Carolina dos Santos Gusson

O impacto da verticalização no microclima urbano
e no conforto térmico na escala do pedestre:
o papel da geometria e da envoltória dos edifícios

São Paulo
2020

CAROLINA DOS SANTOS GUSSON

**O impacto da verticalização no microclima urbano e no conforto térmico na
escala do pedestre: o papel da geometria e da envoltória dos edifícios**

EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM RELAÇÃO À VERSÃO ORIGINAL, SOB
RESPONSABILIDADE DA AUTORA E ANUÊNCIA DA ORIENTADORA.

(A versão original, em formato digital, ficará arquivada na Biblioteca
da Faculdade. São Paulo, 28 de julho de 2020)

Tese apresentada à Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Doutora em Ciências.

Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientadora: Profa. Dra. Denise Helena Silva Duarte

São Paulo

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço Técnico de Biblioteca
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

Gusson, Carolina dos Santos

O impacto da verticalização no microclima urbano e no conforto térmico na escala do pedestre: o papel da geometria e da envoltória dos edifícios / Carolina dos Santos Gusson; orientadora Denise Helena Silva Duarte. - São Paulo, 2020.

268 p.

Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura.

1. Espaços Urbanos Abertos. 2. Taxa de Ocupação. 3. Albedo. 4. Temperatura Radiante Média. I. Duarte, Denise Helena Silva, orient. II. Título.

Universidade de São Paulo

ATA DE DEFESA

Aluno: 16132 - 7646880 - 2 / Página 1 de 1

Ata de defesa de Tese do(a) Senhor(a) Carolina dos Santos Gusson no Programa: Arquitetura e Urbanismo, do(a) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.

Aos 29 dias do mês de maio de 2020, no(a) realizou-se a Defesa da Tese do(a) Senhor(a) Carolina dos Santos Gusson, apresentada para a obtenção do título de Doutora intitulada:

"O impacto da verticalização no microclima urbano e no conforto térmico na escala do pedestre: o papel da geometria e da envoltória dos edifícios"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Função	Sigla da CPG	Resultado
Denise Helena Silva Duarte	Presidente	FAU - USP	<u>aprovada</u>
Eleonora Sad de Assis	Titular	UFMG - Externo	<u>aprovada</u>
Leonardo Marques Monteiro	Titular	FAU - USP	<u>aprovada</u>
Karin Regina de Castro Marins	Titular	EP - USP	<u>aprovada</u>
Paula Shinzato	Titular	Externo	<u>aprovada</u>

Resultado Final: aprovada

Parecer da Comissão Julgadora *

Eu, Dina Vasconcellos Leone, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as). São Paulo, aos 29 dias do mês de maio de 2020.

Eleonora Sad de Assis

Leonardo Marques Monteiro

Karin Regina de Castro Marins

Paula Shinzato

Denise Helena Silva Duarte
Presidente da Comissão Julgadora

* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

A defesa foi homologada pela Comissão de Pós-Graduação em _____ e, portanto, o(a) aluno(a) _____ jus ao título de Doutora em Ciências obtido no Programa Arquitetura e Urbanismo - Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura.

Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Dedico essa tese ao Rodrigo, meu marido;
aos meus pais, Antonio e Lilia, e à minha
irmã Gabriela, pelo incentivo e apoio,
sempre.*

AGRADECIMENTOS

À orientadora, Profa. Dra. Denise Helena Silva Duarte, pela confiança, exemplo, ensinamentos, orientação e disponibilidade durante todo o trabalho.

À Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU) da Universidade de São Paulo (USP), pela oportunidade de realização do doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado, apoio financeiro necessário para a realização desta pesquisa.

À Profa. Dra. Eleonora Sad Assis da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), pela vinda e participação na banca de qualificação e por compartilhar seus conhecimentos.

Ao Prof. Dr. Leonardo Marques Monteiro, desta faculdade, pelas edificantes colocações na banca de qualificação.

Ao Prof. Dr. Michael Bruse do Institute of Geography da Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Alemanha, pela disponibilização da licença do modelo ENVI-met.

Ao Prof. Dr. Helge Simon do Institute of Geography da Johannes Gutenberg-Universität Mainz, pela disponibilidade e ensinamentos sobre o modelo.

Ao Prof. Dr. Amauri Pereira de Oliveira, pesquisador responsável pelo Laboratório de Micrometeorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da USP, por ceder os dados de radiação necessários para as simulações.

Aos responsáveis pelo edifício Paulista 1 e Edifício Siena, por colocar à disposição as respectivas áreas para alocação das estações meteorológicas para as medições de campo.

Aos alunos de graduação e iniciação científica da FAU-USP, Giulia Polli e Augusto Longarine, pela dedicação e participação no trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT) da FAU-USP, Paula Shinzato, Luciana Schwandner Ferreira, Priscila Weruska Stark da Silva, Carolina Abrahão Alves, Fernanda Panontin Tsuda e Cida Bou Ghosn, pela convivência, contribuição com seus conhecimentos e apoio.

Ao técnico do LABAUT da FAU-USP, Ranieri Higa, pelo apoio nas medições de campo e no auxílio com os equipamentos do laboratório.

Aos técnicos de informática da FAU-USP, pelo auxílio com os computadores para as simulações.

Aos meus pais, Antonio e Lilia, pelo apoio tanto financeiro quanto emocional.

À minha irmã, Gabriela, pelo apoio e paciência.

Ao Rodrigo, meu marido, pelo apoio, carinho, compreensão, amor e auxílio.

RESUMO

GUSSON, Carolina dos Santos. **O impacto da verticalização no microclima urbano e no conforto térmico na escala do pedestre: o papel da geometria e da envoltória dos edifícios**. 2020. 268 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

Com o aumento da população mundial vivendo em cidades, estas desempenham um importante papel tanto na mitigação como na adaptação às mudanças do clima na microescala. Em paralelo, o adensamento é entendido como uma peça-chave para a sustentabilidade urbana, por diversas razões, sendo a verticalização uma de suas possibilidades. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é quantificar o impacto da verticalização no microclima e no conforto térmico na escala do pedestre, em função da geometria e do comportamento térmico dos componentes construtivos e dos acabamentos superficiais, partindo-se da hipótese de que esses elementos têm potencial para a mitigação do aquecimento urbano na microescala e para a melhoria das condições de conforto térmico do pedestre. O método é dedutivo, por meio de medições de campo em uma das áreas mais densamente construídas do município de São Paulo, e indutivo por meio da modelagem, calibração e simulação de cenários paramétricos no modelo ENVI-met 4.4.3. Os resultados mostraram que a geometria edificada interfere no microclima na escala do pedestre, principalmente no período diurno; a orientação das vias, o miolo da quadra, as diferenças de altura e a taxa de ocupação têm impactos que, se somados, podem aumentar ou diminuir a temperatura radiante média (TRM) em até 14°C e a temperatura equivalente percebida (TEP) em até 7,7°C. Com relação à envoltória dos edifícios, elas interferem não somente no período diurno como também no noturno, pela sua capacidade de armazenar mais ou menos calor. Acabamentos superficiais contribuem para o aumento da TRM durante o dia, no meio externo, ao refletir mais calor, quando claros, e ao aumentar a temperatura da superfície, quando escuros. Durante a noite, eles interferem menos na perda de calor. As diferenças na TRM e na TEP resultam do efeito combinado entre componentes construtivos e acabamentos superficiais, podendo chegar a 8,1°C na TRM e 4,3°C na TEP, durante o dia, e no período noturno, a no mínimo 3,9°C na TRM e 2°C na TEP. O efeito combinado da geometria, dos componentes construtivos e dos acabamentos superficiais pode provocar diferenças no período diurno de até 22,1°C na TRM e de 11,9°C na TEP, e noturno de, no mínimo 4,1°C na TRM e 2,7°C na TEP. Em síntese, a taxa de ocupação e a altura dos edifícios determinam parâmetros de sombreamento e ventilação que podem melhorar consideravelmente a sensação térmica no nível do pedestre. Os componentes construtivos são os elementos que interferem mais no aquecimento noturno do ambiente externo, mas interferem menos no período diurno. O acabamento superficial interfere no período diurno dentro e fora da edificação, mas tem menor interferência no período noturno. Acabamentos reflexivos provocam mais desconforto para o pedestre em espaços abertos, mas podem melhorar as condições térmicas dentro dos edifícios; já o acabamento escuro melhora as condições de conforto no ambiente externo, mas pode contribuir para o aquecimento interno nos edifícios.

Palavras-chave: Espaços urbanos abertos. Taxa de ocupação. Albedo. Temperatura radiante média. ENVI-met.

ABSTRACT

GUSSON, Carolina dos Santos. **The verticalization impact on urban microclimate and thermal comfort at the pedestrian scale: the role of buildings geometry and envelope**. 2020. 268 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

With the increase in the world population living in cities, they play an important role both in mitigation and adaptation to climate changes at the micro-scale. In parallel, densification is understood as a key element for urban sustainability, for several reasons, with verticalization being one of its possibilities. In this context, the objective of this work is to quantify the verticalization impact in the microclimate and the pedestrian scale thermal comfort, depending on the geometry and thermal behavior of the building components and surface finishes, based on the hypothesis that these elements have potential to mitigate urban heating at the microscale and to improve pedestrian thermal comfort conditions. The method is deductive, through field measurements in one of the most densely built areas of São Paulo city, and inductive through the modeling, calibration, and simulation of parametric scenarios in the ENVI-met 4.4.3 model. The results showed that the building geometry interferes in the microclimate on the pedestrian scale, mainly during the day; the streets orientation, the courtyards, the height differences and the plot ratio have impacts that, if put together, can increase or decrease the mean radiant temperature (MRT) by up to 14 °C and the perceived equivalent temperature (TEP) up to 7.7 °C. Regarding the buildings envelope, it interferes not only during the day but also at night, due to its capacity to store more or less heat. Surface finishes contribute to MRT increase during the day at outdoors, by reflecting more heat, when white, and by increasing the surface temperature, when dark. During the night, they interfere less in heat loss. The differences in MRT and TEP result from the combined effect between construction components and surface finishes, which can reach 8.1 °C in MRT and 4.3 °C in TEP, during the day, and at night, at least 3.9 °C in MRT and 2 °C in TEP. The combined effect of geometry, construction components and surface finishes can cause differences in the daytime of up to 22.1 °C in MRT and 11.9 °C in TEP, and nighttime of at least 4.1 °C in MRT and 2.7 °C in TEP. In summary, the buildings coverage ratio and the buildings height determine shading and ventilation parameters that can considerably improve the thermal sensation at the pedestrian level. The building components are the elements that interfere more in the night heating of the external environment but interfere less in the daytime. The surface finish interferes in daytime inside and outside building but has less interference in nighttime. Reflective finishes cause more discomfort for pedestrians in open spaces but can improve thermal conditions inside buildings; the dark finish improves the comfort conditions in the external environment but can contribute to internal heating in buildings.

