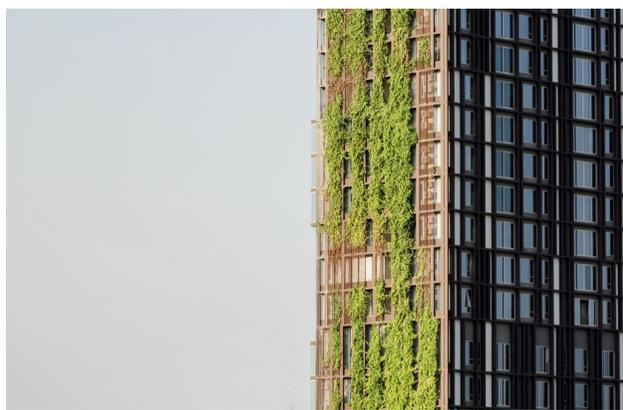


Figura 11 – Ideo Morph 38

Fonte: Minguet. 2014, p.39



Figura 12 – Rua Cecil 158

Fonte: Minguet. 2014, p.104

A presença da vegetação nas edificações, em forma de parede verde, além de causar impacto visual, também influencia a vida dos usuários do edifício e entorno imediato. A forma como isso ocorre e as mudanças que a presença das paredes verdes promovem na vida das pessoas, é determinada pelas vantagens e desvantagens desta tipologia. Diversos estudos têm como objetivo determinar a avaliação dos usuários de acordo com a sua percepção em relação às paredes verdes.

Valesan, Fedrizzi e Sattler (2010) realizaram uma pesquisa na cidade de Porto Alegre – RS, onde entrevistaram 52 pessoas usuárias de 49 edifícios que possuíam paredes verdes. O objetivo do estudo foi verificar quais as principais vantagens e desvantagens do uso de paredes verdes segundo os entrevistados. O aspecto positivo mais apontado foi o de “embelezamento da paisagem urbana”.

Em seguida foi citada a “integração do meio urbano com a natureza”, o que evidencia que a presença de vegetação não apenas adiciona um elemento natural na paisagem urbana e aumenta a área verde de uma cidade, mas também pode criar novas possibilidades para ambientes de lazer, contemplação, convivência, agricultura. Outra vantagem aborda o efeito que a vegetação exercia na temperatura e umidade do edifício.

A desvantagem mais citada pelos entrevistados no estudo foi a necessidade de manutenção. Essa característica não tem sua origem apenas na necessidade de poda da vegetação, mas de decisões equivocadas que geram projetos inadequados. Silva (1991) propõe seis categorias de análise de um projeto para estabelecer seu nível de qualidade, enquanto proposta de solução: necessidades, viabilidade (exequibilidade da proposta), grau de definição (nível de abordagem de todos os aspectos materiais), comunicação (descrição para permitir sua compreensão), resolubilidade (grau de resolução) e otimização.

Algumas reclamações acerca das paredes verdes decorrem do fato de o projeto não levar em consideração a carga exercida pela vegetação no momento do dimensionamento estrutural, da escolha inadequada de materiais de revestimento da fachada, da não utilização de produtos impermeabilizantes, da má seleção e do pouco conhecimento sobre vegetações e botânica. Todos esses fatores geram situações e patologias que necessitam de um volume maior e mais especializado de manutenção nas edificações que utilizam paredes verdes. Essa situação é gerada na fase de projeto do edifício, ou, em alguns casos, nos projetos de *retrofit*, por falta de conhecimento profissional. A vegetação deve então, ser considerada um elemento

arquitetônico no processo de projeto, seja para benefício estético, de bem estar do usuário, seja para exercer influência climática, como aponta Krause (1995), para que as vantagens do uso de paredes verdes sejam maximizadas e suas desvantagens reduzidas.

O uso de paredes verdes possui diversas vantagens e inúmeras possibilidades de estudo, porém, este estudo irá focar na avaliação térmica de espécies de trepadeiras do cerrado. Para tal, é necessário compreender alguns conceitos que envolvem esse tipo de estudo, como desempenho térmico e a relação que se estabelece entre a vegetação e o ambiente urbano.

2.2 Vegetação e Desempenho Térmico

A avaliação do desempenho térmico de um material — nesse caso, a vegetação de uma parede verde — é importante para compreender o comportamento térmico de uma edificação ou espaço urbano e como ele irá se relacionar com seus usuários.

As relações térmicas ocorrem entre todos os corpos materiais. Quando dois corpos com temperaturas diferentes se relacionam, há uma transferência de energia térmica, processo para o qual se dá o nome de

calor. Uma forma de facilitar os estudos é delimitar um sistema. Dentro desse sistema, estão todos os corpos que se relacionam termicamente e que nos interessam para a pesquisa. No caso deste estudo, convém delimitar um sistema formado pelo meio ambiente natural, que inclui a superfície terrestre e o sol, o ambiente construído, caracterizado por uma edificação, e o ser humano. Cada um dos componentes desse sistema possui características próprias que podem modificar as trocas térmicas, tal como a incidência solar, o material de uma fachada, ou a atividade desempenhada por uma pessoa no interior de uma edificação.

Para o ser humano, o resultado dessas relações tem como produto o conforto térmico gerado. Trata-se de um estado térmico favorável para que o organismo humano desempenhe suas funções fisiológicas em situação homeostática, o que permite um melhor desempenho na realização de suas atividades físicas e intelectuais.

Para a ABNT NRB 15220 (2005), o conforto térmico é definido como:

“satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente”.

Já a *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE) define, em sua norma nº 55, de 2010, que conforto térmico é:

“a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”.

Como não é possível por exemplo, aumentar a nebulosidade de uma cidade para diminuir a incidência solar, ou gerar chuvas para elevar a taxa de umidade relativa do ar, o componente ambiente natural não é modificável, e temos apenas que nos adequar a ele. Uma forma de adequação é a correta escolha de materiais que sofrem o primeiro contato com o ambiente natural, o que, nesse caso, se refere aos materiais de revestimento. Diversas pesquisas que realizaram avaliações térmicas de vegetação como elemento de revestimento, ou que protegem outras superfícies, demonstram o benefício do uso desse recurso.

A diminuição da incidência solar nas superfícies dos ambientes construídos pelo uso da vegetação é a estratégia mais eficiente para se evitar o ganho de calor (Romero, 2013). Em termos físicos, o desempenho térmico da vegetação é caracterizado pela absorção de

cerca de 90% da radiação visível e 60% da infravermelha, que são utilizadas em suas funções fisiológicas. O restante da radiação é transmitida pelas folhas ou refletida, ou seja, há uma atenuação da radiação de onda curta, o que diminui a ocorrência dos efeitos de ofuscamento e reverberação e atenua a radiação solar incidente nas superfícies, diminuindo-se, assim, seu ganho de calor e a transmissão de radiação de onda longa para o seu entorno.

Tsoumarakis *et al.* (2008) realizou um estudo que comparou as temperaturas diárias entre paredes verdes e tradicionais. Ficou claro que a vegetação auxilia a manter as temperaturas mais baixas durante o dia, e também que, devido a uma camada de ar entre a vegetação e a parede, que funciona como isolante, houve maior atraso térmico, o que manteve as temperaturas noturnas mais altas e diminuiu a amplitude de variação diária total.

Labaki *et al.* (2011), em um estudo sobre a atenuação da radiação solar pelo uso de vegetação arbórea, observou uma diminuição de 92,8% na incidência de radiação solar, causada por um Jambolão (*Cingingium jambolana*), uma árvore de folhas persistentes, 70,2% por um Sombreiro (*Clitoria fairchildiana*) e 29,9% por um Cedro-Rosa (*Cedrebra fissilis*), todos na estação de inverno e sem folhas.

Além dos estudos que relacionam o uso de vegetação e paredes verdes com a amenização de temperaturas, existem outros que verificam a sua capacidade em filtrar o ar (Pope *et al.*, 2009), prover isolamento acústico (Wong *et al.*, 2010) e economizar energia elétrica. Gupta *et al.* (2011) realizou simulações computacionais tendo como modelo um edifício de escritórios de seis pavimentos em Londres (UK). O uso de paredes verdes em todas as fachadas acarretou uma redução total anual de 3.35% no consumo de energia elétrica, pela diminuição com o gasto em aquecimento (5%) e pelo aumento no gasto com resfriamento (6.6%), o que aponta para a característica isolante da vegetação, que no caso em questão, manteve as temperaturas internas no período mais quente do ano. O estudo sugeriu que as estratégias de ventilação da edificação deveriam estar em concordância com o uso de paredes verdes, a fim de evitar o isolamento excessivo.

Esses resultados demonstram que a vegetação possui um desempenho térmico mais favorável ao conforto térmico do que outros materiais convencionais de revestimento. Este estado é alcançado, pois, dentro do balanço térmico humano, o ganho de calor é menor ou igual à perda de calor. O ganho ou a perda de calor são determinados por características térmicas do ambiente, tal como absorvância e emissividade

dos materiais envolvidos, pelos processos físicos de troca de energia térmica, tais como radiação, condução e evaporação, que serão discutidos posteriormente, e pelos processos fisiológicos do ser humano, que produzem ou dissipam energia térmica, como a atividade metabólica, o suor e a transpiração não perceptível. As relações térmicas que influenciam o balanço térmico são melhores ilustradas na figura 13.

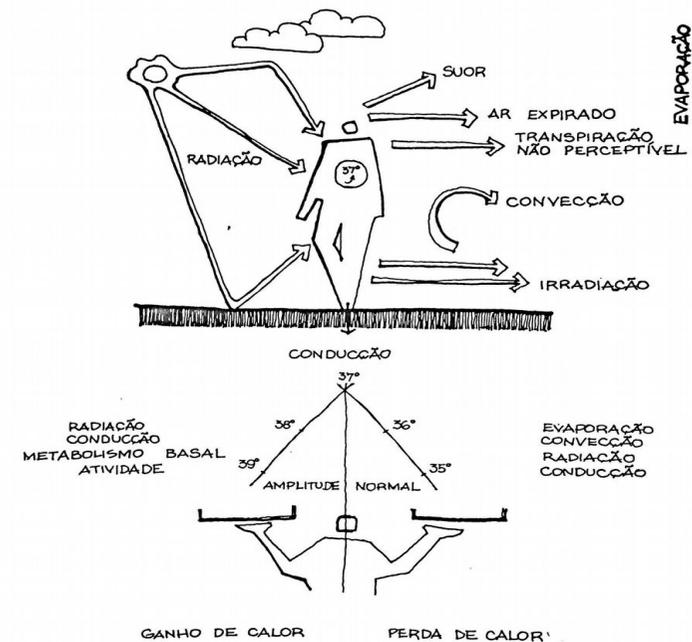


Figura 13 – Balanço Térmico Humano

Fonte: Romero (2000, p.49)

Outra característica relevante é o fato de a vegetação ser um elemento que exerce influência não apenas na edificação em que se encontra, mas também no seu entorno. Sua presença em forma de manchas pode alterar as relações entre a fauna e flora urbana. Os resultados dessa interação são objeto de estudo da Ecologia Urbana, assunto que será tratado na próxima seção.

2.3 Paredes Verdes e Ecologia Urbana

Definida pela primeira vez em 1866 pelo alemão Ernst Haeckel, *Okologie*, a ecologia é “a ciência capaz de compreender a relação do organismo com o seu ambiente”. Desde essa proposição, a ecologia se especializou em diversas áreas, como a ecologia animal, ecologia vegetal e ecologia molecular, dentre outros. O conjunto de organismos, como animais e vegetais, somado ao seu ambiente físico, constitui um ecossistema. Partindo dessa análise e considerando a soma da população humana e de demais organismos animais, vegetais e de outros reinos com o ambiente urbano, definimos o ecossistema urbano, para o qual uma área da ecologia se propõe a estudar: ecologia urbana.

As paredes das edificações, as quais são localmente extensas e

diversas dentro das cidades, geralmente não são objeto de estudo de ecologia no Brasil. Os primeiros estudos na área foram primariamente inventários botânicos, como os de Darlington (1981), e Segal (1969). Estudos mais recentes buscam desvendar as características das paredes que influenciam a presença de vegetação, como os desenvolvidos por Andeweg (2000) e Francis e Hoggart (2008). Segundo Francis (2010), as paredes podem ser projetadas de forma a facilitar o crescimento e a diversidade de espécies vegetais.

Segundo Meiners (2002), as paredes agem como um *habitat* para uma diversidade de espécies e podem ser definidas como uma comunidade biótica ou um conjunto associado a um ambiente físico em um local específico.

A maioria dos estudos se ocupa em investigar o crescimento natural de vegetação aderida naturalmente às paredes, diferentemente das paredes verdes instaladas artificialmente. No entanto, esse campo de estudo contribui para desvendar questões físicas e morfológicas, como, por exemplo, a influência que o substrato, a umidade, os nutrientes e o clima local exercem no crescimento vegetal.

Conforme as cidades crescem em sentido vertical, um fenômeno verificado como tendência em grandes cidades, com a consequente

diminuição das áreas horizontais disponíveis para árvores, nasce a necessidade de aumentar a área vegetada da cidade de outra forma vertical. Há um grande potencial para o uso das paredes das edificações nas cidades. Isso pode ser ilustrado ao tomar como exemplo uma análise das superquadras de Brasília – DF. Segundo Brino (2003), cada superquadra possui uma dimensão de 280 m x 280 m, o que resulta em 78.400 m², com a presença de onze blocos, cada um ocupando uma área de 1.069 m², totalizando 11.759 m², aproximadamente 15% da área total. Cada projeção mede 12,5 m x 85 m e 18 m de altura (seis pavimentos), sendo geralmente uma fachada de maior dimensão ocupada por janelas, com dimensões que variam de acordo com o tipo de bloco, e que portanto, será desconsiderado. Dessa forma, a área de parede disponível em cada projeção é de 12,5 m x 18 m x 2 m + 85 m x 18 m, que totalizam 1980 m², ou 21.780 m² se somados às onze projeções. Essa área corresponde à 27,7% da área total da superquadra e quase o dobro da área horizontal ocupada pelo edifício (11.759m²). No caso deste estudo, a vegetação será aplicada em uma parede verde na cidade de Brasília, que está circundada pelo cerrado do planalto central do Brasil, no centro-oeste do país. Dessa forma, é adequado que se verifiquem as características da vegetação nativa, bem como o clima típico da cidade,

já que são constituintes importantes do ecossistema local.

2.4 Características e Potencial da Vegetação do Cerrado

O mapa mundial de vegetação, produzido por Candolle (1855), serviu de base para que Wladimir Köppen publicasse sua classificação climática (Sá Júnior, 2009). Segundo Köppen, a vegetação natural é uma expressão do tipo de clima que prevalece sobre aquela área. Esse conjunto de interações definem os biomas. As diferenças nas superfícies dos continentes, tais como a composição do solo e a altitude, afetam os ecossistemas dentro de cada bioma.

Em termos climáticos, o Cerrado apresenta moderada umidade relativa do ar, com uma média anual entre 60% e 80%. A média das temperaturas mais baixas está entre 18 °C e 22 °C e das máximas entre 24 °C e 33 °C. A quantidade média anual de radiação está entre 6.000 cal.cm⁻².ano⁻¹ e 8.800 cal.cm⁻².ano⁻¹. Através da classificação de Köppen e de acordo com a temperatura média do mês mais frio (julho), estabelecem-se dois tipos de clima predominantes:

- Megatérmico ou tropical úmido: com o subtipo clima de savana,

inverno seco e chuvas máximas de verão. Presente na maior área do Cerrado.

- Mesotérmico ou temperado quente: com inverno seco (tropical de altitude) e temperatura média do mês quente maior que 22 °C. Presente no sul de Minas Gerais e no Mato Grosso do Sul.

Eiten (1972, 1977, 1978) afirma que o Cerrado é caracterizado primordialmente (80% - 90%) por um tipo de savana, definida por Collinson (1998) como uma formação tropical com domínio de gramíneas, contendo uma proporção maior ou menor de vegetação lenhosa aberta e árvores associadas. Porém, existem também campos puros e grandes formações florestais.

Segundo Silva *et al.* (2008) (Embrapa, p.69), o bioma Cerrado é a segunda maior formação vegetal brasileira e se localiza entre 5° e 20° de latitude sul e 45° a 60° de longitude oeste. Ocupa aproximadamente 2 milhões de km², o que corresponde a aproximadamente 23% do território brasileiro, dimensão que fica evidente na figura 14. O cerrado está presente nos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul,

Rondônia, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Bahia, Minas Gerais, São Paulo e Distrito Federal.

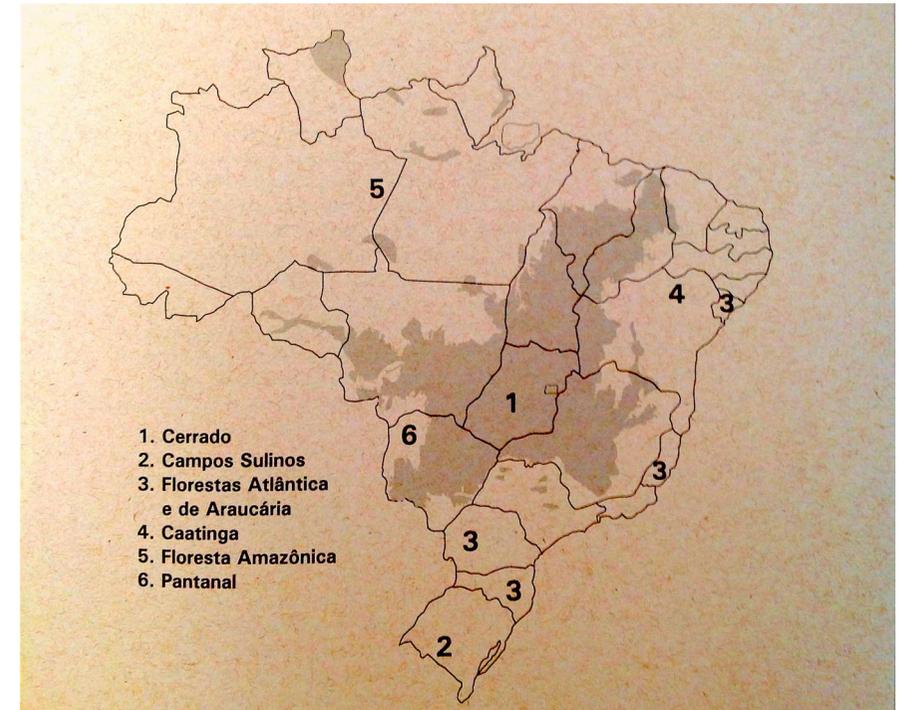


Figura 14 – Distribuição Geográfica do Cerrado

Adaptado de Ribeiro e Walter (2008, p.153)

Devido a sua grande extensão territorial, existem grandes populações, como a do centro-oeste brasileiro, que possui mais de 14.000.000 de pessoas que vivem em contato com o Cerrado. Dessa forma era de se esperar que os recursos disponibilizados pelo bioma fossem amplamente utilizados, ou ao menos, conhecidos. Isso porque, por exemplo, o uso de recursos vegetais pelas populações humanas ocorre há séculos, em diversos campos, tais como na agricultura, indústria farmacêutica e moradia, o que atesta a existência de um relacionamento entre o homem e a vegetação do seu entorno. Isso indica que analisar os recursos vegetais disponíveis no local de moradia é um comportamento ancestral, o qual gera conhecimento e no caso deste estudo, possibilita a integração entre o espaço construído e o espaço natural.