Keywords: Outdoor urban spaces. Building coverage ratio. Albedo. Mean radiant temperature. ENVI-met.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema conceitual das escalas do clima urbano.....	28
Figura 2 - Esquema do balanço de energia urbano.....	31
Figura 3 - Representação esquemática dos principais fluxos de energia que compreendem.....	33
Figura 4 - Efeitos da geometria urbana no balanço de radiação.....	34
Figura 5 - Impacto da geometria do cânion urbano nas trocas radiantes.	35
Figura 6 - Fatores de visão de céu em um cânion com relação $A/L = 1.0$	36
Figura 7 - Média do fator de visão das faces de um cânion.....	39
Figura 8 - Cursos diários dos fluxos de radiação.	40
Figura 9 - Efeito da relação A/L na radiação líquida (Q^* , L^*) na CLU.....	42
Figura 10 - Fator de visão do céu.	51
Figura 11 - Relações A/L assimétricas propostas para os dois lados da via.	54
Figura 12 - Definição do FVC geométrica (esquerda) e por cossenos (direita).	56
Figura 13 - Variação de temperaturas superficiais na envoltória de edifícios.	62
Figura 14 - Corte esquemático do efeito causado pelo edifício londrino.	65
Figura 15 - Edifícios na Av. Pres. Juscelino Kubitschek, Vila Olímpia, São Paulo às 9h.	66
Figura 16 - Efeito da geometria urbana 2D no albedo do cânion.	71
Figura 17 - Efeito da forma urbana sobre o albedo da superfície.	73
Figura 18 - Efeito da forma urbana sobre o albedo e da superfície.	73
Figura 19 - Geometria urbana dos cenários estudados.....	74
Figura 20 – Relação albedo de superfície, ângulo solar e ângulo zenital.....	76
Figura 21 – Emissividade efetiva equivalente.....	77
Figura 22 - Representação esquemática das trocas de radiação entre um pedestre e o ambiente urbano circundante.....	82
Figura 23 – Localização do município de São Paulo.....	89
Figura 24 - Topografia da região metropolitana de São Paulo.	90
Figura 25 - Temperatura média mensal do ar para 2016 e 2017, normais, média 1991-2017 e média climatológica.....	92
Figura 26 -Temperatura média máxima mensal para 2016 e 2017, valores diários extremos para cada mês observados em toda a série (1933-2017), além das normais	

e da média climatológica. No eixo X, há indicativo do ano de ocorrência dos valores extremos de cada mês.	93
Figura 27 – Temperatura média mínima mensal para 2016 e 2017, valores extremos diários observados para cada mês, em toda a série (1933-2017), além das normais e da média climatológica. No eixo X, há indicativo do ano de ocorrência dos valores extremos de cada mês.	93
Figura 28 – Precipitação mensal acumulada nos anos de 2016 e 2017, além das normais e da média climatológica.	94
Figura 29 - Umidade relativa do ar média mensal para os anos de 2016 e 2017, além da normal e da média climatológica.....	95
Figura 30 – Número de dias com umidade relativa abaixo de 30% em 2016 e 2017, além da média e da normal climatológica.	95
Figura 31 – Velocidade média mensal do vento (Km/h) nos anos de 2016 e 2017, além da normal e da média climatológica.....	96
Figura 32 - Frequência da direção média do vento nos anos de 2016 e 2017, além da frequência média 1957-2017.....	96
Figura 33 – Irradiação solar global para os anos de 2016 e 2017, além da normal e da média climatológica.	97
Figura 34 - Fluxograma do método	99
Figura 35 - Arquitetura do modelo.....	102
Figura 36 - Modelo principal 3D.....	104
Figura 37 - Diferentes conceitos para organizar o layout da grade vertical.	105
Figura 38 - Fluxograma da ferramenta <i>forcing</i> no ENVI-met.....	109
Figura 39 - Exemplo da grade tridimensional para paredes.	110
Figura 40 - Exemplo dos elementos avulsos.....	111
Figura 41 - Esquema do modelo de 3 nós.....	112
Figura 42 - Esquema do modelo de 7 nós.....	112
Figura 43 - Edição de um componente com 3 materiais.	113
Figura 44 - Temperatura das superfícies dos edifícios na simulação teste.	119
Figura 45 - Área de estudo.....	120
Figura 46 - Densidade populacional e construída no município de São Paulo (por distritos).	121
Figura 47 - Perspectiva com os dois locais de medição.....	122

Figura 48 - Foto aérea dos dois locais de medição: entorno imediato em vermelho e a área do modelo para simulação em amarelo	122
Figura 49 - Bela Vista: localização da estação meteorológica.....	125
Figura 50 - Bela Vista: grande angular e fator de visão do céu do ponto onde foi colocada a estação.....	126
Figura 51 - Paulista: localização da estação meteorológica.	126
Figura 52 - Paulista: grande angular e fator de visão do céu do ponto onde foi colocada a estação.....	127
Figura 53 - Localização das estações meteorológicas.....	133
Figura 54 - Plataforma Micrometeorológica do LabMicro no IAG-USP (Cidade Universitária).	137
Figura 55 - Modelo em 3D.....	142
Figura 56 - Modelo em 2D.....	143
Figura 57 - Componente construtivo das paredes utilizadas no modelo para calibração.	144
Figura 58 - Coeficiente de aproveitamento das quadras na região da Av. Paulista.	147
Figura 59 - Imagem ponto FVC.....	151
Figura 60 - Tipo de vidro por porcentagem de vidro nas fachadas.....	152
Figura 61 - Materiais e cores.	158
Figura 62 - Representação do vidro no modelo ENVI-met.....	159
Figura 63 - Propriedades dos vidros simulados.	159
Figura 64 - Componente da cobertura dos edifícios.....	160
Figura 65 - Quadra do cenário paramétrico teste.	161
Figura 66 - Superfície dos cenários com asfalto nas vias e concreto nas quadras e canteiros centrais.....	166
Figura 67 - Características dos materiais dos pavimentos das quadras e canteiros centrais.....	166
Figura 68 - Características do solo e do asfalto dos cenários.	167
Figura 69 - Locais das análises dos resultados.	175
Figura 70 - Ferramenta para análises dos resultados.....	176
Figura 71 - Estrutura de arquivos da ferramenta.....	177

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tar nas duas áreas de medição: Paulista e Bela Vista.....	128
Gráfico 2 - Umidade relativa do ar nas duas áreas de medição: Edifício Paulista e Bela Vista.....	128
Gráfico 3 - Temperatura de globo cinza nas duas áreas de medição: Paulista e Bela Vista.....	130
Gráfico 4 - Radiação solar global nas duas áreas de medição: Paulista e Bela Vista.....	130
Gráfico 5 - Velocidade do ar nas duas áreas de medição: Paulista e Bela Vista.....	131
Gráfico 6 - Frequência da direção do ar nas duas áreas de medição: Paulista e Bela Vista.....	132
Gráfico 7 - Comparação da média horária da Tar (°C) no período de 06 a 25 de abril de 2016.	135
Gráfico 8 - Comparação da média horária da velocidade do ar (m/s) no período de 06 a 25 de abril de 2016.	136
Gráfico 9 - Radiação de onda curta, direta e difusa, e de onda longa medidas na plataforma do IAG-USP (Cidade Universitária) em 16 e 17/04/2016	138
Gráfico 10 - Média da TRM no centro da quadra a 1,5m do solo.	162
Gráfico 11 - Média da Tar no centro da quadra, a 1,5m do solo.....	163
Gráfico 12 - Temperaturas do ar, de globo e radiante média medidas e simuladas	171
Gráfico 13 - TEP medido x simulado.	174
Gráfico 14 - Média horária da temperatura radiante média em um ciclo de 24h para cenários com edifícios de 44m.....	179
Gráfico 15 - Média horária da temperatura radiante média em um ciclo de 24h para cenários com edifícios de 81m.....	180
Gráfico 16 - Média horária da temperatura radiante média em um ciclo de 24h para cenários com edifícios de 119m.	181
Gráfico 17 - Média horária do índice TEP em um ciclo de 24h para cenários de 44m.	199
Gráfico 18 - Média horária do índice TEP em um ciclo de 24h para cenários de 81m.	200
Gráfico 19 - Média horária do índice TEP em um ciclo de 24h para cenários de 119m.	201

Gráfico 20 - Interação entre os eixos às 12h.	208
Gráfico 21 - Interação entre os eixos às 5h.	208
Gráfico 22 - Sensação térmica (TEP) nos eixos em porcentagem média de horas para período de 24h.	209
Gráfico 23 - Interação entre alturas às 12h.	210
Gráfico 24 - Interação entre as alturas às 5h.	211
Gráfico 25 - Sensação térmica (TEP) por alturas em porcentagem média de horas para período de 24h.	212
Gráfico 26 - Interação entre materiais às 12h.	213
Gráfico 27 - Interação entre materiais às 5h.	214
Gráfico 28 - Sensação térmica (TEP) pelos componentes construtivos e acabamentos superficiais em porcentagem média de horas para período de 24h.	215
Gráfico 29 - Relação entre Tar interna média e a TRM externa média às 12h (°C).	216

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Unidades morfológicas urbanas.	29
Quadro 2 - Ferramentas do modelo disponíveis para cada tipo de licença.	103
Quadro 3 - Níveis da simulação.	114
Quadro 4 - Parâmetros para a criação de componentes no banco de dados.	116
Quadro 5 - Sensores utilizados na estação meteorológica.	124
Quadro 6 - Dimensões do modelo para simulação das áreas de medição.	143
Quadro 7 - Altura das edificações considerando-se os CAs permitidos no zoneamento vigente (São Paulo, 2016)	146
Quadro 8 - Cenários com variação na geometria urbana.	149
Quadro 9 - Tipo de vedações externas para a zona bioclimática 3.	153
Quadro 10 - Propriedades térmicas das paredes e coberturas utilizadas nas simulações.	154
Quadro 11 - Acabamentos das paredes utilizadas nas simulações.	154
Quadro 12 - Tipos de vidros e propriedades utilizados na simulação.	155
Quadro 13 - Matriz de teste de sensibilidade.	155
Quadro 14 - Propriedades do tijolo cerâmico e bloco de concreto utilizados nas simulações.	156

Quadro 15 - Propriedades da laje de cobertura utilizada nas simulações.	157
Quadro 16 - Cenários a serem simulados.	164
Quadro 17 – Características dos cenários simulados.....	165
Quadro 18 - Radiação direta (W/m^2) em 3 horários no nível do pedestre para 3 cenários de edifícios.	182
Quadro 19 - Distribuição da TRM às 12h no nível do pedestre (1,50m) em todos os cenários.	183
Quadro 20 - FVC para 3 cenários de altura (m) a partir do nível do pedestre.....	184
Quadro 21 - Horas de sol ao longo do dia em diferentes épocas do ano para 3 cenários de alturas.....	191
Quadro 22 - Ranking dos cenários com valores médios mais baixos para TRM às 12h.	192
Quadro 23 - Distribuição da TRM às 5h no nível do pedestre (1,50 m) em todos os cenários.	194
Quadro 24 - Distribuição do TEP às 12h no nível do pedestre (1,50 m) em todos os cenários.	202
Quadro 25 - Distribuição do TEP às 6h, no nível do pedestre (1,50 m), em todos os cenários.	205
Quadro 26 - Principais resultados nos espaços externos na altura do pedestre (1,5m) para o mês de abril.	217

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de entrada da ferramenta <i>full forcing</i>	139
Tabela 2 - Análise estatística da comparação entre dados medidos e simulados...	172
Tabela 3 - Desempenho dos materiais e acabamentos em relação à média da TRM às 12h.....	184
Tabela 4 - Média, desvio padrão e teste de Tukey da TRM ($^{\circ}C$) às 12h para diferentes materiais conforme altura dos edifícios (m) e eixos.	186
Tabela 5 - Resultados das diferentes geometrias edificadas em relação à média da TRM às 12h.....	187
Tabela 6 - Média, desvio padrão e teste de Tukey da TRM ($^{\circ}C$) às 12h para diferentes alturas (m), componentes construtivos, acabamentos superficiais e eixos.....	188

Tabela 7 - Resultados dos diferentes eixos e miolo da quadra em relação à média da TRM às 12h.	189
Tabela 8 - Média, desvio padrão e teste de Tukey da TRM (°C) às 12h para dois eixos conforme componentes construtivos, acabamentos superficiais, eixos, miolo da quadra e alturas (m).	190
Tabela 9 - Resultados da TRM em função dos diferentes componentes construtivos e acabamentos em relação à TRM média às 5h.	195
Tabela 10 - Média, desvio padrão e teste de Tukey da TRM (°C) às 5h para diferentes componentes construtivos e acabamentos	196
Tabela 11 - Resultados de TRM para geometria edificada em relação à TRM média às 5h.	197
Tabela 12 - Média, desvio padrão e teste de Tukey da TRM (°C) às 5h para diferentes alturas (m), conforme componentes construtivos, acabamentos superficiais e eixos.	197
Tabela 13 - Resultados da TRM (°C) para eixos/miolo da quadra em relação à média da TRM às 5h.	198
Tabela 14 - Média, desvio padrão e teste de Tukey da TRM (°C) às 5h para eixos e miolo da quadra, conforme componentes construtivos, acabamentos superficiais e alturas (m).	198
Tabela 15 - Desempenho dos componentes construtivos e acabamentos superficiais em relação à média do TEP às 12h.	203
Tabela 16 - Resultados da geometria edificada em relação à média do TEP às 12h.	203
Tabela 17 - Resultado dos eixos em relação à média da TRM às 12h.	204
Tabela 18 - Resultados dos componentes construtivos e acabamentos superficiais em relação à média do TEP às 6h.	206
Tabela 19 - Resultados da geometria edificada em relação à média de TEP às 6h.	206
Tabela 20 - Resultado dos eixos em relação à média da TRM às 6h.	207

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/L	relação altura / largura
ANOVA	análise de variância
CA	coeficiente de aproveitamento
CDU	camada do dossel urbano
CLS	camada limite superficial
CLU	camada limite urbana
DVC	densidade do volume construído
FAU	Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
FVC	fator de visão de céu
IAF	índice de área frontal
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICU	ilha de calor urbana
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LABAUT	Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética
p	probabilidade de significância
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PET	<i>physiological equivalent temperature</i>
r^2	coeficiente de determinação
T _{ar}	temperatura do ar
TEP	temperatura equivalente percebida
T _g	temperatura de globo cinza
TO	taxa de ocupação
TRM	temperatura radiante média
UR	umidade relativa do ar
USP	Universidade de São Paulo
UTCI	<i>universal thermal climate index</i>
VV	velocidade do vento

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	grau Celsius
h	hora
hab/km ²	habitante por quilômetro quadrado
km ²	quilômetro quadrado
m	metro
m ²	metro quadrado
m/s	metros por segundo
W/m ²	Watt por metro quadrado
%	porcentagem

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE GRÁFICOS	12
LISTA DE QUADROS.....	13
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	16
LISTA DE SÍMBOLOS	17
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Objeto e objetivo	25
1.2 Hipótese	25
1.3 Estrutura da tese	26
2 EFEITOS DA DENSIDADE CONSTRUÍDA NO MICROCLIMA URBANO.....	27
2.1 Escalas do clima urbano.....	27
2.2 Balanço de energia na superfície urbana.....	30
2.2.1 Balanço de energia em cânions urbanos	31
2.2.2 Balanço de radiação no cânion urbano	34
2.3 Ilhas de calor e de resfriamento urbanas	44
2.3.1 Ilha de calor urbana.....	44
2.3.2 Ilha de resfriamento urbana.....	45
2.4 Efeito da geometria edificada no microclima urbano	47
2.4.1 Quantificação da geometria edificada para estudos microclimáticos	49
2.4.2 Efeito da relação altura/largura (A/L) no microclima urbano.....	51
2.4.3 Efeito do fator de visão de céu (FVC) no microclima urbano	55
2.4.4 Efeito da orientação das vias no microclima urbano	59
2.5 Efeito da materialidade construída no microclima urbano	62
2.5.1 Propriedades dos materiais urbanos	66
2.5.1.1 Propriedades radiantes	67

2.5.1.2 Propriedades térmicas.....	78
2.6 Temperatura radiante média (trm) como variável microclimática	80
2.6.1 Métodos para estimar a TRM	83
2.7 Conclusões do capítulo.....	85
3 VERTICALIZAÇÃO E O CLIMA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO	87
3.1 A verticalização no município de São Paulo	87
3.2 O clima no município de São Paulo	89
4 MATERIAL E MÉTODO	99
4.1 Modelo Envi-Met V4.4.3	100
4.1.1 Modelo atmosférico.....	106
4.1.2 Modelo do ambiente edificado e demais superfícies urbanas	109
4.1.3 Dados de entrada	113
4.1.4 Banco de dados	115
4.1.5 Dados de saída.....	117
4.1.6 Estudos com o modelo ENVI-met.....	118
4.1.7 Conclusões do capítulo.....	119
4.2 Calibração do modelo ENVI-met V4.4.3	120
4.2.1 Definição das áreas de estudo.....	120
4.2.2 Medições microclimáticas nas áreas de estudo	123
4.2.3 Modelagem e simulação	136
4.3 Cenários paramétricos	145
4.3.1 Geometria e densidade urbana.....	145
4.3.2 Materialidade	151
4.3.3 Modelagem e simulação	155
4.4 Tratamento dos resultados	168
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	170
5.1 Comparação entre dados medidos e simulados	170

5.2	Cenários paramétricos.....	175
5.3	Resultados de temperatura radiante média.....	177
5.1.1	Para período de 24 horas.....	177
5.1.2	Para horário com TRM mais alta.....	182
5.1.3	Para horário com TRM mais baixa.....	193
5.4	Resultados de Temperatura Equivalente Percebida.....	199
5.2.1	Para período de 24 horas.....	199
5.2.2	Para horário com TEP mais alta (12h).....	201
5.2.3	Para horário com TEP mais baixa (6h).....	204
5.5	Efeitos do Desenho Urbano e das Superfícies.....	207
5.3.1	Efeito da geometria.....	207
5.3.2	Efeito da materialidade.....	212
5.3.3	Efeito na temperatura interna dos edifícios.....	215
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	218
	Referências.....	226
	Apêndices.....	242
	Anexos.....	264

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, 55% da população mundial vive em áreas urbanas e a projeção é de que até 2050 68% da população mundial viverá em cidades (UN, 2018). No Brasil, até 2050, 90% da população irá morar em cidades (UN, 2014). A América Latina e Caribe é a segunda região mais urbanizada do mundo com aproximadamente 81% das pessoas vivendo em cidades (UN, 2018), com 12,7% de sua população vivendo em 5 cidades com 10 milhões de habitantes ou mais (UN, 2016). São Paulo e a Cidade do México estão em quarto lugar como aglomerações mais urbanizadas do mundo em população, com 22 milhões de habitantes. Hoje as maiores cidades estão concentradas na parte sul do globo; Ásia e África são as regiões onde a urbanização será mais expressiva até 2050 (UN, 2018), sendo que, de 2016 a 2030, as cidades com 500 mil habitantes ou mais serão 80% na África e 30% na Ásia (UN, 2016). As duas regiões que mais estão se urbanizando apresentam clima predominantemente tropical/subtropical, semelhantes aos que encontramos no Brasil, e também vivenciam processos recentes de urbanização. Assim, os problemas climáticos urbanos que hoje são enfrentados por cidades brasileiras podem ser evitados ou, pelo menos, previstos nessas regiões, com pesquisas nesta área do conhecimento.