O Cerrado se destaca pela sua biodiversidade, que pode ser qualificada pela diversidade em ecossistemas, em espécies biológicas, em endemismos e em patrimônio genético, principalmente, no que diz respeito aos seus recursos vegetais.

Segundo Felfili *et al.* (2008), a flora do Cerrado está entre as mais ricas savanas do mundo, com mais de 10.000 espécies de plantas vasculares catalogadas, com índices de diversidade comparáveis àqueles

encontrados em florestas tropicais úmidas. Além disso, por ser uma região biogeográfica que apresenta fauna e flora endêmica, e que sofre ameaças de destruição, o Cerrado é classificado pela Organização Não Governamental (ONG) *Conservation International* (CI) como um (*hot spot*), sendo de grande interesse para a conservação.

Porém, apesar da diversidade encontrada na flora do cerrado, seu envolvimento e uso pela população é pouco difundido, ficando restrito, na maioria das vezes, às comunidades tradicionais. Sua presença nas obras arquitetônicas é escassa. Poucas espécies são conhecidas e utilizadas pelos arquitetos em seus projetos. O mercado de comércio de vegetação ornamental também não possui capacidade de oferecer vegetação do Cerrado para seus clientes. Um estudo de caso realizado por Sorte, Silva e Romero (2015), na cidade de Brasília (Brasil), verificou que entre as paredes verdes analisadas há uma predominância total (100%) de espécies vegetais exóticas. Isso fica esclarecido na figura 15, que mostra a edificação com a maior (em área) parede verde em Brasília – DF, e que não possui vegetação nativa. Esses espaços, ao utilizarem vegetações originárias de outros biomas, como o florestal amazônico e asiático, deixam de contribuir para a preservação da flora do bioma local.



Figura 15– Edificação em Brasília com Parede Verde sem Vegetação Nativa,
Localizado em -15°.81'60.62" S, -47°.84'40.87" WO

Em contraposição, quando são analisadas paredes que tiveram um crescimento natural de vegetação, há uma predominância de espécies nativas. Francis (2010) reuniu dados sobre o inventário botânico de vegetações aderidas a diversas paredes no Reino Unido, França, Itália, Bulgária, Brasil, Irlanda, República Checa e Grécia. A quantidade máxima de vegetação exótica encontrada por ponto foi de 23%, na cidade de

Durham (UK).

A escolha por espécies nativas é benéfica em vários aspectos: segundo Nascimento e Oliveira (2005) e Rocha (1995), as plantas nativas constituem importante patrimônio cultural e econômico para as populações locais, representam a possibilidade de conciliação entre os objetivos da intervenção antrópica e os da preservação da biodiversidade e permitem a integração de projetos paisagísticos ao entorno paisagístico natural. Trata-se de uma posição de respeito a uma área única: o bioma local.

Em adição, o uso de vegetação local é uma estratégia de divulgação da fauna nativa, o que gera o sentimento de interesse e pertencimento pela população local. Em vez de buscar outras espécies, uma população, quando apresentada ao potencial e diversidade de sua fauna nativa, passa a se tornar defensora e admiradora daquele recurso, e isso é especialmente benéfico para a conservação do bioma, principalmente no caso do Cerrado, que possui uma flora com alta diversidade e com potencial de aplicação em edificações. Trata-se de uma oportunidade para a arquitetura representar o Cerrado.

Dessa forma, pelo potencial paisagístico existente pela alta diversidade, pela possibilidade de conservação através da expansão de

uso da flora e pela possibilidade de ser alinhada aos interesses de projetos arquitetônicos e paisagísticos, esse estudo irá focar apenas nas espécies nativas do Cerrado. Em adição, por conta de sua possibilidade de execução simples e de uso em diversas formas, será enfatizada a vegetação de hábito trepador para a composição de paredes verdes.

As trepadeiras são um grupo botânico, juntamente com as lianas e cipós, de vegetação que se fixa ao solo e se apoia em outros elementos, com o objetivo de obter sustentação para se desenvolver verticalmente. Existem espécies entre pteridófitas, gimnospermas e angiospermas. Esse hábito está representado em várias famílias botânicas. Segundo Pujals (2011), essas vegetações possuem caule herbáceo ou sublenhoso, seu tamanho é reduzido, e sua distribuição, restrita a áreas mais abertas, como clareiras e bordas de mata. Já as que possuem caule lenhoso (com xilema derivado do câmbio vascular) germinam a partir do solo, tornam-se plântulas terrestres e, ao crescerem, se apoiam em suportes físicos como outras vegetações, através de gavinhas, caule volúvel ou raízes grampiformes.

Segundo Engel (1998), a vegetação de hábito trepador é um componente importante das comunidades florestais. São mais abundantes, mais diversas e apresentam maior variedade de formas e

tamanhos nos trópicos, visto que mais de 90% de todas as espécies conhecidas estão restritas a esta região (Walter, 1971), apesar de ocorrerem praticamente em qualquer clima e comunidade vegetal que ofereça suporte físico. As trepadeiras tendem a ser intolerantes à sombra, porém, essa condição pode estimular o alongamento repentino do caule, como em plantas estioladas. A taxa de seu crescimento pode variar entre 5 cm/dia e 130 cm/dia (Peñalosa, 1985), podendo atingir 15 cm de diâmetro de caule e até 70 m de comprimento (Jacobs, 1988).

O Cerrado possui grande diversidade de espécies de hábito trepador, porém, poucas foram catalogadas e possuem dados sobre sua morfologia, assim como os dados relacionados a sua localização geográfica são escassos. Ramalho e Proença (2004) reuniram informações sobre morfologia, ocorrência, indicações de uso e épocas de floração e frutificação de 34 espécies, distribuídas em quatorze famílias. Essas informações resultaram em um trabalho que possuiu o potencial de orientar projetos de paisagismo e estudos científicos que buscam explorar outros aspectos da vegetação apresentada e que serviu de ponto inicial para o presente estudo, como um catálogo para a escolha das espécies adequadas para a composição de paredes verdes.

2.5 Clima de Brasília – DF

A região climática deste estudo é Brasília, localizada no centro-oeste brasileiro, em uma região geográfica denominada planalto central (15°47'38" S 47°52'58" O), a uma altura média de 1100 metros.

Diversos autores discorrem sobre uma definição para o clima. Segundo Grisolet, H. *et al.* (1962) *apud* Ferreira (1965), o clima é um conjunto de elementos que, em sua sucessão habitual, em um período determinado, caracterizam a atmosfera e concorrem para dar a cada ponto da terra sua individualidade. Olgay (1963) diz que o clima é uma combinação, em um dado momento, de todas as variáveis meteorológicas.

Alguns pesquisadores se dedicaram a descrever o clima da cidade de Brasília – DF com o objetivo de classificá-lo. Ferreira (1965), ao analisar dados referentes à temperatura do ar e à umidade relativa do ar, entre 1960 e 1964, identificou dois períodos: quente e úmido, de outubro a abril; e um período seco, de maio a setembro. Segundo Maciel (2002), o período entre agosto e outubro é o de maior desconforto térmico. Em seu estudo, analisou os dados climatológicos no período de 1982 a 1997 e outubro registrou a temperatura média mais quente (23

°C) e a maior ocorrência de temperatura diária maior que 30 °C, que correspondeu a 6% dos dias do mês. Agosto apresentou a menor umidade relativa do ar média (56%) e setembro a menor umidade relativa absoluta (8%).

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, Brasília apresenta um clima tropical com estação seca de inverno (Aw), que também é conhecido como clima de savana, clima tropical de estações úmida e seca ou clima tropical semiúmido. A temperatura média mensal é superior a 18 °C e em pelo menos um mês do ano, a precipitação média total é inferior a 60 mm.

Além da classificação climática de Köppen-Geiger, resolveu-se que eram necessárias informações mais detalhadas sobre os elementos climáticos da cidade de Brasília. Para tal, foram utilizadas as informações computadas pelo INMET. Segundo a OMM (Organização Meteorológica Mundial), as normais climatológicas devem ser calculadas por meio de coleta de dados de um período longo e uniforme com duração mínima de trinta anos. O INMET coletou dados de suas estações meteorológicas entre 1º/01/1961 a 31/12/1990, os quais foram revisados no ano de 2009.

De acordo com essas informações, é possível compreender a intensidade dos principais elementos climáticos em Brasília, tais como

temperatura, pluviosidade, umidade relativa do ar e nebulosidade, apresentadas com intensidades relativas às médias anuais na tabela 6.

Tabela 6 – Caracterização Climática de Brasília em Médias Anuais (1961 – 1990).

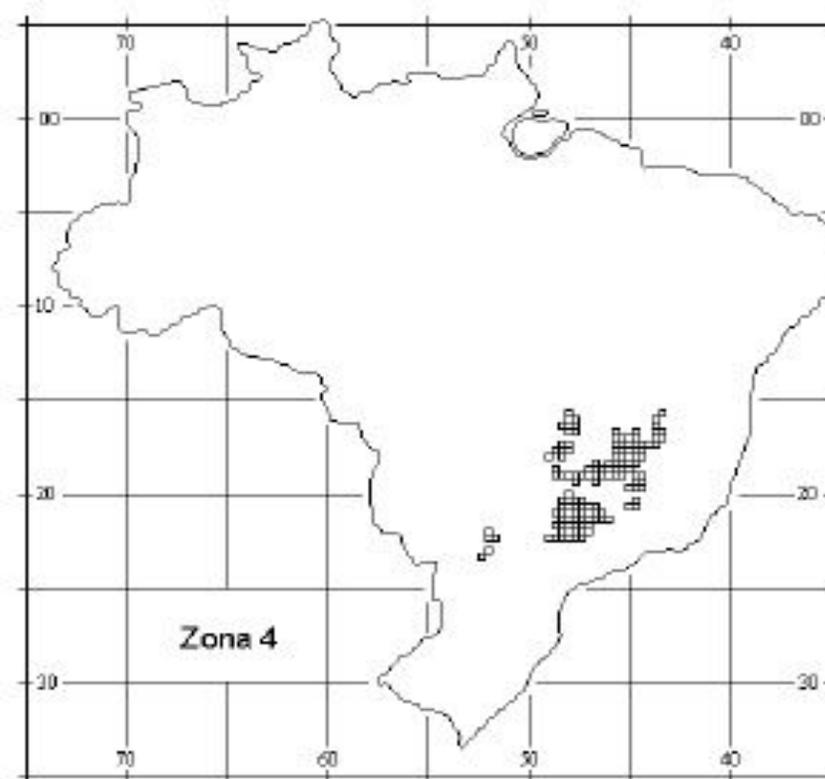
Adaptado de INMET (2015)

Característica Climática	Intensidade
Temperatura	21.1 °C
Pluviosidade	1668 mm
Umidade relativa do ar	70 %
Nebulosidade	0.6
Velocidade do vento	2.56 m.s ⁻¹
Direção predominante do vento	Leste

Estas normais climatológicas foram utilizadas, juntamente com outras fontes, que compreendem 330 cidades no período de 1931 a 1990, pela ABNT, na Norma Brasileira (NBR) 15220, de 2003, ao propor o Zoneamento Bioclimático Brasileiro em oito zonas “relativamente homogêneas quanto ao clima”. A partir dessas informações, o clima de Brasília foi inserido na zona 4, conforme a figura 16.

Para caracterizar o clima, a ABNT utilizou variáveis climáticas como médias mensais das temperaturas máximas, temperaturas mínimas

e umidade relativa do ar. Essas informações estão representadas em carta bioclimática adaptada de Givoni (1992), ilustrada na figura 17.



Fonte: ABNT (NBR 15220, 2005)

Figura 16 – Zona Bioclimática 4

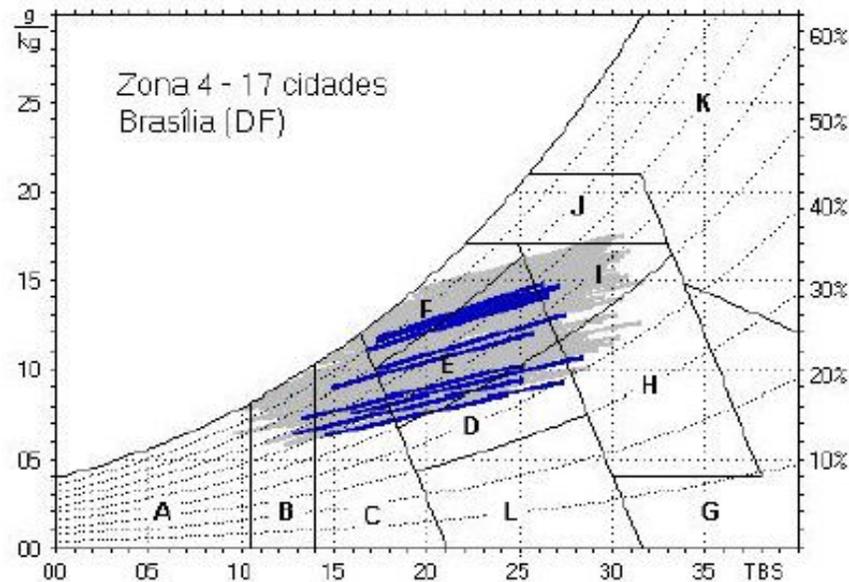


Figura 17– Caracterização do Clima da Zona Bioclimática 4

Fonte: ABNT (NBR 15220, 2005)

A partir destes dados e estudos que caracterizam as condições climáticas, existem várias recomendações arquitetônicas para o conforto térmico em Brasília - DF. A própria ABNT (NBR 15220, 2005) indica o uso de resfriamento evaporativo e inércia térmica como estratégia de condicionamento térmico passivo. Já Maciel (2002), ao analisar diferentes estratégias bioclimáticas, concluiu que a ventilação, inércia térmica e

resfriamento evaporativo são as estratégias mais adequadas para uma situação de calor em Brasília, ao passo que a inércia térmica com ganho de calor é a mais indicada em uma situação de frio.

O uso de paredes verdes vai de acordo com as sugestões de estratégias para o conforto climático de Brasília. A transpiração foliar da vegetação libera água para o ambiente, que fornece energia térmica para que a água mude do estado líquido para o estado gasoso, o que configura o resfriamento evaporativo.

3

MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo tem o objetivo de detalhar os materiais e metodologia utilizada do levantamento inicial às simulações computacionais. As etapas metodológicas respondem principalmente a duas perguntas iniciais desse estudo: quais espécies vegetais de hábito trepador nativas do bioma Cerrado são adequadas para a aplicação em paredes verdes? Como é possível avaliar o desempenho térmico de cada uma dessas espécies e comparar com uma situação controle, sem vegetação. A figura 18 e tabela 7 resumem a metodologia aplicada para atingir o objetivo de cada uma das etapas, bem como o fluxo de experimentos.

Para a escolha da vegetação, realizou-se um levantamento bibliográfico com a finalidade de se estabelecer um catálogo base de vegetação. Em seguida, essa vegetação foi selecionada segundo os critérios deste trabalho: 1 – tolerância ao sol pleno, 2 – nativa do bioma Cerrado e 3 – que possua apelo paisagístico.

Por meio do banco de dados do Herbário do Instituto de Ciências Biológicas da UnB, foram analisadas informações de coletas de indivíduos de cada espécie. As coordenadas geográficas dos pontos de interesse foram visitadas para verificar a presença dos indivíduos e a possibilidade coleta de frutos e folhas.

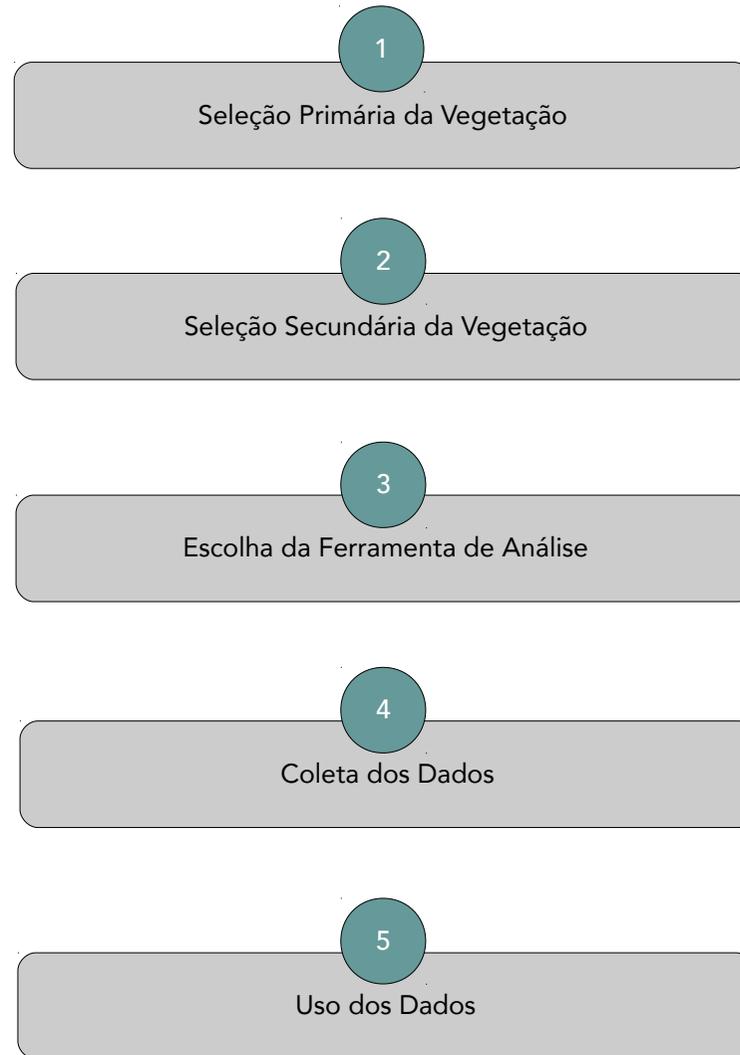


Figura 18 – Fluxograma de Materiais e Métodos

Tabela 7 – Metodologia Aplicada às Etapas

Etapa	Metodologia
1	Consulta ao livro "Trepadeiras Ornamentais do Cerrado" (Ramalho e Proença, 2004) e seleção de acordo com critérios como: adequação à condição de sol pleno, quantidade de meses com floração/frutificação e apelo paisagístico.
2	Consulta ao banco de dados do Herbário do Instituto de Ciências Biológicas da UnB, visita <i>in loco</i> dos pontos de coletas das espécies selecionadas na primeira etapa e análise de viabilidade de estudo dos indivíduos encontrados.
3	Através de consideração em relação à localização dos indivíduos para o estudo, sua quantidade, taxa de crescimento e tempo disponível para a pesquisa.
4	Através de análise e seleção dos parâmetros do banco de dados de vegetação (PLANT.DAT) do ENVI-met, do uso do IRGA-Lci, do <i>scanner</i> de área foliar e de coletas de frutos e sementes.
5	Através de simulação computacional utilizando-se o ENVI-met, com dados primários coletados na etapa anterior, consideração do clima de Brasília-DF, estudos de viabilidade e germinação de sementes e plantio.