Não só a urbanização preocupa os órgãos internacionais, tais como as Nações Unidas, mas também o impacto das mudanças climáticas nas áreas urbanas. Essas alterações em áreas urbanas serão responsáveis por aumentar os riscos de estresse por calor, tempestades e precipitações extremas, inundações, deslizamento de terra, poluição do ar, seca, escassez de água e aumento do nível do mar (IPCC, 2014). Nesse contexto, as cidades assumem papel importante, tanto na mitigação como na adaptação às mudanças climáticas.

O Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC (2014) incluiu um capítulo sobre adaptação urbana às mudanças climáticas (Capítulo 8 do Grupo de Trabalho II, Revi et al. (2014)) e outro sobre o papel do planejamento do território e das áreas urbanas na mitigação das alterações climáticas (Capítulo 12 do Grupo de Trabalho III, Seto et al., (2014)).

As estratégias de mitigação em áreas urbanas, segundo o IPCC (2014), são principalmente para a redução da emissão de gases do efeito estufa e a redução do consumo de energia. O zoneamento de uso misto, o desenvolvimento orientado para o transporte, o aumento da densidade e a disponibilidade de habitação próxima ao

trabalho podem reduzir o uso direto e indireto de energia em vários setores. O adensamento com qualidade ambiental das áreas urbanas pode preservar terra para a agricultura e a bioenergia, assim como edifícios mais eficientes podem contribuir para a redução do consumo de energia e água; todas essas medidas são exemplos de ações de mitigação com benefícios para a adaptação.

Já as estratégias de adaptação do ambiente urbano, também consideradas pelo IPCC (2014), incluem a capacidade adaptativa dos edifícios, a manutenção de áreas verdes, as melhorias no ambiente construído para reduzir o estresse térmico, por meio do planejamento urbano, das leis de zoneamento, dos códigos de edificação, da construção de estruturas de proteção às inundações e tempestades e o melhoramento do sistema de drenagem. O relatório também reforça que “As próximas duas décadas apresentam uma janela de oportunidade para a mitigação em áreas urbanas, pois uma grande parte das áreas urbanas do mundo será construída durante este período.” (IPCC, 2014).

Mesmo assim, apesar da importância das cidades na mitigação e adaptação às mudanças climáticas, considera-se que a discussão sobre adaptação e mitigação nas áreas urbanas não foi plenamente integrada ao AR5. Como muitas questões importantes ainda não foram respondidas, foi crucial mobilizar a comunidade científica para trabalhar nessas iniciativas e abordar as lacunas durante o ciclo do Sexto Relatório de Avaliação (AR6), em curso (IPCC CITIES, 2018).

Assim, em 2016, 20 cidades e 25 organizações ao redor do mundo, com apoio do C40 e do ICLEI, se uniram para pedir ao IPCC maior atenção ao papel das cidades nas respostas às mudanças climáticas. Dessa forma, na sessão 43 da discussão dos tópicos para o relatório especial do AR6 em Nairobi, em abril de 2016, o IPCC reconheceu a urgência de mais trabalhos na área e decidiu: a) recomendar, dentro dos processos de escopo do AR6, uma integração mais forte da avaliação sobre os impactos da mudança climática nas cidades e suas oportunidades únicas de adaptação e mitigação, e tornar mais robusta a consideração das cidades no tratamento de questões regionais e em capítulos que são focados em assentamentos humanos, áreas urbanas e afins, inclusive através do engajamento aprimorado de agentes urbanos; b) incluir um Relatório Especial sobre Mudança do Clima e Cidades no Sétimo Relatório de Avaliação (AR7); e c) considerar a possibilidade de trabalhar com academia, profissionais, órgãos e agências

científicas relevantes para organizar uma conferência científica internacional sobre mudança do clima e cidades no início do ciclo do AR6, a fim de estimular relatórios científicos e publicações revisadas por pares sobre esse assunto.

Seguindo essa recomendação, em março de 2018 foi realizada a primeira conferência IPCC Cities, que fez um balanço do trabalho científico pós-AR5 sobre cidades e alterações climáticas (ao nível da pesquisa científica, política e prática), definindo um conjunto de temas e questões-chave de pesquisa que podem ser abordadas antes do Relatório Especial sobre Cidades e Mudança Climática para o AR7. Os principais objetivos da reunião foram: criar agenda de pesquisa global sobre cidades e mudanças climáticas; compreender os impactos das alterações climáticas ao nível urbano, o leque de respostas possíveis e o papel das cidades na implementação do Acordo de Paris; e facilitar tomadas de decisão sobre o clima no nível local, como resultado de melhores relações entre política, prática e comunidades científicas que trabalham em áreas urbanas, por meio de novos projetos, plataformas e parcerias.¹

No Brasil, o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) elaborou o relatório especial “Mudanças Climáticas e Cidades”, elencando os principais problemas no tema, tais como: aumento de temperatura e nível do mar, ilhas de calor, inundações, escassez de água e alimentos, acidificação dos oceanos e eventos extremos; além disso, apresentou alternativas de adaptação e mitigação pertinentes ao atual contexto nacional (RIBEIRO; SANTOS, 2016).

Dentre as estratégias de mitigação citadas no relatório estão: redução de emissão de gases do efeito estufa no setor de transporte, promovendo redução de viagens motorizadas, pelo aumento da densidade urbana e do uso misto do solo urbano; emprego de novos padrões construtivos para reduzir consumo médio das edificações e aumentar eficiência da iluminação pública (RIBEIRO; SANTOS, 2016). As estratégias de adaptação citadas no PBMC para o ambiente construído incluem edifícios com ventilação passiva e sistemas de refrigeração eficientes; construção ecoeficiente e uso de materiais sustentáveis; eficiência do uso da água; e redução do efeito de ilha de calor urbana por meio do plantio de árvores, telhados verdes e refletores e pavimentos permeáveis, minimizando o estresse térmico (RIBEIRO; SANTOS, 2016).

¹ Disponível em: <https://www.ipcc.ch/event/cities-and-climate-change-science-conference/>
Acesso em 02/03/2020.

Diversos autores propuseram parâmetros urbanos que contribuem para a sustentabilidade urbana e parece haver consenso em relação à forma urbana “compacta” como chave para a sustentabilidade urbana (STONE JR.; RODGERS, 2001; YIN; MIZOKAMI; MARUYAMA, 2013). A forma urbana compacta levanta questões importantes sobre impactos e consequências nos microclimas locais e o que isso significa para a demanda de energia, o conforto térmico, a qualidade do ar e a saúde (EMMANUEL; STEEMERS, 2018).

Um estudo comparativo entre as morfologias urbanas de Londres e Paris, Chatzipoulka e Nikolopoulou (2018) mostraram que o conforto térmico urbano poderia ser maximizado por edifícios mais altos (desde que fossem espaçados). O aumento da altura do edifício parece ter impacto menor no microclima do que o aumento da taxa de ocupação, devido ao importante papel das superfícies com vegetação na moderação do clima urbano (WARD; GRIMMOND, 2017), e também, como mostrado em estudos para Hong Kong, devido à melhoria da ventilação urbana no nível do pedestre afetando não só o conforto, mas também a qualidade do ar (LAU et al., 2018; NG, 2009; NG et al., 2011). Nesse ponto, pode ser apropriado distinguir entre densidade “horizontal” e “vertical” enfatizados por Chatzipoulka e Nikolopoulou (2018).

Estudos feitos em cidades brasileiras também avaliaram o efeito da densidade construída no clima urbano. A elevação no limite de pavimentos combinada à redução na taxa de ocupação do lote permitiria uma melhor distribuição do fluxo de ar em estudos feitos para a orla marítima de Maceió (BITTENCOURT; CRUZ; LOBO, 1997; LIMA; BITTENCOURT, 2017). Uma melhor distribuição no fluxo de ar foi observada em edifícios isolados ou mais espaçados e, assim, aberturas no conjunto arquitetônico foram recomendadas em estudo realizado para a orla marítima de Santos, para auxiliar no escoamento de ar (PRATA, 2005).

Vilela, Assis e Paiva (2006), investigando a relação empírica entre parâmetros climáticos (temperatura e umidade relativa) e parâmetros urbanísticos (massa construída e fator de visão do céu), numa área urbana entre os municípios de Belo Horizonte e Nova Lima, MG, concluíram que o arranjo dos edifícios e a permeabilidade aos ventos seriam fatores mais importante do que o adensamento local para a manutenção de condições climáticas favoráveis e que o fator de visão de céu (FVC) teve influência maior do que a massa construída na correlação com parâmetros climáticos. Já Barbirato, Torres e Barbosa (2015) avaliaram 4 áreas em Maceió, AL, constataram que a geometria urbana tem pouca influência na temperatura do ar (Tar)

para a cidade e que a massa edificada apresenta maior influência na variação da Tar para cidades que apresentam alta umidade no ar.

Em estudos recentes realizados para São Paulo, Pacifici; Rama e Marins, (2019) mostraram que, para a escala local, a morfologia urbana foi responsável pela variação na temperatura do ar, sendo que o tecido urbano com edifícios baixos e mais próximos apresentou maior tendência de aquecimento, se comparado ao tecido com edifícios mais altos e espaçados.

Diretrizes apropriadas para diferentes climas e configurações de densidade são urgentemente necessárias (EMMANUEL; STEEMERS, 2018). O ambiente construído influencia o clima urbano (EMMANUEL, 2005; WONG; CHEN, 2009) e o edifício não pode ser visto como entidade isolada, pois para análises microclimáticas o que importa é a interação entre os edifícios. Considerando a proposta do atual Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo, que incentiva o adensamento construtivo e populacional nas áreas de influência dos elementos estruturais dos sistemas de transporte coletivo de média e alta capacidades (São Paulo – PDE, 2016), uma das questões a ser respondida é qual o impacto da verticalização e dos componentes construtivos e acabamentos das superfícies edificadas nos fenômenos de aquecimento urbano, diurno e noturno.

1.1 Objeto e objetivo

O objeto desta pesquisa é o impacto da verticalização no microclima urbano e nas condições de conforto térmico na escala do pedestre, em função: do arranjo geométrico dos edifícios na quadra considerando a influência do entorno imediato das quadras vizinhas e, do comportamento térmico dos componentes construtivos e dos acabamentos da envoltória dos edifícios, para o município de São Paulo.

O objetivo é quantificar o impacto da verticalização no microclima e nas condições de conforto térmico na escala do pedestre, em função: do arranjo geométrico dos edifícios na quadra considerando a influência do entorno imediato das quadras vizinhas e, do comportamento térmico dos componentes construtivos e dos acabamentos da envoltória dos edifícios, para o município de São Paulo.

1.2 Hipótese

O arranjo geométrico da verticalização, os componentes construtivos e os acabamentos superficiais da envoltória dos edifícios fazem parte da estratégia de

adaptação ao aquecimento urbano; juntos, esses três elementos têm potencial para a mitigação do aquecimento urbano na microescala e para a melhoria das condições de conforto térmico do pedestre.

1.3 Estrutura da tese

O capítulo 1 corresponde à introdução da tese onde está contextualizado o problema a ser respondido pelo trabalho. Ele também apresenta o objeto e o objetivo, a hipótese a ser comprovada e a estrutura da tese.

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura nos seguintes temas: escalas do clima urbano, balanço de energia em áreas urbanas, ilhas de calor e resfriamento urbanas, efeito da geometria edificada no microclima urbano, efeito da materialidade construída no microclima urbano e a relevância da variável temperatura radiante média para os estudos microclimáticos urbano.

O capítulo 3 descreve o contexto urbano, enfatizando o processo de verticalização, e o contexto climático atual, assim como apresenta projeções climáticas futuras para a cidade de São Paulo.

No capítulo 4 são apresentados material e método, incluindo as restrições e recursos do modelo adotado pelo trabalho, as medições de campo, a calibração do modelo entre dados medidos e simulados, assim como a elaboração dos cenários paramétricos a serem estudados.

No capítulo 5 apresenta-se a análise dos resultados e, no capítulo 6, as considerações finais e as conclusões, bem como possíveis caminhos para a continuidade das pesquisas no tema.

2 EFEITOS DA DENSIDADE CONSTRUÍDA NO MICROCLIMA URBANO

As cidades têm grande habilidade de absorver e armazenar calor sensível e de atrasar as suas perdas, mas isso não é o suficiente para explicar diferenças no comportamento térmico entre áreas urbanas e rurais. Três conjuntos de fatores entrelaçados devem ser considerados: propriedades térmicas, disponibilidade de umidade e forma geométrica (OKE et al., 2017).

As cidades afetam a atmosfera por meio da sua materialidade, do tipo de cobertura superficial e da geometria urbana. Materiais podem ser naturais ou construídos; suas propriedades físicas, radiantes e térmicas determinam suas habilidades de absorver, refletir e emitir radiação e de absorver, transferir e reter calor e umidade. A cobertura superficial é constituída da composição de diferentes materiais e pode ser construída, pavimentada ou vegetada. Já a geometria urbana, que é a configuração 3D dos elementos urbanos, é dividida em 2 escalas: a da cidade como um todo, determinando sua rugosidade e albedo, e a dos edifícios e ruas, determinando as trocas radiantes e de fluxo de ar (OKE et al., 2017).

2.1 Escalas do clima urbano

As cidades têm efeito modificador do clima local tanto junto à área construída como na atmosfera sobre ela. A camada mais baixa da atmosfera, mais próxima à cidade é chamada de camada limite urbana (CLU) e sofre impactos da área construída (OKE, 1976). A camada limite urbana é dividida em várias subcamadas (Figura 1). Todo o espaço que compreende a CLU é definido como o volume de ar sobre a cidade que é influenciado por características superficiais e atividades exercidas ali. Geralmente, a CLU se estende a aproximadamente 10 vezes a altura dos edifícios da área urbana. A parte mais alta é chamada de camada de mistura. Nessa camada a atmosfera é influenciada pela presença da área urbana, mas ainda não está totalmente adaptada a ela, ou seja, ainda sofre impacto das áreas não urbanizadas a barlavento. De 4 a 5 vezes a altura média dos edifícios, tem-se a camada limite superficial (CLS) que é condicionada pela geometria 3D dos edifícios e por outros atributos da superfície edificada. Devido à mistura turbulenta de ar, as propriedades dessa camada não são afetadas por elementos urbanos individuais, e sim pela textura urbana como um todo.

A uma altura de pelo menos 2 vezes a média das alturas dos edifícios forma-se a subcamada de rugosidade; essa zona é também conhecida como camada de transição entre a camada de superfície homogênea acima e a própria superfície urbana com composição variada abaixo. Na parte mais baixa da atmosfera urbana está a camada do dossel urbano (CDU), que se estende do nível do chão até a altura dos edifícios (OKE, 1976). Ela é caracterizada por alto nível de heterogeneidade, uma vez que as condições variam muito dentro do volume do dossel.

As proporções do espaço, as propriedades térmicas e radiantes dos seus materiais e a presença de vegetação são todos parâmetros de desenho que modificam o clima nessa escala. Como o desenho urbano pode ter impactos localizados no conforto térmico em espaços abertos e nas cargas térmicas dos edifícios, o microclima dos espaços urbanos é considerado questão arquitetônica (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011).

Figura 1 - Esquema conceitual das escalas do clima urbano.

Fonte: Adaptado de Erell, Pearlmutter e Williamson (2011)

Outra forma de se escalonar as áreas de estudo do clima urbano seria em uma escala horizontal. Segundo Oke et al. (2017), a hierarquia das unidades urbanas em escala horizontal somadas contribuem para formação do clima de uma cidade (Quadro 1).

Quadro 1 - Unidades morfológicas urbanas.

Unidade Urbana	Aspecto Construtivo	Aspectos verdes e água	Fenômeno climático urbano	Escala da extensão horizontal típica	Escala climática
Face	cobertura, parede, rua	folha, gramado, espelho-d'água	sombras, armazenamento de calor, orvalho e padrões de geada.	10 x 10m	micro
Elemento	casas, arranha-céus, depósitos	árvores	efeitos turbulentos, sombreamento	10 x 10m	micro
Cânion ²	rua, cânion	linha de árvores nas vias, jardins, rios, canais	sombreamento nas vias, vórtice do cânion, bioclima do pedestre, clima dos pátios, átrios	30 x 200m	micro
Quadra	quadra urbana (delimitada pelos cânions com pátios interiores), indústrias	parques, bosques, reservatório de água, lagoa	clima de um parque	0,5 x 0,5 km	local
Bairro ou Zona Climática Local	centros urbanos, residenciais, zonas industriais	cinturão verde, florestas, lagos, pântanos	climas locais dos bairros, brisas locais, poluição do ar no distrito	2 x 2km	local
Cidade	áreas construídas	floresta urbana	ilha de calor urbana, domo de fumaça, padrões de efeitos urbanos na umidade, ventos	25 x 25km	meso
Região urbana	cidade mais o interior ao seu redor		nuvens e precipitações anômalas	100 x 100 km	meso

Fonte: Oke et al. (2017) baseado em Oke (1984, 1989).

²unidade geométrica básica estimada por seção transversal bidimensional de edifícios segundo Oke (1988).

Este trabalho abordará questões microclimáticas urbanas, mais precisamente o efeito da geometria edificada, dos componentes construtivos e acabamentos superficiais no microclima, portanto abrangendo a microescala e a camada do dossel urbano. Para isso é importante entender os fenômenos físicos que estão presentes nessa escala. Primeiro será abordado o balanço de energia superficial e depois, mais precisamente, nos cânions urbanos, com foco no balanço de radiação desses cânions urbanos, fenômeno mais relevante à temática deste trabalho.

2.2 Balanço de energia na superfície urbana

O balanço de energia de um volume urbano se torna mais complexo do que de um ambiente rural, pois, além dos balanços de cada face edificada que compõe a cidade, há também a interação entre elas via radiação e convecção o que interfere no conteúdo energético do volume todo (Figura 2). A equação do saldo de radiação urbano pode ser escrita como:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \text{ (Wm}^{-2}\text{)} \quad (1)$$

Onde Q^* é o saldo do fluxo de radiação, Q_F é o fluxo de calor antropogênico, ou seja, gerado por meio de atividades humanas, Q_H é o fluxo de calor sensível (convectivo ou turbulento), Q_E é o fluxo de calor latente, ΔQ_S é o fluxo líquido de calor armazenado no dossel (por todo tecido da cidade, incluindo seus materiais de construção, árvores, solo e ar) e ΔQ_A é a advecção horizontal de calor líquida (energia líquida adicionada ou subtraída por advecção em qualquer lado do volume).

Figura 2 - Esquema do balanço de energia urbano.

Fonte: Adaptado de Erell, Pearlmutter e Williamson (2011).

À primeira vista, a equação de balanço de energia diz muito pouco sobre o microclima urbano. Para entender o que torna o microclima urbano diferente, é importante considerar cada uma das partes de seus componentes em detalhes, buscando identificar aspectos afetados pela presença de edifícios (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011). Assim, será feita uma aproximação na escala do cânion urbano, no que diz respeito ao balanço de energia e, mais especificamente, ao balanço de radiação.