Como as vegetações alvo estão localizadas em áreas distantes entre si, em reservas naturais, sem a possibilidade de controle para padronização da pesquisa, e como não existe a possibilidade de construir uma edificação para utilizar essa vegetação em uma parede verde em um ambiente controlado, foi decidido que seria utilizada uma simulação computacional para a avaliação térmica de cada uma das espécies.

O *software* escolhido para este trabalho foi o ENVI-met, um programa que utiliza modelos tridimensionais para simular o microclima urbano, através de uma análise entre os elementos superfície, clima e o mais relevante para este estudo: a vegetação. É muito utilizado em estudos na área de arquitetura, sendo adequado para avaliar o efeito de uma parede verde na fachada de uma edificação.

Sua vantagem para esse estudo é que é possível construir um banco de dados com distinção entre cada vegetação, através de parâmetros fisiológicos e morfológicos da espécie escolhida. Este banco de dados, denominado *Plant Database* (PLANT.DAT) é apresentado na tabela 8, em que são exibidos os parâmetros utilizados, suas descrições e os valores de exemplo que constam no banco de dados padrão do *software*. A partir dos parâmetros exigidos pelo ENVI-met para criar o perfil de uma vegetação, foram selecionados os dados de coleta.

Tabela 8 – *Plant Database* do ENVI-met

Parâmetro	Descrição	Exemplo
ID	É a identificação da vegetação	M
C?	Distingue a vegetação em relação ao seu mecanismo de fixação de CO ₂ , que pode ser do tipo C3 ou C4.	C03
TY	Classifica a vegetação em árvore decídua (01), conífera (02) ou gramínea (03).	200
rs_min	Indica a mínima resistência estomatal.	0.20
a_f	Indica o albedo de onda curta da folha da vegetação.	01.50
HH.HH	Indica a altura da vegetação, em metros.	00.50
TT.TT	Indica a profundidade da raiz, em valores positivos.	0.50
LAD 1 a	É a Densidade de Área Foliar (LAD) em 10 pontos de análise.	0.300 ...
LAD 10		0.300
RAD 1 a	É a Densidade de Área de Raiz (RAD) em 10 pontos de análise.	0.100 ...
RAD 10		0.100
NAME	Nome e descrição da vegetação.	Milho, 1.5m

Esses dados foram coletados em saídas de campo, com o uso de aparelhos, tais como *scanner* de área foliar, para a medição de área foliar, e um sistema aberto e portátil de trocas gasosas por infravermelho (IRGA), para avaliar as taxas de trocas gasosas. Ambos aparelhos serão especificados no tópico sobre coleta de dados.

Dos parâmetros utilizados pelo banco de dados do ENVI-met, dois merecem atenção especial e tiveram metodologia específica para a sua obtenção, sendo eles a Mínima Resistência Estomatal (rs_{min}) e *Leaf Area Density* (LAD). Os dados para o cálculo de LAD foram obtidos através de um método destrutivo, visto que é um dado bastante complexo de se obter, principalmente quando o objeto de estudo é uma vegetação de hábito arbóreo. Segundo Weiss e *t al.* (2004), o LAD é definido com a área de um lado da folha por camada horizontal de volume, ou seja, em uma camada definida pelo pesquisador, como, por exemplo, entre a altura de 1 m e 2 m da copa, são medidos o volume ocupado pela copa nesse trecho e a soma da área de todas as folhas nesse espaço. Levando em consideração um indivíduo arbóreo, o LAD irá variar de acordo com a camada analisada, pois a copa geralmente muda de forma conforme sua altura. Por conta dessa dificuldade metodológica, vários autores, como Hosoi (2010), partem de instrumentos ópticos, ou

utilizam *laser* para escanear uma árvore e separar todas as informações em classes de volume, área e folha. Para esse dado ser mais factível e possível de ser aplicado de forma padronizada em todas as espécies, utilizou-se um método direto, que será explicado posteriormente.

3.1 Escolha das Espécies Vegetais

O livro “Trepadeiras Ornamentais do Cerrado”, de Ramalho e Proença (2004), foi utilizado como catálogo base para este estudo, por possuir informação única sobre vegetação de hábito trepador do Cerrado. Somente foram utilizadas espécies nativas do bioma Cerrado.

Foram selecionadas espécies que apresentavam grande potencial para aplicação em paredes verdes, de acordo com os objetivos deste trabalho. Além do fato de serem nativas, outros critérios de escolha foram aplicados, tais como:

- Vegetação de sol pleno: considerando-se que a radiação solar é o principal meio de ganho de calor em uma edificação, foram escolhidas espécies que, em uma fachada, poderiam suportar exposição contínua ao sol e que fossem sempre verdes, ou seja, que não perdessem suas folhas durante o ano. Vegetações de meia sombra ou de sombra plena foram descartadas.
- Potencial paisagístico: além da possibilidade de atuar no conforto térmico, a vegetação também possui características que as torna um elemento de adorno das fachadas, como suas folhas, flores e frutos.

Dessa forma, foram escolhidas espécies que apresentassem floração e frutificação a maior parte do ano. Sendo assim, espécies que floriam por um curto período, como apenas um mês, foram excluídas. Em seguida, foi consultado quais dessas espécies possuíam registro de coleta no Distrito Federal.

3.1.1 Consulta ao Banco de Dados do Herbário do IB/Unb

O próximo passo foi acessar o banco de dados do Herbário do Instituto de Botânica da Unb (<http://www.florescer.unb.br/bol/UB/Home/Index>), o qual possui registros de aproximadamente 200.000 espécies, com informações relevantes como a coordenada geográfica das coletas realizadas. Dessa forma, foi feito um levantamento sobre a localização de indivíduos representantes das espécies selecionadas, com a restrição de estarem localizadas dentro do Distrito Federal.

3.1.2 Visita *in loco*

As localidades foram então visitadas, afim de avaliar a condição do sítio e o seu acesso, o estado dos indivíduos, a possibilidade de coleta de folhas, flores e frutos e seus dados fisiológicos. Foram realizadas dez saídas de campo para a busca dessa vegetação, entre junho e agosto de 2014, nas seguintes localidades:

- Reserva Ecológica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (RECOR)
- Fazenda Água Limpa (FAL – UnB)
- Parque Olhos d'Água – Brasília - DF
- Campus Universitário Darcy Ribeiro
- Centro Olímpico da Universidade de Brasília

A partir disto, foram selecionadas três espécies de fácil acesso e boas condições de serem estudadas e, posteriormente, todas foram identificadas, conforme descrição nas tabelas 9, 10 e 11.

Tabela 9 – Descrição da Espécie *Banisteriopsis anisandra*



Espécie: *Banisteriopsis anisandra* (BA)

Família: Malpighiaceae

Nome popular: cipó prata

Localização: Fazenda Água Limpa – 15° 57' 11.06" S / 47° 56' 17.43" W

Descrição: trepadeira lenhosa, volúvel, podendo comportar-se como escadente, formando moitas caso não encontre suporte, ramos marrons densamente pilosos; folhas simples, verde-amarronzadas, ovadas ou elípticas, coriáceas com pelos que lhe conferem uma coloração prateada na face abaxial (daí o nome comum); inflorescências com grupos de seis a treze flores amarelas. (Ramalho, 2004)

Época de floração: julho a outubro

Época de frutificação: agosto a outubro

Tabela 10 – Descrição da Espécie *Cissus erosa*



Espécie: *Cissus erosa* (CE)

Família: Vitaceae

Nome popular: cipó de fogo

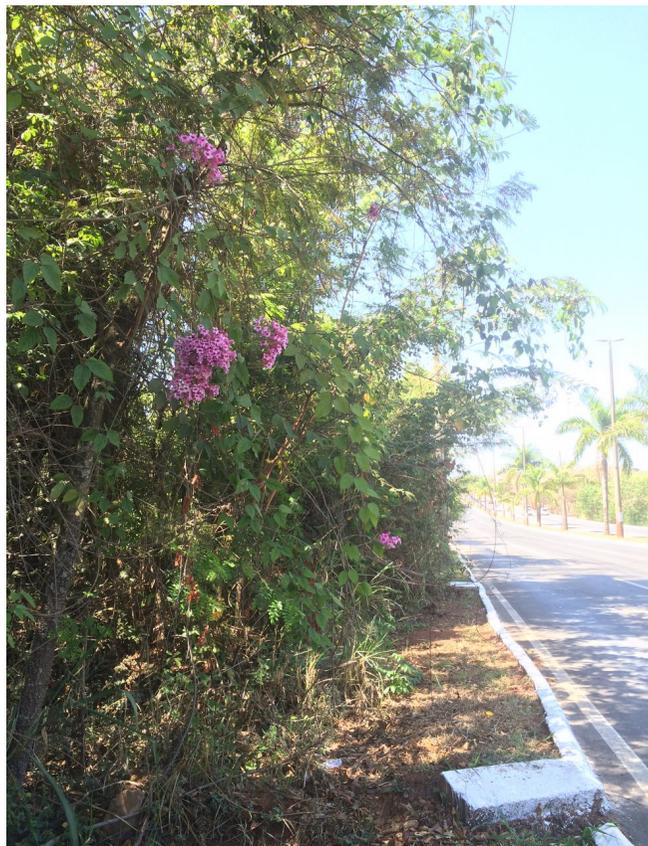
Localização: Reserva Ecológica do IBGE (Recor) – 15° 93' 08.33" S / 47° 90' 19.44" W

Descrição: trepadeira lenhosa com ascensão por gavinhas; ramos jovens vináceos tornando-se marrons quando mais velhos; folhas compostas trifoliadas, membranáceas, brilhosas; inflorescências planas formadas por minúsculas flores vermelhas, eixos das inflorescências também vermelhos bastante vistosos; frutos verdes quando imaturos e negros quando amadurecem (Ramalho, 2004).

Época de floração: o ano inteiro

Época de frutificação: o ano inteiro

Tabela 11 – Descrição da Espécie *Arrabidaea pulchra*



Espécie: *Arrabidaea pulchra* (AP)

Família: Bignoniaceae

Nome popular: não existe

Localização: Parque Olhos d'Água – 15° 44' 27.09" S / 47° 53' 01.98" W

Descrição: Trepadeira lenhosa, com ascensão por gavinhas; ramos jovens estriados; folhas compostas, trifolioladas, levemente pubescentes; inflorescência exuberante apresentando de 20 a 100 flores que variam do rosa-claro ao púrpura; fruto verde, pubescente-viscoso, de 20 a 41 cm (Ramalho, 2004).

Época de floração: março a setembro

Época de frutificação: julho a agosto

3.2 Considerações do ENVI-met

3.2.1 Análise dos Parâmetros Computacionais

Para uma avaliação adequada de cada espécie escolhida para este estudo, uma série de dados foram coletados e inseridos em um arquivos de banco de dados para que o ENVI-met pudesse analisar cada espécie individualmente. Porém, alguns parâmetros foram padronizados para se adequarem ao estudo; outros foram excluídos, dada a impossibilidade de coleta; e os mais relevantes foram coletados da forma mais específica possível, como segue na tabela 12, que explica a situação individual de cada parâmetro neste estudo.

3.3 Coleta de Dados

3.3.1 Coleta de Dados dos Parâmetros ENVI-met

Para coletar os dados necessários para o uso do ENVI-met, foi utilizado o IRGA (Infrared Gas Analyser), modelo LCI, ADC BioScientific (UK), indicado na figura 19, para determinação dos valores de assimilação

máxima de CO₂ (Amax), taxa de transpiração (E) e condutância estomática (gs). O equipamento não revela diretamente os valores da resistência estomatal, e sim a condutância estomatal, sendo necessário realizar uma conversão matemática. O aparelho também não realiza medidas de albedo diretamente, tendo sido utilizado para tanto um método indireto. Folhas de cada indivíduo foram retiradas e colocadas em uma superfície regular, até formarem uma camada homogênea de folhas. Dessa forma, foi mensurada a luz incidente nas folhas, com a câmara próxima a elas e com o sensor de luz do IRGA LCI voltada para o céu. Em seguida, foi mensurada a luz refletida pelas folhas, com a câmara voltada para baixo, próximo à superfície das folhas, sem causar sombreamento. Foram realizadas dez medições de cada situação e estabelecida uma média. O cálculo do albedo se deu então pelo cálculo da razão da média da luz refletida sobre a média da luz incidente.

As medidas foram tomadas para cada espécie, em uma folha totalmente expandida, em condição de temperatura e de luminosidade ambiente. Os dados foram avaliados para verificar sua veracidade e a presença de erros do equipamento ou do usuário. Confirmada alguma discrepância anormal nos dados, uma nova medição era realizada. Os dados foram transferidos para o computador em forma de tabela.

Tabela 12 – Situação dos Parâmetros Analisados

Parâmetro	Símbolo	Situação
Fixação de carbono	C?	Distingue plantas C3 E C4. Foi utilizado um valor específico por espécie.
Tipo	TY	Distingue padrões determinados pelo programa, entre árvores decíduas, coníferas e grama. Foi utilizado um valor padrão para todas as espécies.
Mínima resistência estomatal	rs_min	Foi utilizado um valor específico por espécie.
Albedo de onda curta	a_f	Foi utilizado um valor específico por espécie.
Altura da vegetação	HH_HH	Foi utilizado um valor padrão para todas as espécies.
Profundidade da raiz	TT.TT	Havia impossibilidade metodológica de definição individual. Foi utilizado um valor padrão para todas as espécies.
Densidade de área foliar	LAD	Foi utilizado um valor específico por espécie.
Densidade de área de raiz	RAD	Havia impossibilidade metodológica de definição individual. Foi utilizado um valor padrão para todas as espécies.



Figura 19 – IRGA Lci

A partir desse equipamento, foram coletados os dados de mínima resistência estomatal (rs_{min}) e albedo de onda curta (a_f). As saídas de campo para as coletas de dados foram realizadas entre Julho e Setembro de 2014, no período matutino, das 8h às 9:30h. Foram necessárias dez saídas para obter dados consistentes de cada espécie analisada, tendo cada uma contado com 1 indivíduo representativo e dez medidas (dez folhas adultas). Em cada medição (figura 20) seguiram-se os seguintes passos:

1. conexão da câmara do equipamento ao console principal;
2. acionamento do equipamento e espera pelo tempo de aquecimento (aproximadamente 5 minutos);
3. inserção de uma folha adulta na câmara, de forma a preencher todo o espaço;
4. início da medição, que ocorria até a estabilização dos parâmetros mostrados no *display* (aproximadamente 2 a 3 min);
5. gravação da medida na memória do aparelho.



Figura 20 – Medição com o IRGA Lci

3.3.2 Coleta de Dados para Cálculo do *Leaf Area Density* (LAD)

O LAD é um parâmetro composto de duas variáveis: área foliar e volume, expresso por m^2/m^3 . Para a coleta dos dois parâmetros, foi utilizado um método direto e destrutivo. Por conta das limitações metodológicas citadas anteriormente, cada indivíduo foi resumido a 1 m

de caule principal, em vez de a uma árvore completa, levando-se em consideração que o caule é uniforme. (figura 21)



Figura 21 – Exemplo de Caule Utilizado para Medição de LAD

O volume total desse ramo foi mensurado considerando-se o espaço entre as folhas, como se fosse uma árvore. Esse volume foi extrapolado para um volume de tronco de cone, com a base formada por

folhas mais adultas e com um raio maior, a altura correspondendo à 1 m e a base menor, composta do topo, com raio m.

Todas as folhas desse ramo foram removidas e imediatamente levadas ao laboratório para medição em um scanner de área foliar modelo CI-202 da marca CID Inc (figura 22). Ao total, foram utilizadas 10 folhas maduras de cada espécie. Utilizou-se a média entre elas para a obtenção de área foliar. O valor de LAD então se deu por uma razão da área total foliar sobre o volume do tronco de pirâmide.

3.3.3 Coleta de Sementes

Os frutos de *Cissus erosa* (CE), *Arrabidaea pulchra* (AP) e *Banisteriopsis anisandra* (BA) foram coletados em estágio maduro e imediatamente levados ao laboratório. Para CE e AP, os frutos foram colocados em um recipiente e deixados ao ar livre por sete dias para secarem. Após esse período, cada fruto foi descascado e suas sementes removidas (figura 23). Os frutos de BA não passaram pelo período de secagem, visto que foi suficiente remover apenas parte de sua estrutura alada para o teste de germinação.



Figura 22– Scanner CI-202 CID Inc



Figura 23 – Sementes de *Arrabidaea pulchra*

3.4 Germinação

Inicialmente, trinta sementes de cada espécie foram colocadas em placas de *petri*, forradas com duplo papel de filtro (substrato) e levados à uma câmara de germinação tipo B.O D, da marca Marconi (figuras 24 e 25), com fotoperíodo de 12 horas e temperatura de 25 °C

(temperatura média anual em Brasília), tendo sido monitoradas e regadas diariamente. A semente foi considerada germinada quando emitiu raiz primária e parte do caulículo (figura 26).



Figura 24 – Câmara de Germinação tipo B.O.D Marconi



Figura 25 - Câmara de Germinação tipo B.O.D Marconi

Figura 26 – Germinação de *Cissus erosa*

As sementes que germinaram foram transferidas para um copo plástico descartável (figura 27), preenchido com 30% de vermiculita no fundo, para reter a umidade, e 70% de solo comercial Bioplant®; após esse procedimento, permaneceram na câmara de germinação, para completarem a formação de uma plântula de 5 cm a 10 cm de altura.



Figura 27– Plântula em Copo Plástico

Após atingirem essa altura, foram retiradas da câmara e levadas para um cômodo com insolação predominante, tendo sido regadas diariamente. Com 15 cm a 20 cm foram transferidas para um vaso plástico (figura 28). Com 1 m de altura, os indivíduos foram plantados.