2.2.1 Balanço de energia em cânions urbanos

De forma geral, os cânions urbanos estão presentes em todas as áreas densamente construídas; sua forma geométrica se repete em paisagens urbanas, com variações de orientação, razão altura/largura (A/L) e propriedades térmicas.

A Figura 3 ilustra principais trocas dos fluxos que constituem o balanço de energia de superfície de uma cobertura e das faces de um cânion urbano durante o dia e durante a noite. Durante o dia, a irradiação solar comanda em grande parte o balanço de energia do cânion. As coberturas estão totalmente expostas à radiação, mas pouco do saldo de radiação é armazenado (Q_G – densidade de fluxo de calor armazenado), devido ao baixo valor da admitância térmica³ da maioria dos materiais

³ Ver item: 2.5.1.2. Propriedades Térmicas.

da cobertura. Em vez disso, a maior parte do saldo de radiação é transportado por convecção da superfície da cobertura mais aquecida para o ar mais frio como fluxo de calor sensível (Q_H) e esse calor é facilmente dispersado na atmosfera por turbulência. Já a irradiação solar nas superfícies dentro do cânion é mais restrita e depende dos padrões de sombreamento que são governados pela geometria da insolação, pela orientação do cânion e pela relação A/L. Dentro do cânion, as múltiplas reflexões entre as suas faces aumentam a absorção total da radiação de onda curta e longa. Por causa dos relativos altos valores de admitância térmica das paredes e pisos, o cânion recebe e armazena bastante calor ao longo do dia, apresentando alto fluxo de calor armazenado (Q_G). Isso quer dizer que suas temperaturas superficiais são muito mais frias do que as da superfície da cobertura. Além disso, como elas estão relativamente sombreadas, os fluxos de calor sensível (Q_H) emitidos por essas faces não são tão altos.

À noite, as coberturas se resfriam com mais rapidez, eliminando boa parte do seu estoque de calor diurno. Sua superfície relativamente mais fria cria uma inversão em microescala no nível da cobertura. Em condições de calmaria, em intervalos irregulares, parte dessa camada de ar frio na cobertura pode drenar, por gravidade, para as ruas adjacentes. Isso solapa o ar mais quente do cânion, fazendo com que ele seja expelido para fora do topo do cânion. Já dentro do cânion, enquanto o saldo de onda longa (L^*) ainda é negativo, o resfriamento é mais lento do que no nível da cobertura, devido ao reduzido fator de visão do céu (FVC) e ao calor armazenado, a ser dissipado, ser maior. A intensidade do resfriamento é controlada pelas temperaturas nas faces do cânion; pela relação A/L, que define o fator de visão do céu e quais outras superfícies do cânion podem ser "vistas"; pela emissividade das superfícies e pela temperatura de fundo de céu (principalmente controlada pela cobertura de nuvens).

Figura 3 - Representação esquemática dos principais fluxos de energia que compreendem o balanço de energia superficial das coberturas e das faces de um cânion.

Fonte: Adaptado de Oke et al. (2017).

2.2.2 Balanço de radiação no cânion urbano

O balanço de radiação em qualquer superfície é descrito como:

$$Q^* = K^* + L^* = K_i - K_r + L_i - L_r \quad (Wm^{-2}) \quad (2)$$

Onde Q^* , K^* e L^* são, respectivamente, os saldos de densidade de fluxo de toda a radiação, da radiação de onda curta e da radiação de onda longa. As setas indicam se os fluxos estão chegando ou saindo da superfície. A Figura 4 ilustra os efeitos da geometria da superfície urbana na penetração, absorção e reflexão da radiação solar, e na emissão da radiação de onda longa.

Figura 4 - Efeitos da geometria urbana no balanço de radiação.

Fonte: Adaptado de Erell, Pearlmutter e Williamson (2011).

Existem três atributos da superfície urbana que a distinguem de uma superfície plana e homogênea simples. Em primeiro lugar, a grande diversidade de seus materiais constituintes com suas refletâncias e emissividades distintas; em segundo lugar, a sua estrutura em três dimensões (3D) possui inúmeras facetas, cada uma com inclinação e aspectos únicos e, em terceiro lugar, a possibilidade de que as faces

possam emitir ou refletir radiação umas às outras ou bloquear tais trocas (OKE et al., 2017).

2.2.2.1 Princípios da troca de radiação de onda curta

A Figura 5 mostra os efeitos da geometria urbana na radiação que atinge um cânion urbano. Inicialmente, uma face recebe irradiação direta, uma parte da qual é refletida. Essa radiação se espalha de maneira difusa: algumas saem do cânion e outras são interceptadas pela parede oposta e pelo piso do cânion. Essas superfícies receptoras também absorvem e refletem radiação. Após a segunda reflexão, cada unidade trocou radiação com todas as outras unidades dentro do cânion. Esse processo de reflexão múltipla é repetido *ad infinitum* com progressivamente menos energia sendo trocada, porque cada unidade absorve uma parte da radiação que recebe.

Figura 5 - Impacto da geometria do cânion urbano nas trocas radiantes.

(a) recebimento da irradiância direta através do topo do cânion, (b) a primeira reflexão nas faces do cânion e (c), a segunda reflexão. A entrada e a reflexão da radiação difusa do céu não são descritas neste exemplo. Fonte: Oke et al. (2017).

O recebimento de radiação de onda curta direta por uma face (i) pode ser descrito por:

$$K_{\downarrow i} = S_i + D_{sky_i} + D_{env_i} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (3)$$

Onde $K_{\downarrow i}$ é total de radiação de onda curta recebida por uma face, S_i é o feixe de radiação de onda curta incidente, D_{sky_i} radiação difusa incidente vinda do céu e D_{env_i} a radiação difusa incidente vinda do ambiente urbano circundante. Se a unidade

está na sombra, então ($S_{1i} = 0$) e K_{1i} consiste apenas da radiação difusa que se origina do céu (D_{sky_i}) e das refletidas pelo ambiente urbano circundante (D_{env_i}). Para um céu isotrópico, isto é, com as mesmas propriedades físicas em todas as direções, a irradiação difusa do céu na face é:

$$D_{sky_i} = D_{sky_e} \psi_{i \rightarrow sky} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (4)$$

Onde $\psi_{i \rightarrow sky}$ é o fator de visão do céu para aquela face. D_{sky_i} é menor dentro de um cânion comparado com aquele recebido em uma face horizontal com uma visão do céu desobstruída D_{sky_e} ; essa redução é devida à obstrução gerada pelos edifícios. A Figura 6 mostra a variação do $\psi_{i \rightarrow sky}$ em função da posição dentro do cânion; é menor na base do cânion e perto das paredes laterais.

Figura 6 - Fatores de visão de céu em um cânion com relação A/L = 1.0.

Fatores de visão de céu (ψ) da Parede 1 e do Piso, para as outras faces e para o céu, são mostrados. A cobertura tem o fator de visão do céu de uma superfície horizontal com um horizonte desobstruído.

Fonte: Adaptado de Oke et al. (2017).

A contribuição urbana para radiação difusa de onda curta (D_{env_i}) é a integral de todos os eventos de reflexão que incidem sobre a face, descrito por:

$$D_{env_i} = K_{\uparrow env} \psi_{i \rightarrow env} (W m^{-2}) \quad (5)$$

Portanto, a irradiação difusa interceptada é igual à radiação de onda curta refletida pelas superfícies no ambiente circundante multiplicada pelo fator de visão do ambiente correspondente para aquela unidade de face ($\psi_{i \rightarrow env}$). A geometria complexa dentro da camada limite urbana (CLU) leva a uma distribuição heterogênea da radiação difusa. Assim, as faces urbanas são divididas em unidades menores ou fragmentos (j) para determinar suas contribuições individuais. O total de D_{env_i} recebido no fragmento (k) deve incluir as contribuições de reflexão de todos os outros fragmentos para os quais o fator de visão $\psi_{k \rightarrow j} > 0$,

$$D_{env_k} = \sum_{j=1}^{N-1} K_{\uparrow j} \psi_{k \rightarrow j} (W m^{-2}) \quad (6)$$

Esse cálculo deve ser executado para cada um dos N fragmentos que compõem as faces do cânion. No entanto, D_{env_k} depende de $K_{\uparrow k}$ em todas as outras unidades dentro do cânion, cada uma das quais também inclui D_{env} (equação acima). Portanto, esses cálculos devem ser realizados repetidamente para considerar os múltiplos eventos de reflexão, cada um deles contribuindo progressivamente em menor magnitude do que o evento anterior.

2.2.2.2 Princípios da troca de radiação de onda longa

O particionamento da radiação de onda longa que entra na CLU é análogo ao caso de ondas curtas,

$$L_{\downarrow i} = L_{\downarrow sky_0} \psi_{i \rightarrow sky} + \sum_{j=1}^N (L_{\uparrow j} \psi_{i \rightarrow j}) \quad (W m^{-2}) \quad (7)$$

onde, L_{1i} é composta da radiação de onda longa vinda da porção do hemisfério do céu "visto" ($\alpha(\Psi_1(i \rightarrow sky))$) que, semelhante à radiação de onda curta difusa que vem do céu ($D_1(\llbracket sky \rrbracket, 0)$), é reduzido devido à obstrução dos edifícios e do ambiente circundante (L_{1j}), incluindo emissão (e alguma reflexão) das faces vizinhas. Em superfícies sólidas quase todas as intercepções de L_1 são absorvidas, apenas uma pequena proporção é refletida ($1 - \varepsilon_j$). A porção absorvida provoca incremento no aquecimento da superfície, que afeta a emissão de ondas longas (L_{1j}) e, portanto, L_{1i} em todos os pontos em seu campo de visão, ou seja, o comportamento de todas as faces é mutuamente dependente. O fluxo de ondas longas aumentado é uma forma de aprisionamento de calor do cânion (OKE et al., 2017).

Nas faces de um cânion com pequeno FVC, a proporção de L_{1i} que escapa do cânion, ao invés de ser interceptado e absorvido por outras faces, é pequena. Reciprocamente, a fração da radiação recebida que vem do céu "frio" é proporcionalmente pequena, a maior parte do ganho deriva de faces relativamente mais quentes. Em um cânion, os pontos com os mais baixos valores de FVC estão perto da base das paredes, maiores valores estão no meio da via e perto do topo das paredes. Assim, o resfriamento é menor no fundo de um cânion perto da junção das paredes e do chão e em cânions mais profundos e estreitos, se comparados às áreas mais abertas e maiores, como nas coberturas (OKE et al., 2017).

A Figura 7 ilustra uma média dos fatores de visão nos cânions mostrando como eles variam com a relação A/L. Ela mostra os valores médios do FVC das faces, não apenas a partir do piso do cânion para o céu, mas também de qualquer parede para o céu, do piso para uma das paredes e das paredes do cânion, entre si. Quando A/L = 1 o valor do fator de visão de céu do piso para o céu ($\psi_{floor \rightarrow sky}$) é igual a 0,4, assim como o FVC de uma parede para outra ($\alpha(\Psi_1(wall \rightarrow wall))$) e o FVC do piso para a parede ($\alpha(\Psi_1(floor \rightarrow wall))$) é igual a 0,3 (e vice-versa); dessa forma, o fator de visão de céu a partir do piso é obstruído principalmente pelas paredes do cânion. Como consequência, 60% da radiação emitida pelo solo é interceptada pelo próprio cânion, a maior parte do qual é absorvida e, subsequentemente, reemitida para outras superfícies do cânion (OKE et al., 2017).

Figura 7 - Média do fator de visão das faces de um cânion.

Fonte: Oke et al. (2017) baseado em Harman, Best e Belcher (2004).

2.2.2.3 Padrões das trocas de radiação em um cânion urbano

A Figura 8 mostra os resultados de uma simulação de trocas de radiação em um cânion simétrico (caso base $A/L = 1$). Os cálculos são realizados em vários pontos para amostrar cada face, mas os resultados são apresentados como médias para todas as faces. Os experimentos foram conduzidos em ruas orientadas norte-sul (N-S) e leste-oeste (L-O) para uma dada latitude e período do ano (OKE et al., 2017).

Figura 8 - Cursos diários dos fluxos de radiação.

Cursos diários (a) ganho de ondas curtas, (b) ganho de ondas longas, (c) perdas de ondas longas e (d) fluxos de radiação líquidos em um cânion urbano orientado para N-S e L-O. Paredes são identificadas pela direção para a qual a face está voltada. Os resultados são médios das faces do modelo TUF-3D. Fonte: Oke et al. (2017).

O padrão de recebimento de radiação de ondas curtas nas faces do cânion assemelha-se àquela nas faces correspondentes de um edifício isolado; as diferenças são principalmente devidas ao sombreamento e ao aprisionamento de calor no cânion. No cânion N-S, o dia solar para a parede L começa aproximadamente ao mesmo tempo em que o do edifício isolado e o ângulo de incidência favorável produzem aumento rápido no ganho de calor. No entanto, o ganho médio é menor porque a parte inferior da parede é sombreada pelo prédio oposto, portanto, recebe apenas radiação difusa de ondas curtas. Em direção ao meio-dia solar, o azimuth do sol se alinha com

o eixo da rua e a parede L torna-se cada vez menos favorável ao recebimento de radiação. Depois do meio-dia, a parede L fica com sombreamento completo e, a partir de então, recebe apenas a irradiação difusa de ondas curtas do céu ou aquela refletida de outras faces do cânion. Há uma pequena elevação no período da tarde devido à reflexão da parede O que é em grande parte iluminada pelo sol daquele horário. De fato, o padrão diário para a parede O é a imagem espelhada daquela para a parede L, e a elevação na radiação difusa na parede L corresponde ao tempo de iluminação máxima da parede O. O piso de um cânion N-S tem uma insolação diária de curta duração: com picos no meio-dia solar e algumas elevações com ganho de radiação difusa na parte da manhã e da tarde (OKE et al., 2017).

A irradiação solar nas faces da rua L-O exibe padrão simétrico simples centrado no meio-dia solar. O ganho para as paredes S e N é muito parecido com o de suas contrapartes em um prédio isolado; as diferenças se devem ao sombreamento do cânion, que é maior perto do nascer e do pôr do sol, mas continua durante o dia para as partes inferiores da parede S e sobre a maior parte da parede N. O padrão exato é definido pela relação A/L e pela latitude. O raio solar ilumina brevemente o piso do cânion L-O no início da manhã e no final da tarde, mas apenas passa pelas paredes. Depois disso, para o feixe alcançar o piso durante o dia, ele dependerá do ângulo do feixe e da relação A/L (OKE et al., 2017).

Nas cidades, essas trocas são complicadas pela inerente variabilidade de altura dos edifícios, orientação da via, albedo das superfícies, presença de árvores, além dos beirais do telhado, varandas e assim por diante (OKE et al., 2017).

Ao longo de um dia, as faces dos telhados recebem menos radiação de onda longa porque elas não "enxergam" outras faces quentes, apenas um céu muito mais frio. Das faces do cânion, o piso recebe menos radiação de onda longa incidente ($L_{\downarrow}$) porque sua visão do céu é maior. Durante o dia, a variação de $L_{\downarrow}$ é maior dentro do cânion do que na cobertura, devido à maior gama de temperaturas nas faces em comparação com o céu. Note também que $L_{\downarrow}$ nas paredes O e L no cânion N-S invertem suas posições relativas entre a manhã e à tarde, em resposta à mudança na temperatura de superfície da parede oposta causada pela mudança temporal de irradiação e padrões de sombra. À noite $L_{\downarrow}$ para cada face é inversamente relacionado ao seu valor de FVC.

Durante o dia, absorção da radiação de ondas curtas pelas faces do cânion controla temperatura na superfície e radiação de onda longa emitida L_t . A face mais diretamente irradiada pelo sol gera mais L_t e recebe a menor quantidade de volta de outras faces, portanto, experimenta maior perda líquida de ondas longas (L^*).

O curso diário do fluxo de radiação líquido (Q^*) nas faces das paredes e do piso do cânion versus o da cobertura mostra o efeito da geometria do cânion. A cobertura experimenta o maior ganho ao longo do dia porque é a face mais exposta à radiação solar direta e à visão do céu. As faces do cânion, por outro lado, experimentam efeitos intermediários da interceptação do feixe, sombreamento e reflexão entre faces em onda curta e absorção-reemissão e visão do céu na onda longa.

Para simular os efeitos da geometria do cânion no balanço de radiação, quatro configurações do modelo *Temperatures of Urban Facets in 3-D* (TUF-3D) foram testadas por Oke et al. (2017), correspondendo aos cânions com $A/L = 0.5, 1.0, 2.0$ e 4.0 (Figura 9). Como K e L no topo da CLU são fixos, qualquer diferença Q^* é resultado dos materiais e superfícies do cânion e/ou geometria (relação A/L), que controlam K e L . Durante o dia, o efeito da geometria é a diminuição do albedo (K^* é aumentado) devido à reflexão múltipla e maior coeficiente de superfície (λ_c), e também bem redução da temperatura média da superfície do cânion (L^* é aumentado), devido ao sombreamento. Q^* no topo do cânion é, portanto, positivo durante o dia devido ao aprisionamento de calor no cânion e o efeito aumenta com a relação A/L (até 28% em $A/L = 4$).

Figura 9 - Efeito da relação A/L na radiação líquida (Q^* , L^*) na CLU.

System	Urban form	Daytime		Night		Daily	
		Q^* canyon top	L^* canyon top	L^* canyon floor	L^* system	Q^* canyon top	Q^* system
Flat surface		13.3	-1.6	-1.6	-1.6	11.7	
Canyon, $H/W = 0.5$, $\lambda_b = 0.33$		14.8 (+11%)	-2.5 (+56%)	-1.4 (-13%)	-2.0 (+25%)	12.3 (+5%)	12.0 (+3%)
Canyon, $H/W = 1$, $\lambda_b = 0.5$		15.9 (+20%)	-2.6 (+63%)	-1.0 (-38%)	-2.1 (+31%)	13.2 (+13%)	12.5 (+7%)
Canyon, $H/W = 2$, $\lambda_b = 0.66$		16.5 (+24%)	-2.7 (+69%)	-0.5 (-69%)	-2.1 (+31%)	13.8 (+18%)	12.8 (+9%)
Canyon, $H/W = 4$, $\lambda_b = 0.8$		17.0 (+28%)	-2.8 (+75%)	-0.2 (-88%)	-2.2 (+38%)	14.2 (+21%)	13.0 (+11%)

Totais de energia em $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$, as porcentagens são as diferenças referentes a uma superfície plana.

Fonte: Oke et al. (2017).

À noite, o menor fator de visão do céu (ψ_{sky}) dentro do cânion aumenta L e reduz a perda de radiação de ondas longas das faces do cânion. A diminuição do L noturno retarda o resfriamento da superfície; portanto, as temperaturas das faces do cânion permanecem mais quentes. A diferença entre L^* do cânion como um todo e da cobertura é ainda maior, devido ao calor armazenado dentro do cânion, embora o efeito da relação A/L seja relativamente pequeno. No entanto, a diferença entre L^* do piso e L^* da cobertura se dá de forma inversa: a perda no piso é consideravelmente menor devido à reduzida visão do céu.

Visto de cima do dossel, a área plana no topo da CLU é composta pelas coberturas e pelas áreas superiores do cânion. Embora o aumento da relação A/L altere Q^* no topo do cânion, ele também reduz a proporção da superfície do CLU ocupada pelo topo do cânion e aumenta a superfície ocupada por coberturas. Em outras palavras, Q^* no topo da CLU é dominado pelo sinal da cobertura, devido à sua maior área de superfície. Isso é especialmente verdade em áreas com grande relação A/L .