Figura 28 – Indivíduo de *Cissus erosa* em Vaso Plástico

3.5 Modelagem e Simulação Computacional

3.5.1 Entrada de Dados

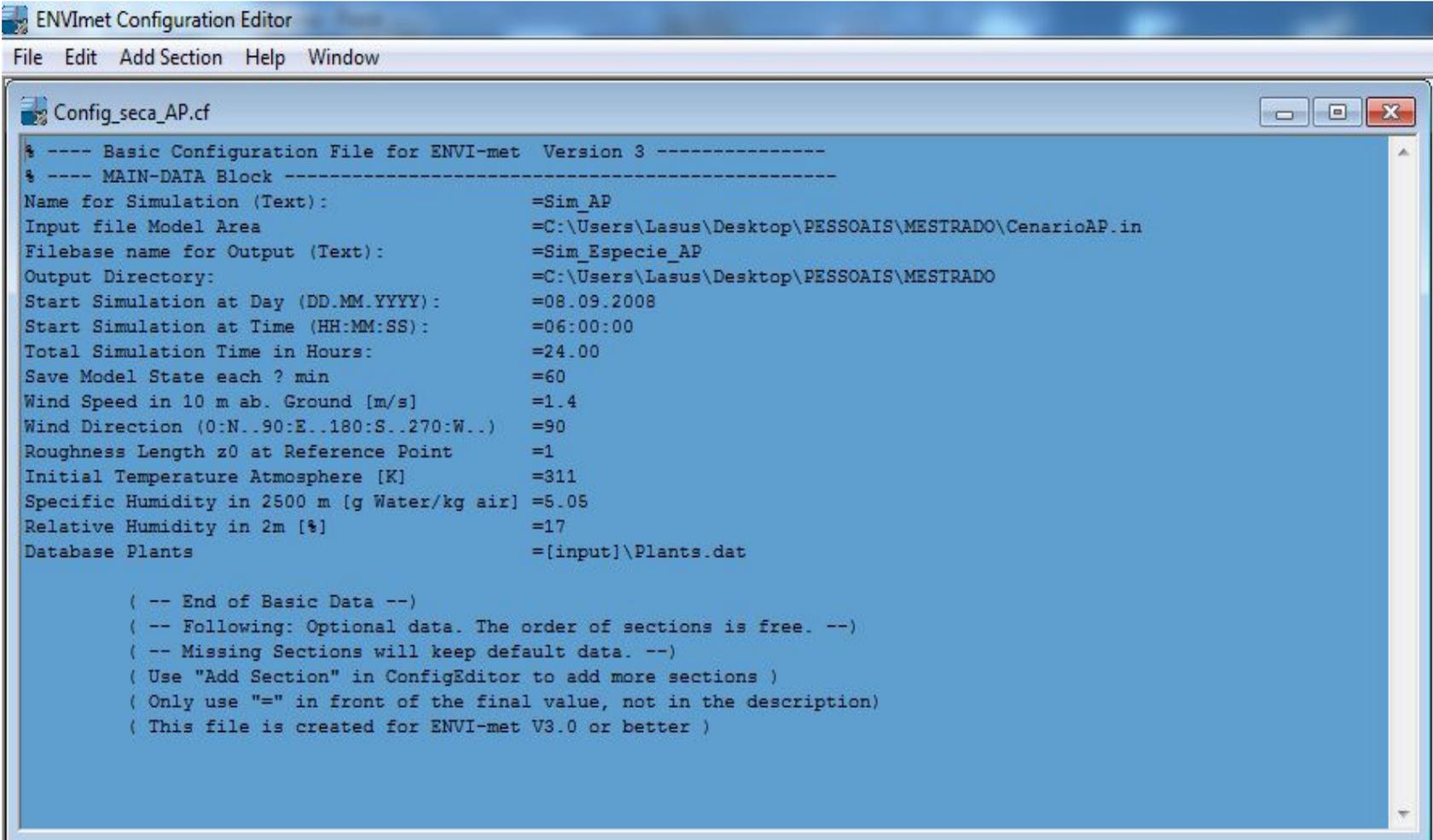
Antes de iniciar uma simulação computacional no ENVI-Met, é necessário configurar os dados que serão utilizados no estudo. Dessa forma, os dados de clima foram configurados de acordo com Brasília e dados de vegetação de acordo com o obtido através do estudo da vegetação alvo. Os dados de área, ou seja, o formato e a disposição das edificações que receberam as paredes verdes, foram elaborados para que não houvesse interferência entre cada edificação e para que as fachadas em todas as orientações pudessem ser analisadas.

- **Dados Climatológicos**

Os dados climatológicos utilizados são os do arquivo *brasilia_seca* (figura 29), correspondentes ao período de seca (maio a setembro), elaborado por Castelo Branco (2009) para simular o clima de Brasília no ENVI-Met.

- **Dados de Área**

Para este estudo, definiu-se uma malha de 40 m x 40 m (figura 30), sendo sua menor porção um quadrado, com 1 m em cada lado; em todas as outras formas e posicionamento esse valor foi utilizado como base. A edificação modelada para o estudo é um cubo, de 3 m x 3 m x 3 m (figura 31) e as paredes verdes foram inseridas no quadrado mais próximo da parede da edificação. As paredes foram criadas com 4 cópias da mesma edificação, equidistantes entre si por 20 m em X e Y, para que não houvesse interferência entre elas, o restante do *grid* foi revestido de solo (*loamy soil*). Cada edificação recebeu a vegetação em uma de suas fachadas (Norte, Leste, Sul e Oeste).



```
ENVI-met Configuration Editor
File Edit Add Section Help Window

Config_seca_AP.cf

% ---- Basic Configuration File for ENVI-met Version 3 ----
% ---- MAIN-DATA Block ----
Name for Simulation (Text):           =Sim_AP
Input file Model Area                 =C:\Users\Lasus\Desktop\PESSOAIS\MESTRADO\CenarioAP.in
Filebase name for Output (Text):      =Sim_Especie_AP
Output Directory:                    =C:\Users\Lasus\Desktop\PESSOAIS\MESTRADO
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY): =08.09.2008
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):  =06:00:00
Total Simulation Time in Hours:       =24.00
Save Model State each ? min          =60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]  =1.4
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..) =90
Roughness Length z0 at Reference Point =1
Initial Temperature Atmosphere [K]   =311
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air] =5.05
Relative Humidity in 2m [%]           =17
Database Plants                       =[input]\Plants.dat

( -- End of Basic Data --)
( -- Following: Optional data. The order of sections is free. --)
( -- Missing Sections will keep default data. --)
( Use "Add Section" in ConfigEditor to add more sections )
( Only use "=" in front of the final value, not in the description)
( This file is created for ENVI-met V3.0 or better )
```

Figura 29– Dados Climáticos Brasília Seca

Adaptado de Castelo Branco (2009)

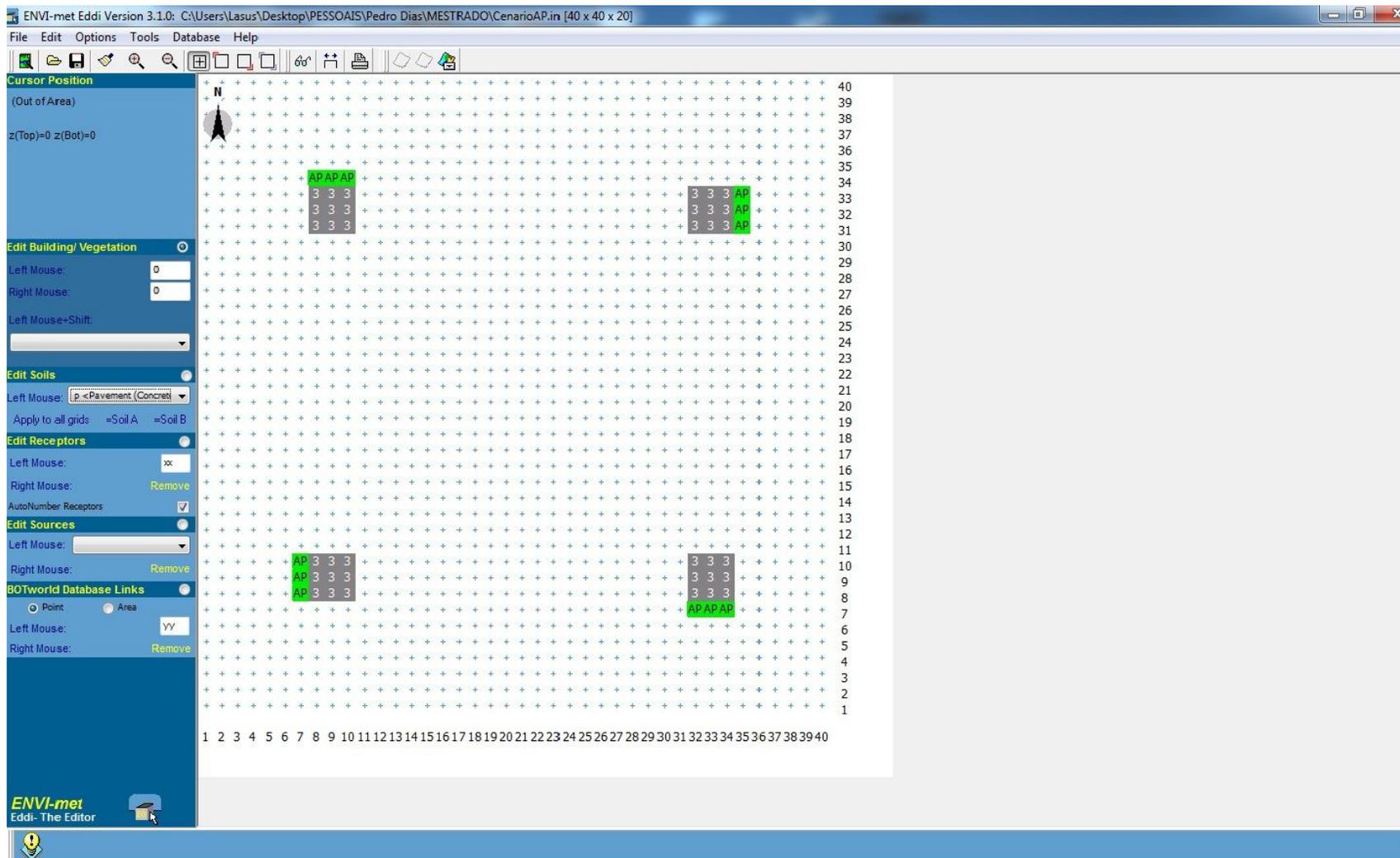


Figura 30 – Área de Estudo com Malha - Edificação e Inserção de solo e Vegetação

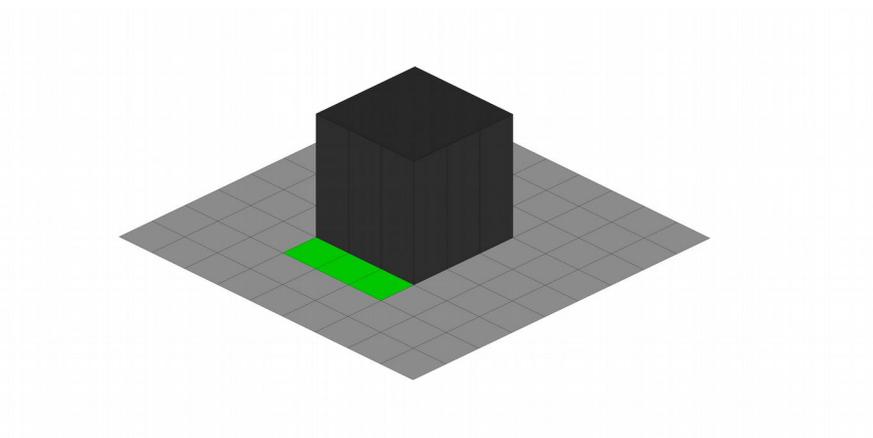


Figura 31 – Edificação Modelada (preto), com Indicação da localização das Paredes Verdes (verde) e solo (cinza)

- **Dados de Vegetação**

Para inserir os dados obtidos de cada vegetação, utilizou-se o comando “Edit PLANTS.DAT...”, dentro do menu “Database”, que disponibiliza o banco de dados padrão do programa (figura 32). Após a revisão dos dados, cada vegetação assumiu os dados apresentados na tabela 13. Esses valores foram então inseridos no arquivo e as vegetações ficaram disponíveis para serem selecionadas e utilizadas.

Tabela 13 – *Plant Database* das Espécies Estudadas

Parâmetro	Espécie		
	<i>Arrebidae pulchra</i>	<i>Banisteriopsis anisandra</i>	<i>Cissus erosa</i>
ID	AP	BG	CE
C?	C3	C3	C3
TY	03	03	03
rs_min	47	247	214
a_f	0.07	0.05	0.06
HH.HH	03.00	03.00	03.00
TT.TT	00.50	00.50	00.50
LAD 1 a LAD 10	1.682	0.750	0.097
RAD 1 a RAD10	0.100	0.100	0.100
NAME	<i>Arrebidaea pulchra</i>	<i>Banisteriopsis anisandra</i>	<i>Cissus erosa</i>

3.5.2 Simulação

Posteriormente, foram inseridos no arquivo os dados de clima (Brasília Seca). Então foi realizada uma simulação com duração de 24h, com início no dia 08/09/2008 (data correspondente aos dados climáticos utilizados), às 6:00 h, para cada vegetação e para uma situação controle, sem vegetação aplicada às fachadas. Foram utilizados dados dos horários 9 h, 12 h, 15 h, 18 h e 21 h.

3.5.3 Saída de Dados

Foram marcados como “Dados de Saída” os seguintes parâmetros:

- *Pot_Temperature*
- *Relative_Humidit*

Os mapas de resultado das simulações com os dados requeridos foram gerados com o software LEONARDO 3.75. Para determinar o dado

obtido em cada simulação, foi utilizado, para cada um dos parâmetros, o valor do meio da fachada. Cada fachada possui 3 metros de comprimento, por 3 de altura. O programa divide a área de estudo em quadrados, que possuem 1 metro de lado, sendo assim, existem 3 quadrados junto à fachada, e, neles, os valores simulados são menos impactados por outras condições climáticas locais, que não tem origem no uso das paredes verdes. Dessa forma, para obter o valor com menor interferência possível, foi adotado o quadrado central da fachada como referência para a obtenção dos dados. Sendo assim, com o auxílio do programa LEONARDO 3.75, foram lidos os valores do quadrado localizado no meio de cada fachada, para estabelecer os resultados em relação à temperatura e umidade relativa do ar.

4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos pelas simulações realizadas por meio do programa ENVI-Met. Simulações realizadas com edificações sem vegetação constituirão a situação controle do estudo, a qual servirá de parâmetro para realizar comparações entre as edificações compostas de cada uma das espécies do estudo. As avaliações térmicas de cada espécie também serão comparadas entre si, para se determinar qual possuiu o melhor desempenho.

Serão apresentados os valores obtidos para a temperatura do ar e para a umidade relativa do ar, em cinco horários distintos do dia, às 9h, 12h, 15h, 18h e 21h. A variação diária desses parâmetros será apresentada em forma de gráficos e os valores absolutos em tabelas. Os valores obtidos pela situação controle também servirão para determinar quais os horários e fachadas são mais desconfortáveis termicamente e, portanto, necessitariam de maior intervenção com o uso das paredes verdes.

Todos os resultados comparativos irão se basear na variação em relação a uma média, para tornar os dados mais perceptíveis, a qual é definida como a média aritmética dos valores de temperatura obtidos em todas as fachadas em um determinado horário. Os valores obtidos por cada vegetação serão apresentados como variações, positivas ou

negativas, dessa média. Os valores absolutos obtidos por cada espécie, em cada horário e fachada, serão utilizados para a análise estatística

Os resultados serão apresentados em forma de valores, gráficos e tabelas, seguidos de comentários em forma de discussão para a melhor compreensão do cenário, da atuação do clima e da avaliação térmica obtida, bem como do desempenho térmico das espécies estudadas.

4.1 Análise da Temperatura do Ar e Umidade Relativa do Ar na Situação Controle nos Horários

Para a análise da variação de temperatura do ar da situação controle durante o período de estudo, utilizou-se uma média aritmética, a partir dos valores de temperatura obtidos em todas as fachadas da edificação sem paredes verdes, em um determinado horário. Assim, o valor correspondente ao horário 9h, representa ao valor obtido pela média entre as temperaturas das fachadas norte, sul, leste e oeste naquele horário. Dessa forma, é possível compreender a temperatura do ar próxima à edificação de uma forma global.

O gráfico , na página seguinte, demonstra a variação de temperatura durante os horários de estudo, de 9h a 21h, para a situação controle. O gráfico foi gerado a partir dos valores de temperatura obtidos em cada fachada em determinado horário. Para se obter o valor correspondente, por exemplo, ao horário 9h, foi calculada uma média simples, com os valores de temperatura de todas as fachadas naquele horário. O horário 9h apresentou a menor temperatura (24,59° C), seguido do horário 21h (26,42° C) e do 15h, o qual apresentou a maior

temperatura (33,70 °C).

A umidade relativa também foi analisada por meio da média simples entre os valores obtidos em cada fachada. O gráfico 2 demonstra a variação da umidade relativa do ar que ocorreu entre os horários na situação controle. A tabela 14 aponta todos os valores de temperatura obtidos em cada fachada e em cada horário, bem como a média calculada para cada horário. O horário 15h apresentou a menor umidade relativa do ar (62,93%), seguido do horário 21h (65,84%) e 9h (65,88%). O horário 12h apresentou o maior valor (67,96%).

A partir dos valores apresentados nas tabelas e das leituras de variação de temperatura obtidas pelos gráficos, é possível verificar que os horários 12h, 15h, e 18h, apresentam as maiores temperaturas. O horário 15h, embora tenha atingido uma das maiores temperaturas, foi o que apresentou a menor taxa de umidade relativa do ar. No entanto, os horários 9h e 21h, apesar de terem exibido menores temperaturas do ar, também corresponderam a baixos valores de umidade relativa do ar.

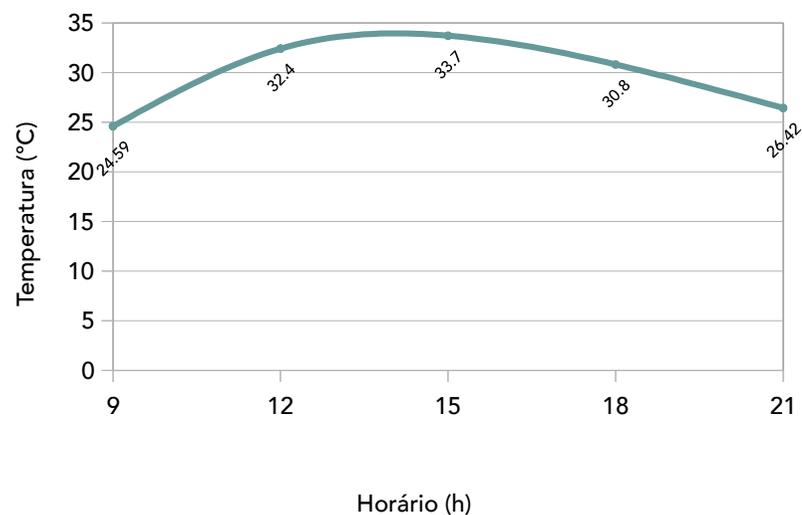


Gráfico 1– Média do Comportamento Diário da Temperatura do Ar em °C

Tabela 14 – Valores Absolutos por Horário e Fachada e Média do Horário para a Temperatura do Ar em °C

Fachada	Horário (h)				
	9	12	15	18	21
norte	24.3	32.51	34.01	30.82	26.39
sul	24.07	32.23	33.29	30.43	25.96
leste	24.43	32.71	33.73	30.86	26.47
oeste	25.54	32.16	33.77	31,1	26.86
	Média (°C)				
	24.59	32.40	33.7	30.80	26.42

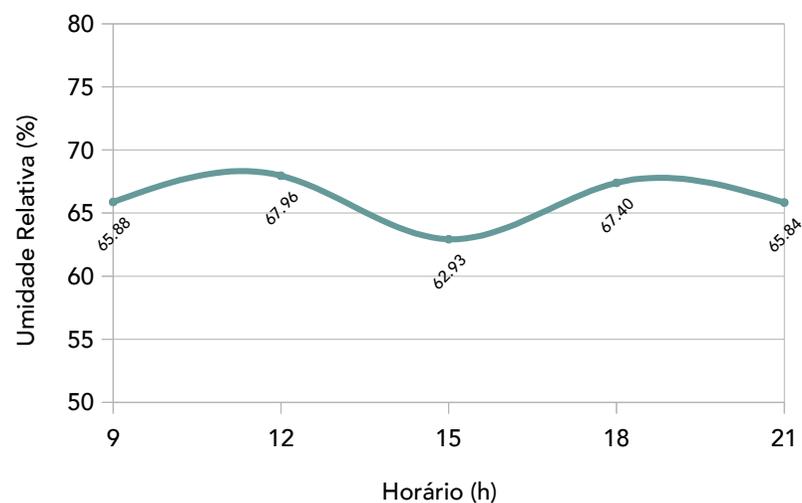


Gráfico 2– Média do Comportamento Diário da Umidade Relativa do Ar em %

Tabela 15 – Valores Absolutos por Horário e Fachada e Média do Horário para a Umidade Relativa do Ar em %

Fachada	Horário(h)				
	9	12	15	18	21
norte	66,34	68,27	62,8	66,84	65,72
sul	69,33	70,28	65,65	70,33	68,86
leste	66,4	69,11	63,14	67,27	65,92
oeste	61,45	64,19	60,13	65,16	62,85
	Média (%)				
	65,88	67,96	62,93	67,4	65,84

4.2 Análise da Temperatura do Ar e Umidade Relativa do Ar na Situação Controle nas Fachadas

Para avaliar a temperatura e umidade relativa do ar de uma fachada, utilizou-se a diferença desta em relação à média das temperaturas obtidas por todas as fachadas naquele horário. O objetivo da análise é avaliar a temperatura de uma determinada orientação. Para que se realize uma comparação, é necessário haver um parâmetro, que, nesse caso, é estabelecido pela temperatura global da edificação e determinado pela análise da temperatura de cada uma das fachadas: norte, sul, leste e oeste. A temperatura de cada uma compõe uma média simples: todas as temperaturas são somadas e divididas por quatro. Dessa forma, se obtém o valor global de temperatura da edificação, que é o resultado da média simples entre todas as fachadas.

As comparações ocorrem então, ao se confrontar a temperatura absoluta de cada fachada com a temperatura global, obtida pela média das temperaturas. Dessa forma, pode-se dizer que uma fachada oeste em situação de pôr do sol, por exemplo, irá receber grande quantidade de radiação solar, diferentemente das demais fachadas, irão apresentar uma temperatura maior do que a temperatura global, podendo-se

afirmar, portanto, que, naquela situação (poente), a fachada oeste apresentou a maior temperatura e, portanto, deverá receber maior atenção em relação ao desempenho térmico de seus materiais de construção e revestimento.

O mesmo procedimento será feito para análise da taxa de umidade relativa do ar. As diferenças de temperatura serão apresentadas em °C, e a umidade do ar, em pp (pontos percentuais).

O gráfico 3 demonstra a diferença de temperatura do ar entre as fachadas norte, sul, leste e oeste da situação controle, em relação à média simples das temperaturas obtidas no horário 9h.

Observa-se que a fachada sul, no horário 9h, apresenta a menor temperatura, com 27.07 °C, o que significa 0,52 °C abaixo da média do horário. Já a fachada Oeste apresentou a maior diferença positiva, com quase 1 °C acima da média do horário. As fachadas norte e leste também apresentaram diferenças negativas em relação à média do horário, em valores que são intermediários entre a maior diferença negativa e a maior diferença positiva.

A diferença entre cada fachada e a média simples da situação controle para a umidade relativa do ar é demonstrada no gráfico 4. A fachada sul apresentou uma umidade relativa do ar de 69,33%, um valor de 3.45 pp a mais do que a média.

Dessa forma, a fachada sul apresentou temperatura do ar mais amena e a maior umidade relativa do ar, ao passo que a fachada oeste apresentou a situação mais desconfortável, com temperatura de 25.54 °C, uma adição de 0.95 °C em relação à média, e 66.34% de umidade relativa do ar, 4.43 pp abaixo da média do horário.

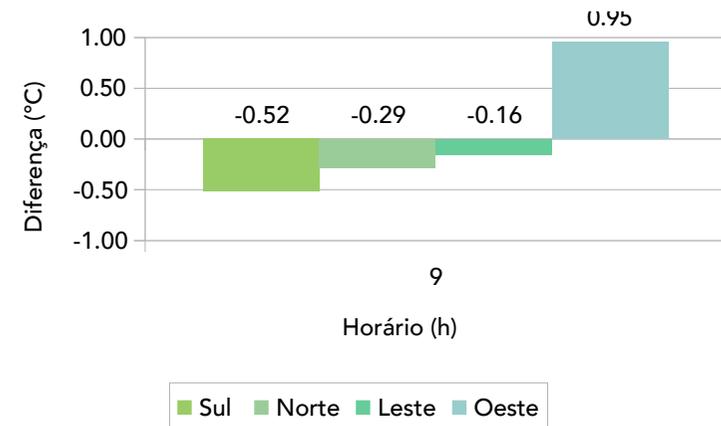


Gráfico 3– Variação da Temperatura do Ar em cada Fachada em Relação a Média do Horário 9h

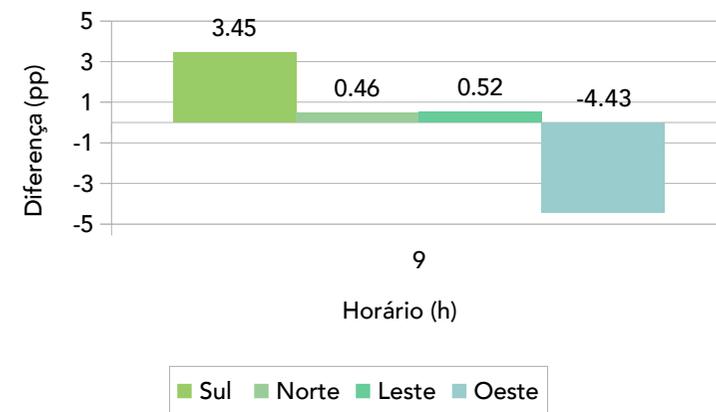


Gráfico 4– Variação da Umidade Relativa do Ar em cada Fachada em Relação a Média do Horário 9h

O gráfico 5 demonstra a diferença de temperatura do ar entre as fachadas norte, sul, leste e oeste da situação controle, em relação à média simples das temperaturas obtidas no horário 12h.

A fachada oeste obteve a maior diferença negativa, com menos 0.24 °C em relação à média do horário, seguida pela fachada sul, com um valor negativo de 0.17 °C. Já as fachadas norte e leste apresentaram valores de temperatura do ar acima da média do horário, com quase 0.5 °C a mais na fachada leste.

A diferença entre cada fachada e a média simples da situação controle para a umidade relativa do ar é demonstrada no gráfico 6. A fachada sul apresentou a maior diferença positiva em relação à média do horário, com 2.32 pp a mais. Já a fachada oeste obteve a maior diferença negativa, com -3.77 pp em relação à média do horário. Já as fachadas norte e leste obtiveram valores intermediários e positivos.

No horário 12h, a fachada oeste apresentou a maior diferença negativa em relação à temperatura do ar, porém, também apresentou a maior diferença negativa em relação à umidade relativa do ar. A fachada leste apresentou a maior diferença positiva entre a temperatura do ar e a fachada sul, as maiores diferenças positivas de umidade relativa do ar.

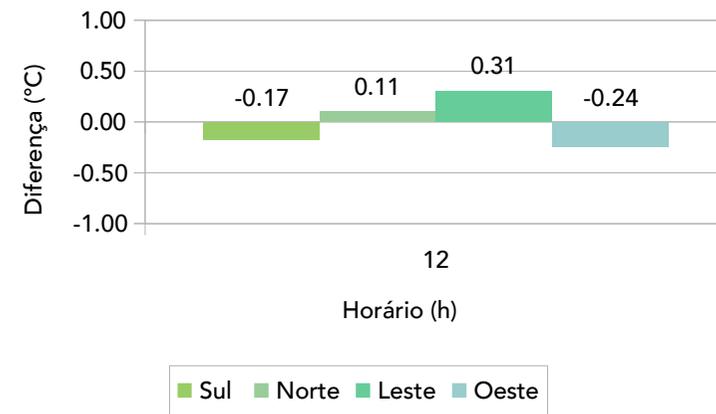


Gráfico 5– Variação da Temperatura do Ar em cada Fachada em Relação a Média do Horário 12h

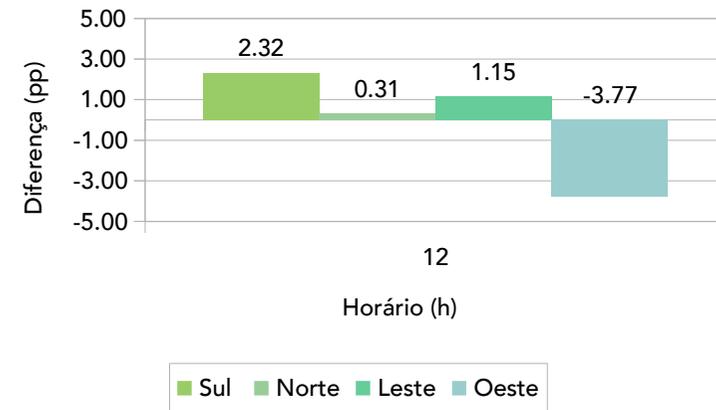


Gráfico 6– Variação da Umidade Relativa do Ar em cada Fachada em Relação à Média do Horário 12h

O gráfico 7 apresenta as diferenças de temperatura do ar para cada fachada em relação à média do horário 15h.

A fachada sul obteve a menor diferença negativa, o que significa uma temperatura 0.50 °C abaixo da média do horário. A fachada Norte obteve a maior diferença positiva, com uma diferença de 0.31 °C. Já as fachadas leste e oeste também obtiveram diferenças positivas, porém, ainda muito próximas à média do horário.

O gráfico 8 aponta os valores de umidade relativa do ar de cada fachada em relação à média do horário 15h. A fachada sul apresentou um acréscimo de quase 3 pp em relação à média do horário, enquanto a fachada oeste obteve o menor valor, com uma diferença negativa de 2.80 pp. As fachadas norte e leste obtiveram valores intermediários, sem grande destaque.

Dessa forma, a fachada sul apresentou as melhores diferenças em relação à umidade relativa do ar, com a maior diferença positiva, e à temperatura do ar, com a maior diferença negativa. A fachada norte apresentou a maior diferença positiva de temperatura do ar, e a fachada oeste, a maior diferença negativa de umidade relativa do ar.

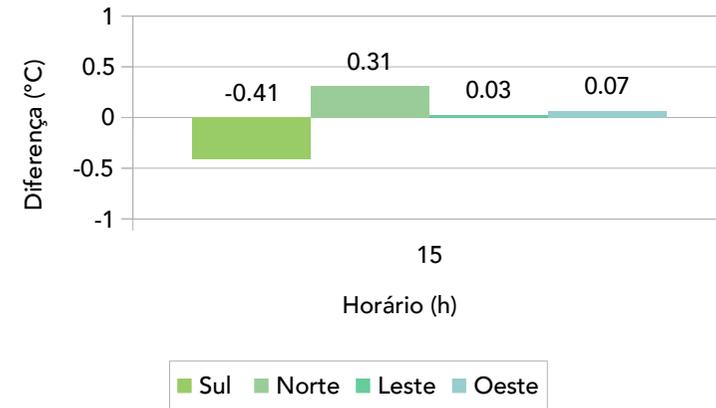


Gráfico 7– Variação da Temperatura do Ar em cada Fachada em Relação à Média do Horário 15h

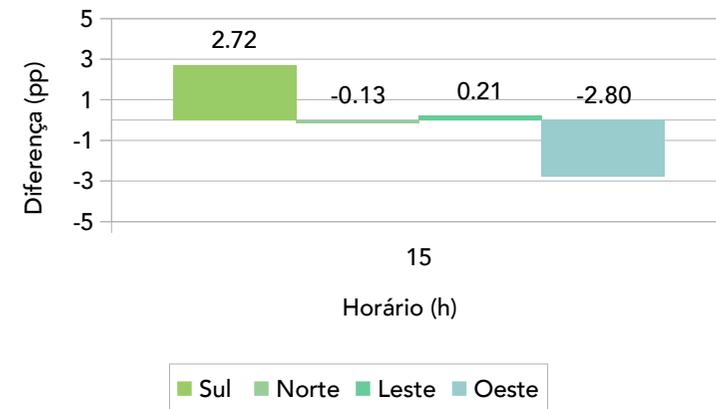


Gráfico 8– Variação da Umidade Relativa do Ar em cada Fachada em Relação à Média do Horário 15h

O gráfico 9 apresenta os valores de diferença de temperatura do ar em relação à média do horário, para o horário 18h.

A fachada oeste apresentou a maior diferença positiva, com um acréscimo de 0.30 °C. Já a fachada sul apresentou a menor temperatura, com uma diferença negativa de 0.37 °C. As fachadas norte e leste apresentaram valores intermediários, porém positivos, mas sem destaque.

O gráfico 10 demonstra as diferenças de valores de umidade relativa do ar em relação à média do horário em cada fachada para o horário 18h.

A fachada sul obteve um valor de 2.93 pp acima da média do horário, enquanto a fachada oeste apresentou a maior diferença negativa, com -2.24 pp. As fachadas norte e leste apresentaram valores intermediários, novamente sem destaque.

É possível verificar que a fachada sul apresentou os valores mais favoráveis em relação a temperatura e umidade do ar. Em contraposição, a fachada oeste apresentou a maior diferença positiva para a temperatura do ar e a maior diferença negativa para a umidade relativa do ar.

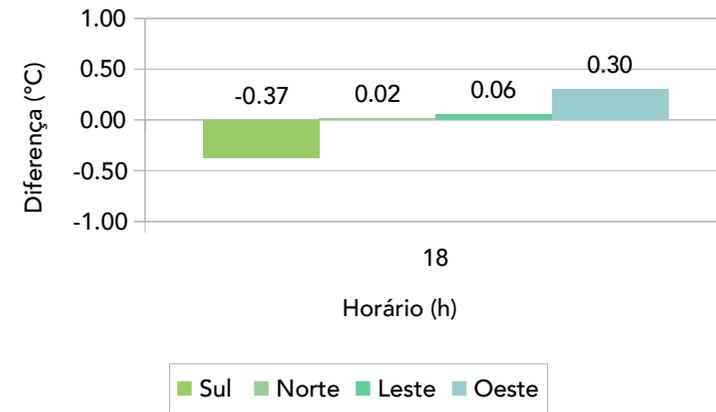


Gráfico 9– Variação da Temperatura do Ar em cada Fachada em Relação à Média do Horário 18h

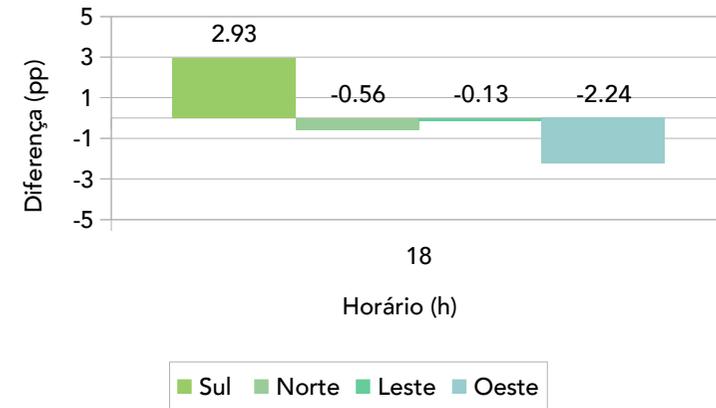


Gráfico 10– Variação da Umidade Relativa do Ar em cada Fachada em Relação à Média do Horário 18h

O gráfico 11 aponta as diferenças na temperatura do ar em cada fachada em relação à média do horário 21h.

A fachada sul apresentou a maior diferença negativa, com quase 0.50 °C. Já a fachada oeste obteve a maior diferença positiva, com um acréscimo de 0.44 °C. As fachadas norte e leste apresentaram valores intermediários sem destaques.

O gráfico 12 demonstra quais foram as diferenças de umidade relativa do ar em cada fachada em relação à média do horário 21h. A fachada sul apresentou a maior diferença positiva, com um acréscimo de 3.02 pp, quase o mesmo número, porém negativo, que foi obtido pela fachada oeste, a maior diferença negativa do horário.

A fachada sul novamente apresentou os resultados mais favoráveis para a temperatura e umidade relativa do ar. A fachada oeste, também novamente, apresentou os valores mais desfavoráveis tanto para a temperatura como para a umidade relativa do ar.

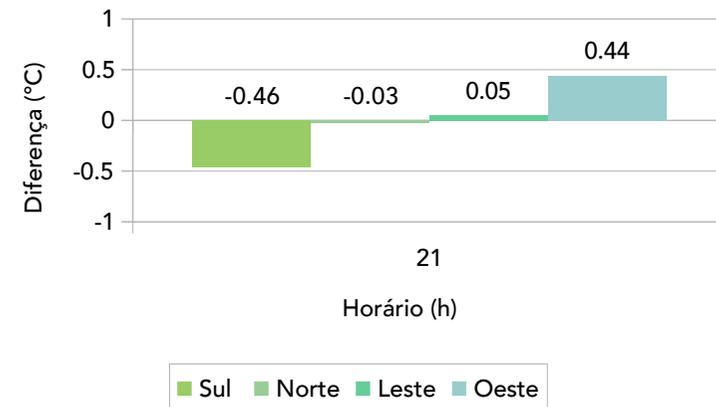


Gráfico 11– Variação da Temperatura do Ar em cada Fachada em Relação à Média do Horário 21h

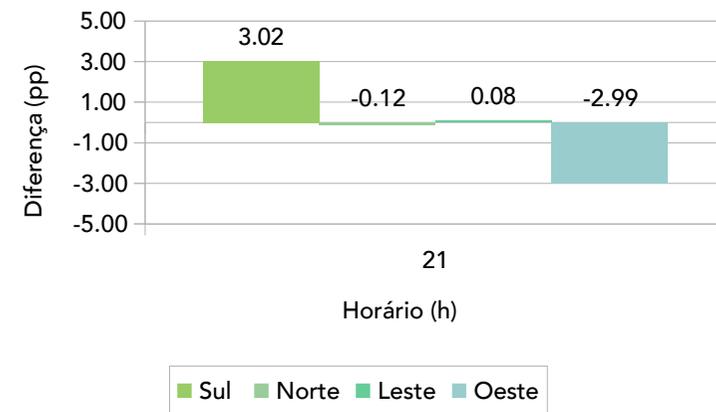


Gráfico 12– Variação da Umidade Relativa do Ar em cada Fachada em Relação à Média do Horário 21h

Através da análise dos valores de temperatura e umidade relativa do ar de cada fachada e sua comparação com a média referente a cada horário é possível descrever um ciclo diário de comportamento térmico da edificação da situação controle e destacar fachadas e horários que apresentam condições térmicas e de umidade que se aproximam de uma zona de conforto ou que se afastam dela.

Em relação à temperatura do ar, observou-se que a fachada oeste constantemente irá apresentar as maiores temperaturas e os maiores desvios positivos em relação à média dos horários. No horário 9h, a temperatura é a mais elevada, por ter sido a que recebeu os últimos raios de sol do dia anterior e que, no último horário do dia, recebeu a maior carga térmica entre as fachadas. Isso fica evidente ao se analisar o horário 18h, próximo ao por do sol, em que a fachada oeste possuiu a maior temperatura e a maior diferença positiva em relação a média, bem como no horário 21h. Assim, a fachada acumula energia térmica no final do dia e a dissipa durante a noite, sendo que pela manhã, essa energia ainda esta presente e é maior em comparação às outras fachadas que receberam radiação solar em horários mais cedo. Já a fachada sul é a que apresenta as menores temperaturas durante o dia e, em quase todos os horários, é a que possuiu a maior diferença negativa em relação à média

do horário, devido ao fato de não haver incidência direta de radiação solar no lado sul, diferentemente das outras fachadas. Entre a maior diferença positiva da fachada oeste no horário 9h e 18h em diante, as fachadas leste e norte se revezam em relação aos valores de temperatura acima das médias dos horários. Isso ocorre pelo movimento natural do sol, que, ao nascer no lado leste, atinge essa fachada com radiação solar, causando aquecimento, o que fica evidente no horário 12h, quando a fachada leste já recebeu energia térmica suficiente para apresentar a maior temperatura do horário. Após esse horário, o sol assume uma posição mais elevada, incidindo mais sobre a fachada norte, que apresenta a maior temperatura do horário 15h e, também, a maior temperatura do dia e a menor umidade relativa do dia.

De acordo com a tabela 16, é possível observar com clareza que, em relação à umidade relativa do ar, a fachada sul sempre apresenta as maiores diferenças positivas em relação às médias dos horários, ao contrário da fachada oeste, que apresenta os menores valores em relação à médias dos horários. Ocorre que a incidência solar e as temperaturas mais elevadas estão diretamente relacionadas às baixas taxas de umidade relativa do ar, por fornecerem energia térmica para a evaporação da água. As fachadas norte e leste se comportam da mesma forma que a

observada na análise de temperatura do ar e apresentam valores medianos nos horários 12h e 15h, porém, são justamente esses horários que apresentam as maiores taxas de umidade relativa do ar do dia.

Tabela 16– Maiores e Menores Valores Obtidos para Temperatura e Umidade Relativa do Ar

Horário (h)	Δt (° C)				ΔUR (pp)			
	Valor		Fachada		Valor		Fachada	
	> 0	< 0			> 0	< 0		
9	0.95	-0.52	Oeste	Sul	3.45	-4.43	Sul	Oeste
12	0.31	-0.24	Leste	Oeste	2.32	-3.77	Sul	Oeste
15	0.31	-0.41	Norte	Sul	2.72	-2.80	Sul	Oeste
18	0.30	-0.37	Oeste	Sul	2.93	-2.24	Sul	Oeste
21	0.44	-0.46	Oeste	Sul	3.02	-2.99	Sul	Oeste

Portanto, a fachada oeste, por apresentar os maiores desvios positivos em relação às médias dos horários de temperatura do ar e os maiores desvios negativos em relação à umidade relativa do ar, deve ter prioridade no uso de dispositivos como as paredes verdes. O horário 15h, por apresentar as maiores temperaturas do dia e a menor umidade

relativa do ar do dia, também merece destaque.

4.3 Análise Comparativa do Desempenho Térmico de AP, BA e CE em Paredes Verdes.

Nesta seção, foram comparados os desempenhos térmicos de cada parede verde, com cada uma das espécies estudadas. As comparações foram feitas em todas as fachadas, nos horários de estudo. Por exemplo, no horário 9h, foram comparados os efeitos do uso de cada uma das espécies como parede verde, de forma independente, nas fachadas norte, sul, leste e oeste. Os resultados estão expressos em °C para a temperatura do ar, e em pp (pontos percentuais), para a umidade relativa do ar. Os valores obtidos pelas médias de temperatura do ar e umidade relativa do ar, apresentadas nas tabelas 14 e 15, correspondentes à situação controle, foram comparadas com os valores absolutos de cada espécie, apresentados na tabela 17 . A comparação destes dois valores, valor absoluto de cada espécie e valor das médias dos horários, serão apresentadas nos gráficos de 13 a 22, em forma de variação numérica, positiva ou negativa.

Tabela 17 – Valores Absolutos de Temperatura do Ar e Umidade Relativa do Ar

Fachada	Horário (h)																													
	9				12				15				18				21													
	Espécies						Espécies						Espécies						Espécies											
	AR		BA		CE		AR		BA		CE		AR		BA		CE		AR		BA		CE		AR		BA		CE	
	T	UR	T	UR	T	UR	T	UR	T	UR	T	UR	T	UR	T	UR	T	UR	T	UR	T	UR	T	UR	T	UR	T	UR	T	UR
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
Norte	24.3	67.06	24.3	66.55	24.3	66.36	32.13	69.41	32.84	68.72	32.49	68.32	33.53	64.24	33.77	63.52	33.97	62.88	30.68	67.61	30.76	67.61	30.81	68.87	26.25	66.53	26.34	66.02	26.38	65.74
Sul	24.07	70	24.08	69.45	24.07	69.32	32.11	71.25	32.18	70.6	32.22	70.31	33.13	66.58	33.21	66.02	33.27	62.88	30.42	70.82	30.39	70.82	30.43	70.31	25.84	69.72	25.92	69.16	25.95	68.88
Leste	24.43	67.82	24.47	67.1	24.43	66.51	32.48	69.35	32.62	69.09	32.7	69.09	33.58	63.88	33.65	63.45	33.71	63.17	30.75	68.47	30.8	68.47	30.84	67.33	26.27	67.18	26.37	66.5	26.45	65.99
Oeste	24.54	63.21	24.47	62.19	24.54	61.53	32.03	64.92	32.1	69.09	32.7	69.09	33.67	61.22	33.77	60.44	34.44	65.58	31.29	66.75	31.19	66.75	31.1	65.28	26.6	64.46	26.75	63.54	26.45	62.93

• Horário 9h

Conforme o gráfico 13, é possível perceber que no horário 9h, o uso da vegetação gerou impacto principalmente na fachada oeste, na qual a espécie BA promoveu uma queda de 1.07 °C, seguido de AP e CE com -1 °C. As diferenças de temperatura nas demais fachadas nesse horário não foram significativas, pois apresentaram no máximo um acréscimo de 0.04 °C. Em relação à umidade relativa do ar (gráfico 14), ao se compararem as 3 espécies, observou-se que AP obteve maiores diferenças positivas em relação à situação controle em todas as fachadas; na orientação oeste, a sua presença aumentou 1.76 pp a umidade relativa do ar, seguida por BA, com um aumento de 0.74pp e CE, com 0.08 pp.

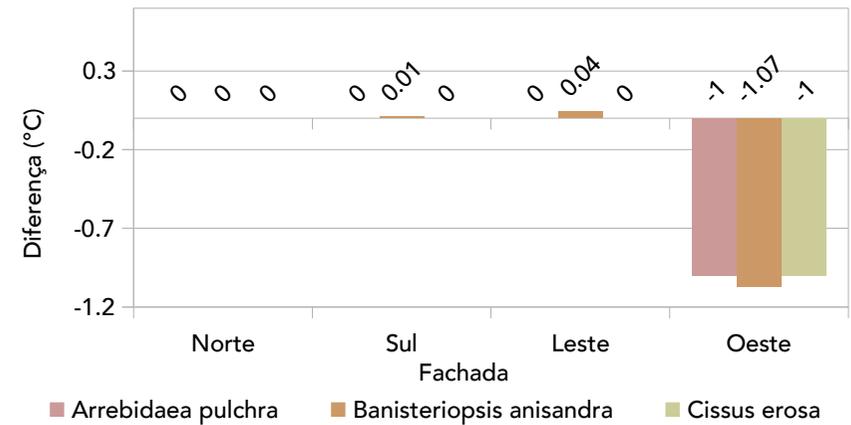


Gráfico 13– Diferença da Temperatura do Ar Obtida por cada Espécie às 9h em Relação à Média do Horário

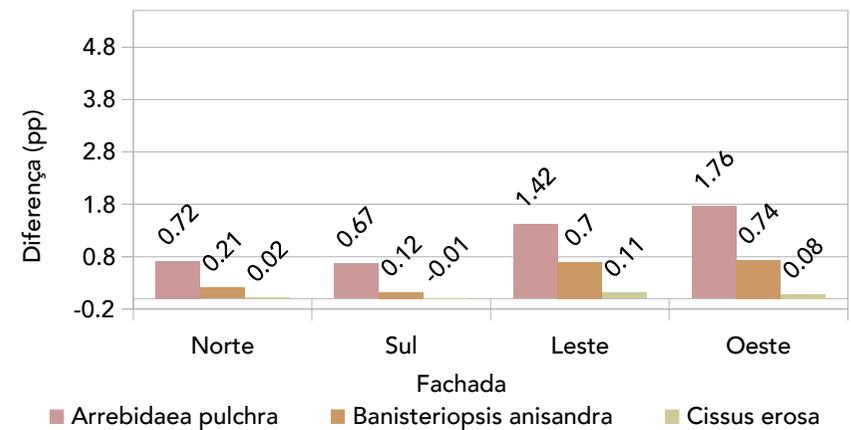


Gráfico 14– Diferença da Umidade Relativa do Ar Obtida por cada Espécie às 9h em Relação à Média do Horário

• Horário 12h

As diferenças de temperatura com o uso da vegetação foram negativas em todas as fachadas (gráfico 15). Os valores não foram muito distintos ao se comparar a mesma espécie nas diferentes fachadas, porém, observou-se que AP obteve maiores diferenças negativas, o que permitiu valores de temperatura do ar mais baixos, principalmente na fachada norte, com uma diferença negativa de 0.38 °C, e na fachada leste, em que a diferença negativa foi de 0.23 °C, em relação à situação controle. No que diz respeito à umidade relativa do ar, a AP também obteve melhor desempenho, com diferenças positivas maiores, também na fachada norte, com um acréscimo de 1.14 pp, seguido de BA e CE, conforme demonstrado no gráfico 16.

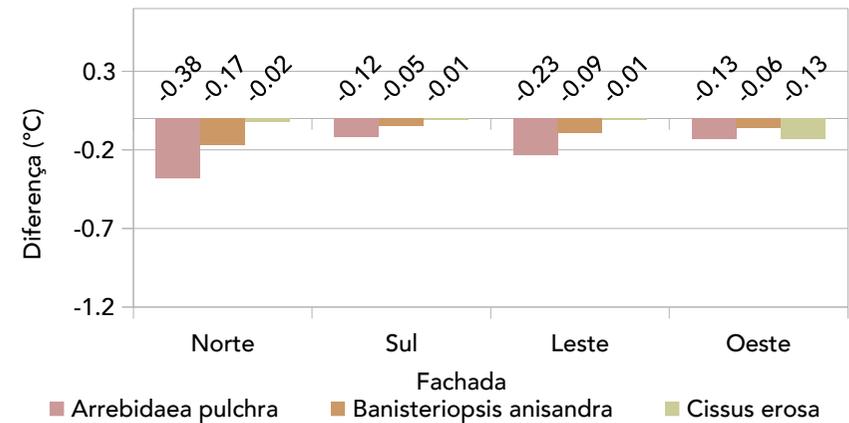


Gráfico 15– Diferença da Temperatura do Ar Obtida por cada Espécie às 12h em Relação à Média do Horário

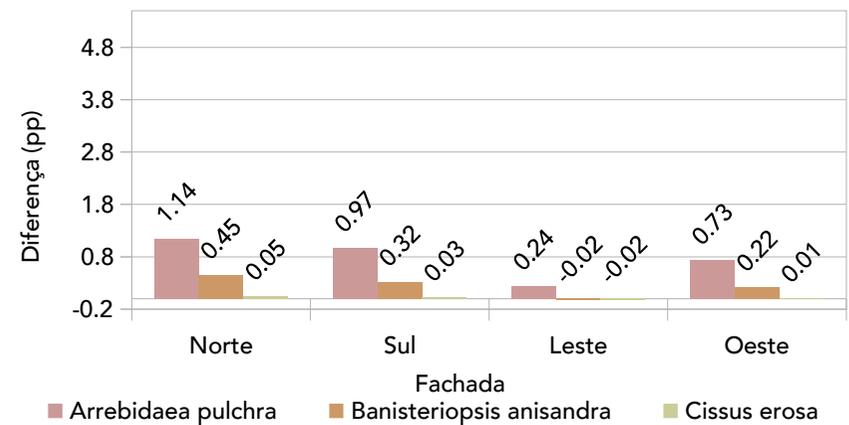


Gráfico 16– Diferença da Umidade Relativa do Ar Obtida por cada Espécie às 12h em Relação à Média do Horário

• Horário 15h

O horário 15h obteve resultados similares ao horário 12 em relação à fachada que obteve maiores diferenças quanto à situação controle, com destaque para a fachada norte (gráfico 17). A AP obteve uma diferença negativa de temperatura de 0.48 °C, seguida de BA, com -0.24 °C e CE, com -0.04 °C. A diferença apresentada por CE na fachada oeste, por estar fora da média dos outros resultados apresentados, foi considerada como um erro e, então, desconsiderada. Em relação à umidade relativa do ar (gráfico 18), a fachada norte também foi a mais beneficiada, visto que a AP proporcionou um aumento de 1.44 pp, seguida de BA, com 0.72 pp e CE, com 0.08 pp. Assim como em relação à temperatura do ar, a espécie CE apresentou um aumento fora dos padrões na fachada oeste e, então, foi desconsiderada.

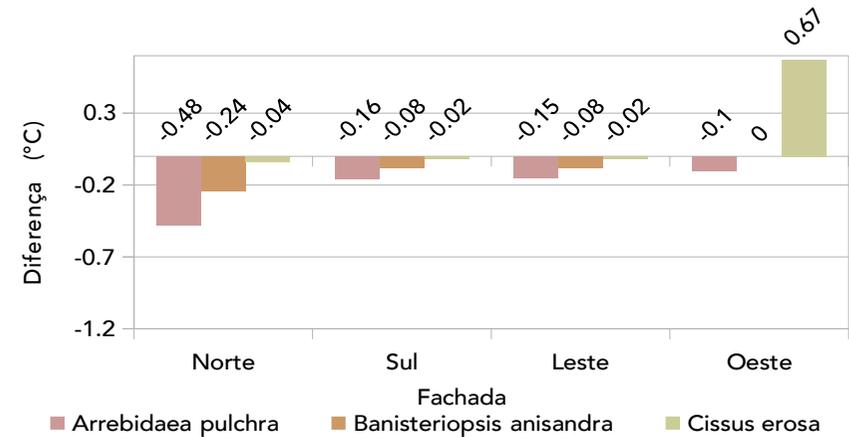


Gráfico 17– Diferença da Temperatura do Ar Obtida por cada Espécie às 15h em Relação à Média do Horário

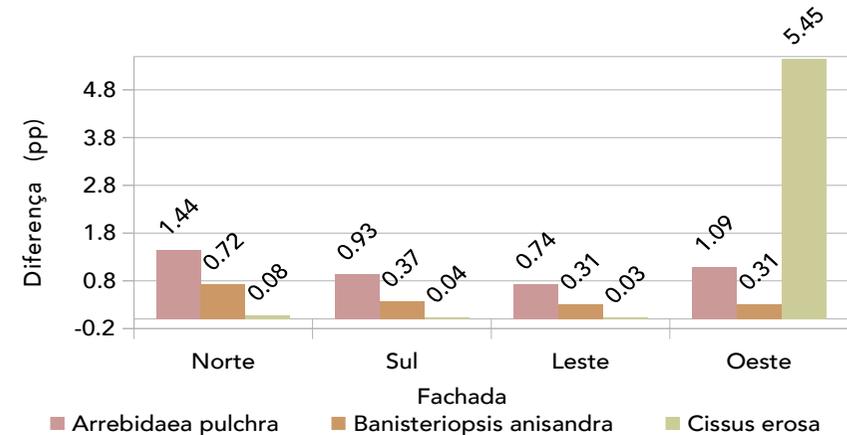


Gráfico 18– Diferença da Umidade Relativa do Ar Obtida por cada Espécie às 12h em Relação à Média do Horário

• Horário 18h

No horário 18h, observou-se o efeito da energia térmica proveniente do pôr do sol na fachada oeste (gráfico 19). Apesar do uso de vegetação, as temperaturas apresentadas nessa orientação, foram maiores do que as apresentadas na situação controle, como ocorreu com AP, que obteve um valor positivo de 0.19 °C. As demais orientações obtiveram resultados com diferenças negativas, principalmente na fachada leste, na qual o uso de BA obteve uma diferença negativa de 0.78 °C, seguido de AP e CE. Em relação à umidade relativa do ar, a fachada oeste também apresentou os maiores valores, em que o uso de AP e BA elevou a umidade em 1.59 pp (gráfico 20).

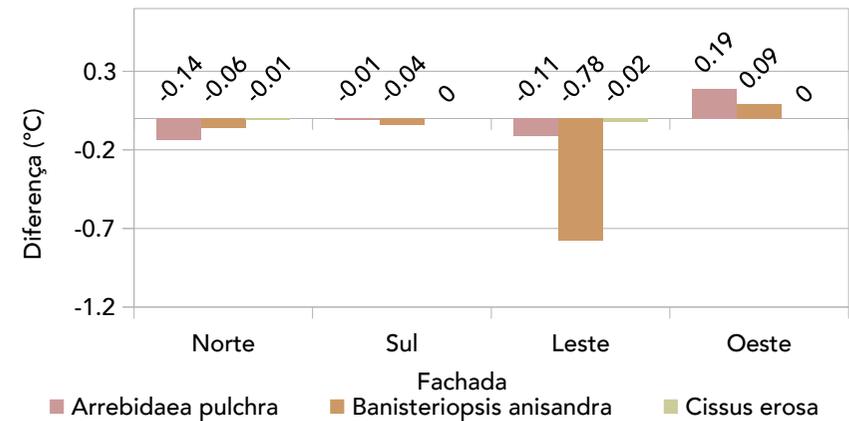


Gráfico 19– Diferença da Temperatura do Ar Obtida por cada Espécie às 18h em Relação à Média do Horário

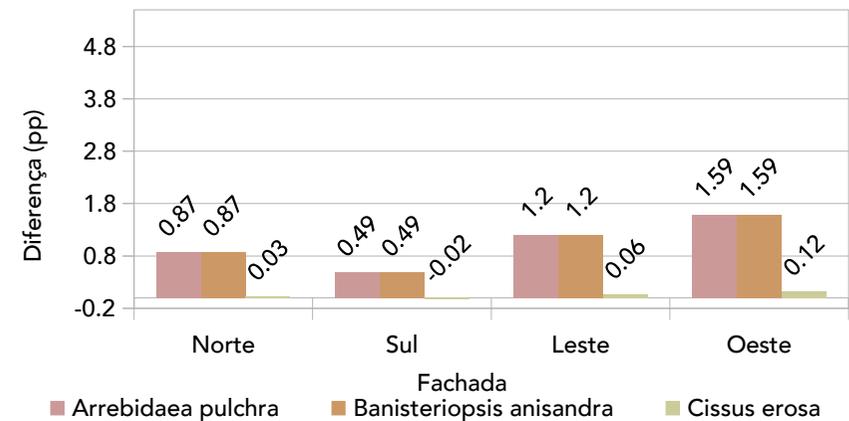


Gráfico 20– Diferença da Umidade Relativa do Ar Obtida por cada Espécie às 18h em Relação à Média do Horário

• Horário 21h

No horário 21h, as diferenças de temperatura do ar foram negativas, com valores, no geral, menores do que os nos demais horários (gráfico 21). A fachada oeste foi a que apresentou a maior diferença negativa, com o uso de AP. Em relação à umidade relativa do ar, as diferenças positivas também foram menores do que as nos demais horários, sendo que a fachada norte apresentou o maior ganho em umidade, com o uso de AP, que apresentou uma diferença positiva de 1.14 pp (gráfico 22).

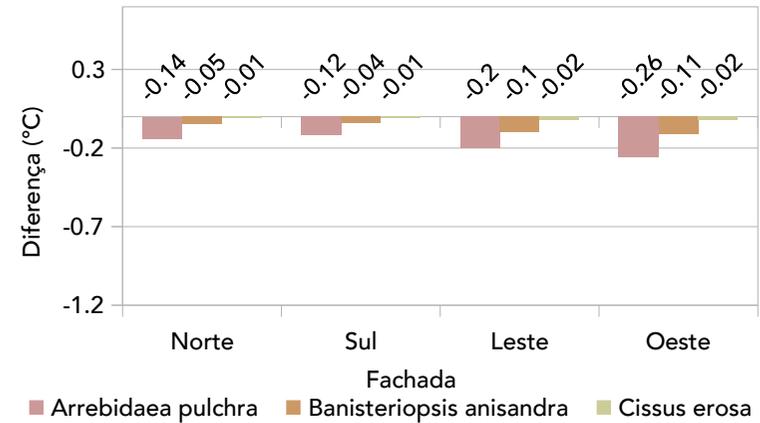


Gráfico 21– Diferença da Temperatura do Ar Obtida por cada Espécie às 21h em Relação à Média do Horário

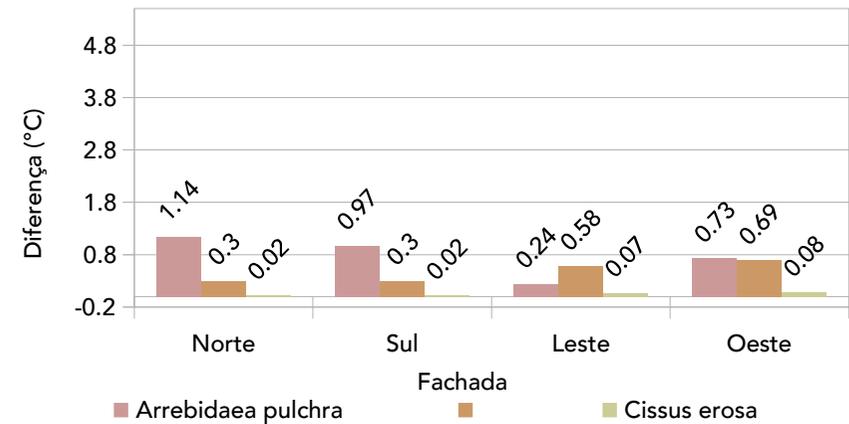


Gráfico 22– Diferença da Umidade Relativa do Ar Obtida por cada Espécie às 21h em Relação à Média do Horário

É notável que o uso de paredes verdes modificou os parâmetros climáticos em relação à situação controle. Apesar de os valores não serem elevados, há diferenças na temperatura do ar e na umidade relativa do ar quando há a presença da vegetação. É interessante frisar que as diferenças apontadas são causadas por vegetação aderida a uma fachada de 3 m de altura por 3 m de largura, ou seja 9 m², e que fachadas maiores poderiam trazer resultados com diferenças maiores.

No horário 9h, o uso da vegetação diminuiu a temperatura da fachada oeste na situação controle, o que fez com que ela deixasse de ser a com maiores temperaturas, para apresentar as menores temperaturas, bem como os maiores valores de umidade relativa do ar.

Os horários 12h e 15h apresentaram resultados semelhantes, com o sol a pino, as fachadas leste e norte, que eram as maiores temperaturas da situação controle, apresentaram as menores temperaturas, bem como os maiores ganhos de umidade relativa do ar.

No horário 18h, o uso de vegetação aumentou a temperatura da fachada oeste, que recebeu a radiação solar do pôr do sol. Algo ocorre possivelmente pelo efeito de isolamento térmico da parede verde. O ar aquecido entre as folhas da vegetação proporcionou um ganho térmico em relação à fachada da situação controle. A fachada oeste apresentou

um ganho de umidade relativa do ar maior do que o das outras orientações.

No horário 21h, a fachada oeste já apresentava as maiores diferenças negativas. Porém, os valores foram muito próximos aos das outras orientações. O ganho de umidade foi maior na fachada oeste e norte.

Em relação à avaliação térmica, percebe-se que houve diferenças entre o desempenho térmico das três espécies avaliadas, que estão apontadas na tabela 18, em que a espécie com melhor avaliação em cada parâmetro e horário foi anotada. Cada uma das espécies foi destacada nessa tabela, que demonstra os melhores valores. Assim, é possível verificar a frequência de melhor desempenho de cada uma.

Tabela 18 – Espécies com Melhor Desempenho nos Horários e Fachadas

Fachada	Dados	Horário				
		9	12	15	18	21
Norte	Δt (° C)	0	-0.38	-0.48	-0.14	-0.14
	Espécie	Todas	AP	AP	AP	AP
	ΔUR (pp)	0.72	1.14	1.44	0.87	1.14
Sul	Espécie	AP	AP	AP	AP e BA	AP
	Δt (° C)	0	-0.12	-0.16	-0.04	-0.12
	Espécie	AP e CE	AP	AP	BA	AP
Leste	ΔUR (pp)	0.67	0.97	0.93	0.49	0.97
	Espécie	AP	AP	AP	AP e BA	AP
	Δt (° C)	0	-0.23	-0.15	-0.78	-0.2
Oeste	Espécie	AP e CE	AP	AP	BA	AP
	ΔUR (pp)	1.42	0.24	0.74	1.2	0.58
	Espécie	AP	AP	AP	AP e BA	BA
Oeste	Δt (° C)	-1.07	-0.13	-0.1	0	-0.26
	Espécie	BA	AP e CE	AP	CE	AP
	ΔUR (pp)	1.76	0.73	5.45	1.59	0.73
Oeste	Espécie	AP	AP	CE	AP e BA	AP

Apesar da predominância de *Arrebidaea pulchra* na tabela 17, o que leva a acreditar que esta espécie possui o melhor desempenho térmico entre as três, é necessário realizar uma análise estatística afim de confirmar ou rejeitar esta suposição, e verificar a relação entre as características morfofisiológicas das espécies e a influência climática apresentada.

4.4 Análise Estatística

A análise estatística, que consistiu no uso da Análise de Componentes Principais (ACP), utilizou como dados de entrada, os valores absolutos de temperatura do ar e umidade relativa do ar de cada espécie, obtidos pela simulação e apresentados na tabela x, além de valores de parâmetros obtidos para alimentar o banco de dados de vegetação do ENVI-Met, sendo eles: rs_{min} (mínima resistência estomatal), LAD (densidade de área foliar) e a_f (albedo de onda curta). Esses parâmetros foram escolhidos pois possuem valores distintos para cada uma das espécies, e que portanto, estabelece diferenciação numérica. Os valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar não apresentaram distribuição normal e foram normalizados com o emprego da equação 7. Em seguida, como haviam unidade diferentes a serem

comparadas, os valores obtidos pela equação 1 foram padronizados através da equação 8.

$$Y_i' = \log_{10}(Y_i + 1) \quad (7)$$

Em que:

Y_i' = variável normalizada

$$Z_i = \frac{(Y_i' - Y_{ii})}{s_{y'}} \quad (8)$$

Em que:

Z_i = variável padronizada

Y_i' = variável normalizada

Y_{ii} = média da variável normalizada

$s_{y'}$ = desvio padrão da média da variável normalizada

4.4.1 Diferenciação das Espécies de Acordo com características Morfofisiológicas

De acordo com os valores dos parâmetros fornecidos (r_{s_min} , LAD e a_f), a ACP mostrou que *Arrebidaea pulchra* se diferencia significativamente das outras espécies, (*Banisteriopsis anisandra* e *Cissus erosa*) que são semelhantes morfofisiologicamente, conforme demonstra o gráfico 23.

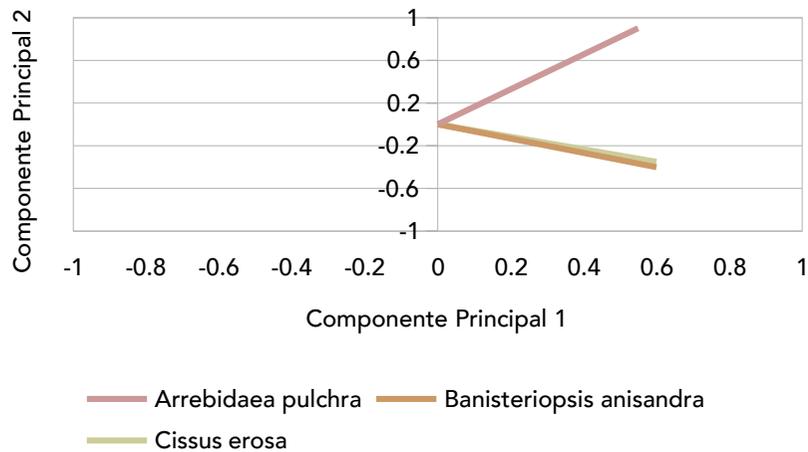


Gráfico 23 – ACP de Semelhança Morfofisiológica

4.4.2 Parâmetros Morfofisiológicos e sua Influência Climática

Ao analisar os dados obtidos pela simulação, observa-se que o horário 15h, na fachada norte, apresentou o maior valor para temperatura do ar e o menor para umidade relativa do ar. Nesse tópico, a análise estatística buscou compreender a relação causal entre as características morfofisiológicas das espécies e os valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar obtidos no horário 15h da fachada norte. A relação das características morfofisiológicas com as condições climáticas, foi verificada através de regressão linear, que apresentou resultado significativo para o LAD, o qual influencia os valores de temperatura de ar e umidade relativa do ar. A regressão mostrou que o LAD é inversamente proporcional aos valores modelados de temperatura do ar e diretamente proporcional aos valores modelados de umidade relativa do ar, de acordo com os gráficos 24 e 25. Demais parâmetros analisados não apresentaram relações significativas com a temperatura do ar e umidade relativa do ar.

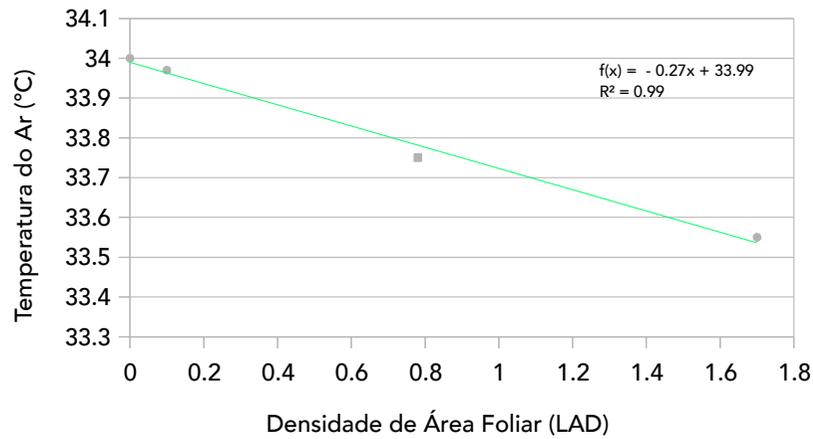


Gráfico 24 – Regressão Linear entre Temperatura do Ar e LAD

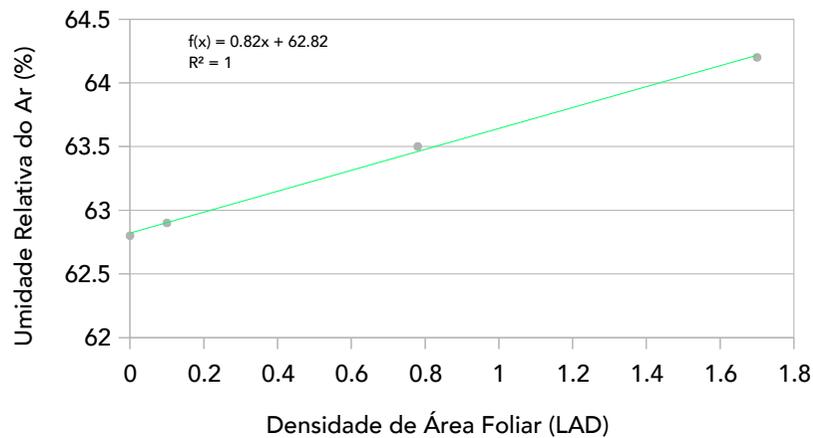
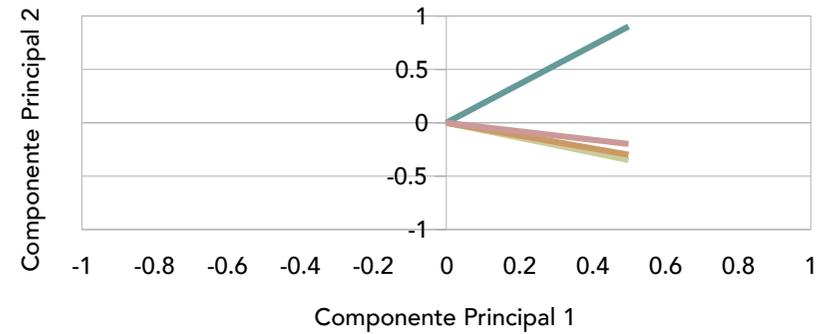


Gráfico 25 – Regressão Linear entre Umidade Relativa do Ar e LAD

Porém, ao analisar a influência de cada uma das espécies na temperatura do ar, observou-se que as três possuem impacto semelhante, mas distinto da situação controle, como indica o gráfico 26.



- Arrebidaea pulchra
- Banisteriopsis anisandra
- Cissus erosa
- Controle

Gráfico 26 – ACP de Influência na Temperatura do Ar

Em relação a umidade relativa do ar, ocorre a mesma distinção das três espécies em relação à situação controle, porém, *Arrebidaea pulchra* se destaca em relação a *Banisteriopsis anisandra* e *Cissus erosa*, como aponta o gráfico 27.

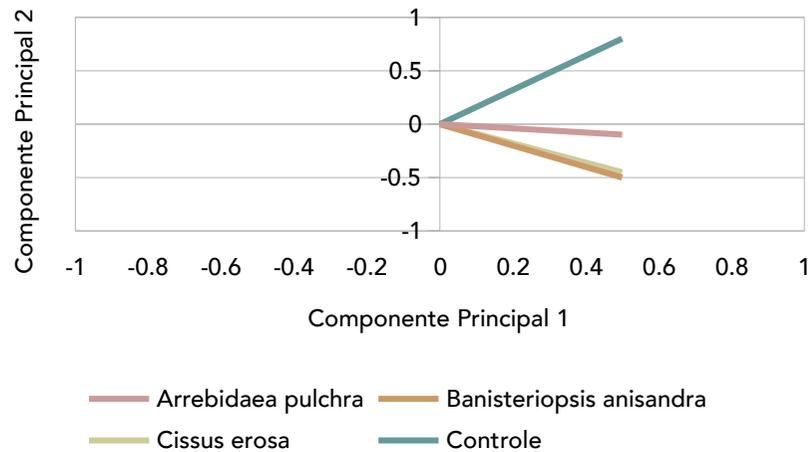


Gráfico 27 – ACP de Influência na Umidade Relativa do Ar

De acordo com a tabela 18, AP obteve as maiores amenizações de temperatura do ar, bem como os maiores acréscimos de umidade. BA também obteve resultados relevantes em relação à temperatura do ar, mas não tão bons quanto AP na modificação da umidade relativa do ar. Já CE obteve os resultados que menos se distanciaram da situação controle, porém, com ganhos discretos. Ao complementar os dados da tabela 18 com a análise estatística de ACP, é possível verificar que AP se distingue das demais espécies, porém, esta distinção morfofisiológica, influencia de forma distinta, apenas a umidade relativa do ar, sendo que

as três afetam a temperatura do ar de forma semelhante. O LAD demonstrou ser o parâmetro de maior significância para alterar as condições climáticas de uma parede controle.

Após verificar o desempenho de cada espécie através da simulação térmica e de analisar os dados obtidos através da análise estatística, já é possível traçar algumas conclusões em relação ao benefício de cada espécie. Porém, ainda não se sabe se elas possuem taxas de germinação e crescimento adequadas para o uso em paredes verdes. Uma vegetação com baixa taxa de germinação torna-se difícil de ser obtida em uma situação de viveiro, enquanto que uma taxa de crescimento que indique que tal espécie levaria 3 anos para cobrir uma parede de pé direito convencional não é desejável. Dessa forma, é necessário analisar a viabilidade das sementes e a taxa de germinação das espécies estudadas, bem como sua taxa de crescimento.

4.5 Germinação e Crescimento

As taxas de germinação e crescimento variam em relação ao cenário relacionado com o desempenho térmico. Todas as espécies tiveram suas sementes coletadas e levadas a uma câmara de germinação para análise da taxa de germinação. As espécies *Cissus erosa* e *Banisteriopsis anisandra* apresentaram resultados favoráveis, que demonstram a possibilidade de seu cultivo. Já a AP apresentou a ocorrência de fungos nas primeiras tentativas de germinação. Posteriormente, foi realizado um protocolo de higienização das sementes, com uma solução de hipoclorito a 5%, por três minutos, e, posteriormente, água destilada para finalizar a limpeza, durante uma semana. Porém, a ocorrência de fungos se manteve, o que comprometeu todas as sementes disponíveis para o ensaio. A tabela 19 demonstra a taxa de germinação de cada espécie.

Tabela 19– Taxa de Germinação (%) das Espécies Avaliadas

	Espécie		
	Arrebidaea pulchra	Banisteriopsis anisandra	Cissus erosa
Taxa de Germinação (%)	0	60	80

As sementes que foram germinadas e cresceram até o estágio de muda foram plantadas em vasos plásticos e permaneceram no mesmo ambiente, a fim de se verificar a taxa de crescimento. A tabela 20 demonstra as taxas obtidas para as espécies *Arrebidaea pulchra* e *Banisteriopsis anisandra*.

Tabela 20– Taxa de Crescimento (mm/mês) das Espécies Avaliadas

	Espécie	
	Banisteriopsis anisandra	Cissus erosa
Taxa de Crescimento (mm/mês)	50	250

Verifica-se que CE tem a maior taxa de crescimento, que supera a de BA em mais de cinco vezes. Isso permite que uma parede de três metros de altura seja revestida em aproximadamente dez meses.

Após estarem em um estágio de crescimento mais avançado, alguns indivíduos de BA (figura 33) e CE (figura 34) foram plantadas, respectivamente, em suportes metálicos, e de madeira, próximos a uma parede, de orientação nordeste, na cidade de Pirenópolis – Go, onde foi possível observar de que forma estas espécies poderiam influenciar o aspecto paisagístico de uma edificação.



Figura 33 – Indivíduo de *Banisteriopsis anisandra* plantada em tronco como suporte



Figura 34 – Indivíduo de *Cissus erosa* plantada em treliça metálica como suporte

5

CONCLUSÃO

A simulação térmica mostrou que as paredes verdes amenizaram a temperatura do ar ao seu redor e incrementaram a umidade relativa do ar, porém o seu comportamento térmico pode apresentar variações de acordo com a orientação da fachada em que está instalada. Como observado neste estudo, cada orientação possuiu um regime de insolação único, e a vegetação, como um ser vivo que adequa suas respostas fisiológicas de acordo com os estímulos do ambiente, irá apresentar diferenças em seu funcionamento entre locais com diferentes períodos e duração de luz solar direta.

Nas fachadas com orientações termicamente mais desfavoráveis à radiação solar, como a oeste e a leste, a simulação mostrou que o uso de paredes verdes proporcionou condições mais confortáveis ao se comparar com a situação controle. Essa vantagem também ficou evidente, porém com menor intensidade, nas fachadas de orientação sul e norte.

A avaliação térmica das espécies de trepadeiras do cerrado apresentou dados que demonstram que cada espécie possuiu um desempenho diferente da outra. Ao se analisar os dados absolutos é possível verificar que as diferenças de temperatura do ar entre as espécies não ultrapassam 2°C enquanto que a diferença de umidade relativa

do ar não foi superior a 2 pp. Porém, devemos atentar para a dimensão da parede verde que foi simulada, de 9 m², e que ao se aumentar a área vegetada em uma edificação os resultados podem ser mais expressivos. O mesmo pode ocorrer em um bairro, onde a predominância de paredes verdes nas edificações pode causar uma amenização de temperatura local. Portanto, é importante considerar as diferenças obtidas pois elas podem indicar condições para a concepção de paredes verdes de melhor desempenho térmico.

A *Arrebidaea pulchra* foi a espécie que apresentou os resultados mais favoráveis na avaliação térmica, sendo a mais indicada entre as três espécies. Já a *Cissus erosa* foi a que apresentou os resultados mais tímidos, porém, melhores ainda do que a situação controle, sendo assim, seu uso também é indicado, mas talvez não seja uma espécie prioritária para se utilizar nas fachadas de maior desconforto térmico, como a leste e a oeste.

Os dados relacionados à taxa de germinação e crescimento mostraram que a CE apresentou os melhores resultados. Essa espécie demonstrou uma alta taxa de germinação, a maior entre as três, visto que a sua reprodução é muito fácil de se realizar, ainda mais pelo fato de que ela oferece frutos quase o ano todo e suas sementes são fáceis de coletar. Outro ponto favorável para o uso dessa espécie em paredes verdes foi sua taxa de crescimento, cuja velocidade é incomum na

vegetação do Cerrado. Dessa forma, com essa espécie, é possível cobrir paredes de edificações com um pavimento em menos de um ano.

A BA apresentou bons resultados na taxa de germinação, porém, até o final desse estudo, sua taxa de crescimento ainda era baixa.

Há um contraste com o que foi encontrado em campo. Os indivíduos de CE apresentavam as menores áreas foliares e o menor comprimento de caule, ao passo que os indivíduos cultivados apresentavam folhas consideravelmente maiores e caules mais alongados, o que sugere que teriam desempenho melhor na avaliação térmica, já que a área foliar é um dado que influencia o LAD e modificaria os valores obtidos na simulação computacional. Enquanto os indivíduos de BA apresentam maior volume, maior biomassa aparente e grandes valores para a área foliar, os indivíduos jovens e cultivados são curtos e suas folhas são pequenas em comparação ao indivíduo estudado. Isso sugere que estudos mais profundos, com indivíduos de mesma idade e cultivados no mesmo local, possam gerar dados mais fiéis sobre o seu desempenho térmico.

A partir das diferenças notadas entre os indivíduos encontrados em campo e os indivíduos cultivados, é possível supor que para todas as espécies, os resultados seriam melhores se os indivíduos não fossem do

ambiente natural. Isso porque a espécie CE apresentou taxas morfológicas superiores quando cultivada, e mesmo a espécie BA, que até o momento do estudo não atingiu sua fase adulta, já apresentava grande área foliar em ambiente natural e há a possibilidade de que esses valores sejam maiores em um ambiente controlado, com farta disponibilidade de nutrientes e água.

Além disso, a possibilidade de ter um viveiro com espécies de trepadeiras do cerrado também diminuiria a variação entre indivíduos, já que seria possível trabalhar com um número grande de exemplares.

A análise estatística mostrou a relação que existe entre o LAD e a temperatura do ar e umidade relativa do ar, o que indica que esse parâmetro deve ser lavado em consideração no momento de escolha de uma determinada espécie. A condição de elevada área foliar por volume tanto aumenta a área de transpiração foliar quanto a área de sombreamento. Pela análise estatística também foi possível observar a diferenciação morfofisiológica, positiva para o desempenho térmico, entre AP e as demais espécies, o que fortalece a escolha dessa espécie.

Em relação à ferramenta metodológica, o programa ENVI-met simulou valores correspondentes às características morfofisiológicas apresentadas por cada espécie e os resultados obtidos pela análise

estatística confirmou certas relações, porém pela ausência de dados reais, como os que seriam obtidos em uma parede verde construída com cada uma das espécies e com medições *in loco*, ainda não é possível atestar a eficiência do ENVI-Met para tais estudos.

Entretando, a construção de um modelo real nem sempre é factível, o que faz com que a simulação computacional seja um método recorrente. Mesmo assim, sua utilização nem sempre é possível, pois frequentemente se necessitam de dados que são inexistentes. No caso deste estudo, não haviam dados morfofisiológicos sobre as espécies que foram estudadas, eles tiveram que ser gerados. Dessa forma, o trabalho contribuiu significativamente para a ampliação do banco de dados de vegetação do ENVI-Met.

Outro desafio é realizar uma avaliação de como o desempenho térmico de cada vegetação irá impactar os parâmetros climáticos de dentro de uma edificação. Para tal, também é sugerido que sejam realizadas medições diretas, com paredes verdes construídas, o que infelizmente, é de difícil realização.

Dessa forma, são sugeridos para estudos futuros o cultivo e crescimento das espécies em situações controladas; a verificação dos resultados em uma situação real, e não simulada, para validar a

simulação; o estudo de mais espécies do cerrado; análises da viabilidade e germinação de outras espécies; a aplicação destes dispositivos em projetos arquitetônicos; e a difusão das sementes das espécies nativas estudadas.

Porém, o benefício térmico do uso de paredes verdes com as referidas trepadeiras nativas do cerrado ficou claro com os dados apresentados neste estudo. Somado a isso, a presença de vegetação nativa nas áreas urbanas possibilita vantagens para a sustentação e a conservação da fauna e flora nativas, bem como para o bem estar humano, que já são esclarecidas pela bibliografia.

6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Brasil, 2005.

ALEXANDRI, E.; JONES, P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment* 2008;43:480–93.

ANDEWEG, R. Wall-dwelling plants in the cities. *Lavende Natuur*, v 101. p 205 – 206. 2000.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. Norma nº 55: Thermal environmental conditions for human occupancy. 2010.

BRINO, A. C. Brasília: superquadras residenciais. In: Seminário Docomomo Brasil ,5, São Carlos. Anais do 5º Seminário Docomomo Brasil. CD-ROM. ISBN 85-85205-43-1. 2003.

BUENO-BARTHOLOMEI, C. L.; LABAKI, L. C. How much does the change of species of trees affect their solar radiation attenuation. In: International Conference on Urban Climate, Lodz. Proceedings of the International conference on Urban Climate. Lodz, PO : IAUC, 2003. v. 1. p. 267-270. 2003.

CASTELO BRANCO, L. M. B. Análise da arborização em Brasília. O caso da superquadra 308 sul. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília. 2009.

COLLINSON, A. S. Introduction to world vegetation. 2ª Edição. London: Unwin Hyman Ltd. 325p. 1998.

CONHEÇA BRASÍLIA. Vista de Brasília. Disponível em: <<http://www.conhecabrasilia.com.br/sobre/index.html>>. Acesso em 09/10/2015.

COSTA, E. C. Física aplicada à construção: conforto térmico. 2ª Edição. São Paulo: Blücher, 259 p, 1974.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. Em Busca de uma Arquitetura sustentável para os Trópicos – Conforto ambiental. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Revan, 288 p, 2003.

CORRÊA, M.P. Fundamentos de meteorologia. Disponível em: <http://www.solar.unifei.edu.br/pdf/EAM10_CAP2.pdf>. Acesso em: 09/10/2015.

DARLINGTON, A. Ecology of walls. Londres: Editora Heinemann, 138 p, 1981.

EITEN, G. The cerrado vegetation of Brazil. The Botanical Review, Bronx, v. 38, n. 2, p. 201-341, 1972.

EITEN, G. Delimitação do conceito de cerrado. Arquivos do Jardim Botânico, Rio de Janeiro, v. 21, p. 125-134, 1977.

EITEN, G. A sketch of vegetation of Central Brasil, In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE BOTÂNICA, 2; CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 29., 1978, Brasília. Resumo dos trabalhos. Brasília: Sociedade Botânica do Brasil, p. 1-37, 1978.

ENGEL, V, L.; FONSECA, R, C, B.; OLIVEIRA, R, E. Ecologia de lianas e o manejo de fragmentos florestais. Série Técnica IPEF, v. 12, n.32, p. 43-64. 1998.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Consumo de energia no Brasil: análises setoriais. Relatório de Resultados. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2010-14%20Consumo%20de%20Energia%20no%20Brasil.pdf>> Acesso em: 15/08/2015

FELFILI, J. M; FELFILI, M, C; NOGUEIRA, P, E; ARMAS, J, F, S; FARINAS, M, R; NUNES, M; JÚNIOR, M. C. S; REZENDE, A, V; FAGG, C, W. Padrões fitogeográficos e sua relação com sistemas de terra no bioma cerrado. In: SANO, M. S; A, S. P; RIBEIRO, J, F. (Editores Técnicos). Cerrado: ecologia e flora. Brasília. Embrapa, p 212 – 228, 2008.

FERREIRA, P. Alguns dados sobre o clima para edificação em Brasília. Dissertação de mestrado. FAU- UnB- 1965.

FRANCIS, R. A; HOGGART, S. P. G. Urban river wall habitat and vegetation: observations from the river Thames through central London. Urban Ecosystem, v. 12, p 465-485, 2008.

FRANCIS, R. A. Wall ecology: a frontier for urban biodiversity and ecological engineering. Progress in Physical Geography, v 35, n 1, p 43-63. 2010

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. Manual de conforto térmico. 5ª Edição. São Paulo: Studio Nobel, 243 p, 2001.

GIFFORD, R. Environmental psychology. 4ª Edição. Colville: Optimal Books, 600 p, 2007.

GIVONI, B. Man, climate and architecture. Londres. Applied Science Publishers, 1976.

_____. Passive and low energy cooling of buildings. Los Angeles: Van Nostrand Reinhold, 272 p, 1994.

_____. Comfort climate analysis and building design guidelines. Energy and Building, v 18, nº 1, p 11-23. 1992.

GRISOLET, H., *Climatologie- méthodes et pratiques*. Paris, Gauthier-Villars, 401 p, 1962.

GUPTA, A; HALL, M, R. HOPFE, C, J. REZGUI, Y. Building integrated vegetation as an energy conservation measure applied to non domestic building typology in the UK. In: Conference of International Building Performance Simulation Association, n 12, 2011, Sydney. *Anais...* Sydney, 2011.

HOSSOI, F. NAKAI, Y. OMASA, K. Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-d airborne and ground based scanning lidar remote-sensing techniques. IEEE transaction on geoscience and remote sensing, v 48, n 5. 2010.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais Climatológicas, (1961-1990); Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Brasília, DF. 1992. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em: 15/08/2015

JACOBS, M. The tropical rain forest. Springer Verlag: Berlin, 295p, 1988.

KRAUSE, C, B. La climatisation naturelle: modelisation des objets architecturaux, aide a la conception en climat tropical. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Escola de Minas de Paris, Paris. 1995.

LABAKI, L. C.; SANTOS, R. F.; BUENO-BARTHOLOMEI, C. F.; ABREU, L. V. Vegetação e conforto térmico em espaços urbanos abertos. Mudanças Climáticas e o Impacto das Cidades. Fórum Patrimônio, Belo Horizonte, Vol 4, n 1, p 23 – 42, 2011.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C, D.; BATISTA, J, O. Casa eficiente: consumo e geração de energia. Florianópolis: UFSC/labEEE , Volume 2, 76 p, 2010.

MACIEL, A. A. Projeto Bioclimático em Brasília: estudo de caso em edifício de escritórios. 2002. 138 páginas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

MASCARÓ, L. R. Energia na edificação: estratégias para minimizar seu consumo. 2ª Edição. São Paulo: Projeto, 1991. 213p.

MEINERS, S, J; STEWARD, T, A; CADENASSO, P; CADENASSO, L, M. Exotic plant invasion over 40 years of old field succession: community patterns and associations. *Ecography*, v. 25, p 215 – 223. 2002.

MINGUET, J, M. Bio Architecture. 1ª Edição. Barcelona: Instituto Monsa de Ediciones, 2014. 111p.

MONTEIRO, L. M. ALUCCI, M. P. Questões teóricas de conforto térmico em espaços abertos: consideração histórica, discussão do estado da arte e proposição de classificação de modelos. *Ambiente Construído*, v. 7, n. 3, p 43-58, 2007.

MONTEIRO, L. M. ALUCCI, M. P. An Outdoor Thermal Comfort Index for the Subtropics. In: Proc. 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA), Quebec City, Canada, 22–24 Junho 2009.

NASCIMENTO, M. S. B; OLIVEIRA, M. E. Diversidade e uso de Plantas Nativas. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2005/artigo.2005.05.8820647706/>> Acesso em 09/06/2013

OLGYAY, V. Design with climate. New Jersey, Princeton University, 1963.

_____. Arquitectura y clima: manual de diseño para arquitectos y urbanistas. 1ª Edição. Barcelona: Gustavo Gili, 203 p, 1998.

PEÑALOSA, J. Dinâmica de crescimento de Lianas. In: GOMEZPOMPA, A.; DEL AMO, R.S. Investigaciones sobre la regeneración de selvas altas en Veracruz, México. México: Alhambra Mexicana, v. 2, p. 147-169, 1985.

PEREIRA, B.E.; MARTINS, F.R.; ABREU, S.L.; RÜTER, R. Atlas brasileiro de energia solar. 1ª Edição. São José dos Campos: INPE. 60 p, 2006.

POPE, A. C.; EZZATI, M., Dockery, D.W., 2009. Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States. The new England journal of medicine; N Engl J Med ; 360:376-86, 2009.

PUJALS, A. Ecologia de lianas e cipós em fragmentos florestais: dualidade e propostas de manejo. Universidade de Maringá, Centro de Ciências Biológicas, Departamento de Biologia, Programa de Pós graduação em ecologia de ambientes aquáticos continentais. Projeto de dissertação de mestrado.2011.

RAMALHO, C. L. Avaliação do potencial ornamental das trepadeiras do Distrito Federal. 58 páginas. Dissertação. Instituto de Ciências Biológicas. Brasília, Dezembro, 2003.

RAMALHO, C. L; PROENÇA, C, E, B. Trepadeiras ornamentais do cerrado. 1ª Edição. Brasília: Universidade de Brasília e Embrapa Cerrados, 59 p, 2004.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. Biologia vegetal. 7ª Edição. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 856 p, 2007.

RIBEIRO, J. F; WALTER, B, M, T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, M. S; A, S. P; RIBEIRO, J, F. (Editores Técnicos). Cerrado: ecologia e flora. Brasília. Embrapa, p 151 – 212, 2008.

ROCHA, Y. T. MATTHE, L. A. F. RODRIGUES, R. R. Levantamento florístico de maciço de vegetação nativa do brejo integrado a projeto paisagístico. Revista Brasileira de Horticultura Ornamental, Campinas, v 1, n 2, p 86 – 92. 1995.

ROMERO, M. A. B. Arquitetura bioclimática do espaço público. 1ª Edição. Brasília: Editora UnB, 226 p, 2001.

_____. Princípios bioclimáticos para o desenho urbano. 2ª Edição. Brasília: Editora UnB, 128 p, 2013.

SÁ JÚNIOR, A. Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais. 113 páginas. Dissertação. Universidade Federal de Lavras, Julho, 2009.

SEGAL, D. Ecological notes on wall vegetation. Holanda: The Hague. 325 p. 1969.

SCHMID, A. L. A idéia de conforto: reflexões sobre o ambiente construído. 1ª Edição. Curitiba: Pacto Ambiental, 338 p, 2005.

SILVA, F. A. M; ASSAD, E. D; EVANGELISTA, B. A. Caracterização climática do bioma cerrado. In: SANO, M. S; A, S. P; RIBEIRO, J, F. (Editores Técnicos). Cerrado: ecologia e flora. Brasília. Embrapa, p 69 – 88, 2008.

SILVA, E. Uma Introdução ao Projeto Arquitetônico. 2ª Edição. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 124 p, 1991.

SBF - SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA. Espectro eletromagnético. Disponível em: <
<http://www.sbfisica.org.br/v1/novopion/index.php/publicacoes/imagens/130-espectro-eletromagnetico>>. Acesso em: 09/10/2015.

SORTE, P. D. B; SILVA, C. F.; ROMERO, M. A. B. Estudo de Caso de 3 Paredes Verdes em Brasília – DF / Brazil: análise fitogeográfica e morfológica. In: Conferência Latino-Americana e Europeia sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, n 21, 2015, Guimarães. *Anais...* Guimarães, 2015.

TEIXEIRA, C. F. B; LABAKI, L. C. Evaporative cooling in tropical climate: case study of Campinas, Brazil. In: PLEA 2006 - Passive and Low energy Architecture, Genebra. Proceedings of PLEA 2006 - Clever design, affordable comfort. Genebra : Editora da Universite de Geneve. v. 2. p. 887-892, 2006.

TSOUMARAKIS, C; ASSIMAKOPOULOS, V, D. TSIROS, I; HOFFMAN, M; CHRONOPOULOU, A. Thermal performace of a vegetated wall during hot and cold weather conditions. In: Conference on Passive and Low Energy Architecture, n 25, 2008, Dublin. *Anais...* Dublin, 2008.

TUBELIS, A; NASCIMENTO, F. C. L. Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras. São Paulo, Nobel, 374 p, 1984.

VALESAN, M; FEDRIZZI, B; SATTLER, M, A; Vantagens e desvantagens da utilização de peles-verdes em edificações residenciais em Porto Alegre segundo seus moradores. *Ambiente Construído*, v. 10, n. 3, p 55-67, 2010.

WALTER, H. *Ecology of tropical and subtropical vegetation*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1971

WEISS, M; BARET, F, G; SMITH, J; JONCKHEERE, I; COPPIN, P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II: Estimation of LAI, errors and sampling. *Agriculture For Meteorology*, v 121, n. 1/2, p. 37-53. 2004.

WONG, N. H; TANA, A. K. Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and environment* (Department of Building School of Design and Environment, National University of Singapore) vol. 45, no. Issue 2: 411-420, 2010.

YEANG, K. *Proyectar com la naturaleza*. Gustavo Gilli, Espanha. 198 p, 1999.