2.3 Ilhas de calor e de resfriamento urbanas

2.3.1 Ilha de calor urbana

Como definido inicialmente por Oke (1973), ilha de calor é o fenômeno pelo qual a *T_a* nas áreas urbanas está mais alta do que nas áreas rurais no seu entorno. Isso acontece em decorrência da mudança causada pela ocupação humana no balanço de energia desta mesma área antes de se urbanizar e está relacionado com: diferentes materiais que compõe as duas áreas (rural e urbana), a densidade e a geometria do arranjo urbano ao calor antropogênico provenientes dos edifícios, bem como dos motores dos veículos e também a poluição do ar (OKE, 1982).

Mais recentemente, o fenômeno é entendido em suas diversas manifestações, sendo classificado em quatro subtipos: Ilha de calor urbana do subsolo - *Subsurface Urban Heat Island* (UHI Sub), Ilha de calor urbana de superfície - *Surface Urban Heat Island* (UHI Surf), Ilha de Calor do Dossel Urbano - *Canopy Layer Urban Heat Island* (UHI UCL) e Ilha de Calor Urbana da Camada Limite - *Boundary Layer Urban Heat Island* (UHI UBL). Cada um corresponde a uma escala diferente, é causado por diferentes processos que requerem monitoramentos diferentes. As Ilhas de calor urbanas do subsolo, da camada limite e do dossel são predominantemente em escala local, sendo que a última também atinge a mesoescala, a ilha de calor urbana de superfície é a única que atinge a microescala. Sendo assim, hoje se pode afirmar que o fenômeno ilha de calor não é um fenômeno único e sim um conjunto de fenômenos, o que torna o estudo de suas causas e formas de controlá-la complexo (OKE et al., 2017).

Este trabalho irá abordar os fenômenos relativos à geometria e materialidade das edificações para áreas urbanas já adensadas; assim, ao não tratar de calor antropogênico, nem de poluição do ar, não focará no fenômeno ilha de calor urbana como um todo, mas sim nos efeitos de duas de suas muitas causas, a forma urbana e as propriedades dos materiais urbanos e seus efeitos no microclima. Mesmo com um dos fenômenos, a ilha de calor urbana de superfície, chegando à microescala, quando se tem áreas muito verticalizadas, alguns fenômenos intraurbanos, propiciados pelo sombreamento mútuo dos edifícios, não são condizentes com o fenômeno ilha de calor urbana de superfície, pois geralmente acontece um resfriamento dessas superfícies e não um aquecimento, esse assunto será abordado no próximo tópico.

2.3.2 Ilha de resfriamento urbana

Em áreas urbanas com alta densidade construída observa-se uma inversão no fenômeno ilha de calor na camada do dossel (UHI UCL) durante o dia, causada pela redução da radiação solar nos cânions urbanos devido à forma urbana compacta (ERELL; WILLIAMSON, 2007; JOHANSSON, 2006). Esse fenômeno é chamado de Ilha de Resfriamento Urbano (UCI-Urban Cool Island) (YANG et al., 2017) e mostra que, dependendo do arranjo geométrico, as edificações podem contribuir para o resfriamento diurno das áreas densamente construídas.

Oke (1982) observou que a ausência de um pico no aquecimento, como o que ocorre no campo, provavelmente se deve, dentre outros fatores, aos efeitos combinados do sombreamento do cânion e da maior admitância térmica dos materiais de superfície; e que a existência de uma "ilha fria" no meio do dia geralmente é atribuída ao sombreamento do cânion na área mais verticalizada das cidades.

Embora haja evidência empírica indicando que ilhas de resfriamento urbanas diurnas se formam regularmente, o fenômeno recebeu muito menos atenção do que a ilha de calor noturna. Uma das razões pode ser porque as ilhas de resfriamento diurno, onde ocorrem, são tipicamente mais fracas do que as ilhas de calor noturno, ou ainda podem ser mascaradas pelo calor antropogênico liberado, por exemplo, pelos sistemas de ar condicionado. Além disso, é mais difícil obter leituras de temperatura suficientemente precisas durante o dia: a exposição à luz do sol entre diferentes locais pode produzir erro de medição da mesma ordem de magnitude que as diferenças de temperatura registradas. Os mecanismos responsáveis pela evolução das ilhas de resfriamento diurnas são, portanto, pouco compreendidos (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011).

Em áreas densamente construídas, grande parte da radiação solar é interceptada por elementos construtivos. A superfície do solo e as partes inferiores das paredes adjacentes podem permanecer na sombra durante grande parte do dia, de modo que sua exposição solar é limitada à radiação difusa da abóbada e à radiação refletida de outras superfícies da parede – que também pode ser mínima se essas superfícies tiverem baixo albedo. Pode-se esperar que o ar ao nível do piso absorver pouco calor do solo sombreado e, se a ventilação for fraca, esse ar pode, na verdade, permanecer mais frio do que em espaços com maior exposição solar.

Deve ser lembrado, no entanto, que a radiação incidente nas paredes dos edifícios, mesmo a uma altura considerável acima do solo, não é removida do sistema.

A porção refletida é redistribuída entre as outras faces urbanas, de modo que o aumento médio na temperatura da superfície pode ser pequeno, mas a área de absorção é maior. Grande parte da radiação é absorvida nas paredes e transmitida através das janelas, aquecendo o edifício e amplificando potencialmente o calor residual gerado pelo ar condicionado. Dependendo da capacidade térmica dos materiais dos edifícios e da inércia, bem como a circulação do ar, grande parte da energia absorvida pode ser reirradiada ou transferida por convecção para o espaço urbano à noite, amplificando a ilha de calor noturna.

Assim, a ilha de resfriamento diurna, como ocorre nesse cenário, é uma redistribuição de calor no espaço e no tempo. Essa redistribuição pode ser benéfica em climas quentes e secos com grandes flutuações de temperatura, na medida em que o estresse por calor ao ar livre é intenso durante o dia e, dependendo das condições climáticas, não se torna um problema à noite. Em regiões mais úmidas, no entanto, esse não é o caso (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011).

De acordo com Erell, Pearlmutter e Williamson (2011), dentre os fatores que afetam a intensidade da ilha de resfriamento urbana estão:

a) latitude geográfica: como a interceptação da radiação solar direta pelos edifícios depende da orientação, da relação A/L do cânion e da posição solar relativa, mesmo os cânions bastante rasos podem ser sombreados por edifícios adjacentes se a altitude solar for baixa. Portanto, as ilhas de resfriamento urbanas diurnas podem ter maior probabilidade de ocorrer em locais de alta latitude do que nos trópicos.

b) geometria e características das superfícies dos cânions: a geometria urbana tem efeito tanto na troca radiante como no armazenamento de energia, bem como na interação complexa entre eles. A radiação solar é absorvida por uma área de superfície muito maior nos cânions, em comparação com os locais planos abertos. Uma superfície plana e desobstruída que é exposta à radiação solar direta continuamente ao longo do dia pode experimentar aumento substancial na temperatura. Em um cânion, por outro lado, as faces individuais são expostas à radiação solar direta em sequência, cada uma por apenas algumas horas do dia. Isso resulta em redução da insolação por unidade de área de cada superfície do cânion, especialmente se o cânion for profundo em relação à sua largura. Embora um cânion possa absorver mais radiação solar do que um local plano desobstruído devido às múltiplas reflexões entre superfícies do cânion, a absorção em uma área maior permite que a massa térmica modere temperaturas extremas de superfície e reduza picos de

fluxo de calor sensível. A maior absorção global da radiação solar pode, no entanto, ser refletida em uma temperatura média do ar mais alta no cânion durante o dia. A liberação desse excesso de calor é tipicamente evidenciada à noite: a perda radiante de onda longa é inibida pelo pequeno fator de visão do céu, assim - diferente do solo plano exposto - superfícies do cânion podem permanecer mais quentes do que o ar, resultando em um pequeno fluxo de calor sensível positivo a noite toda.

c) armazenamento de calor: o efeito da massa térmica urbana na Tar pode ser visto como sendo análogo ao efeito da massa térmica nas temperaturas interiores dos edifícios: independentemente de outros fatores, seria de esperar que a amplitude diária da Tar urbana fosse reduzida em comparação com o ambiente circundante e que as temperaturas mínimas e máximas tivessem um atraso até certo ponto. O efeito de inércia da massa térmica urbana nas temperaturas do ar pode ser atribuído aos efeitos da morfologia urbana na troca radiante, bem como aos efeitos da massa térmica. O fato da relação ser fortemente linear e não apresentar dependência sazonal, como seria de se esperar com efeitos da radiação solar, favorece a última explicação. O papel dominante da massa térmica também é consistente com o intervalo de tempo observado entre o pico da carga radiante líquida na superfície (cerca do meio-dia) e a intensidade máxima da ilha de resfriamento urbano que tipicamente ocorre duas a três horas depois. Nesta visão, a ilha de resfriamento diurna e a ilha de calor noturna são, em certa medida, fenômenos relacionados.

2.4 Efeito da geometria edificada no microclima urbano

A geometria edificada, sua orientação com relação ao sol e ao céu e suas propriedades radiantes são importantes para entender as trocas de radiação urbanas. Administrar essas trocas por meio dos edifícios e do tratamento da paisagem é uma das ferramentas importantes para arquitetos, urbanistas e paisagistas para controlar o microclima urbano (OKE et al., 2017).

Existe, portanto, necessidade de se entender como a morfologia urbana afeta o clima urbano e traduzir os achados científicos sobre fenômenos climáticos urbanos na prática do projeto (XU et al., 2017). Ratti, Raydan e Steemers (2003) reiteram que não existe solução única, nem geometria universalmente ótima, pois cada contexto climático e objetivo de projeto terão uma ou mais geometrias adequadas.

A complexa característica formal tridimensional das cidades beneficia o acúmulo de calor de duas formas: uma por aumentar a superfície para troca de

energia, comparada às superfícies rurais, e outra por aumentar a obstrução ao vento e diminuir a perda de calor sensível por transporte turbulento. Em centros urbanos o impacto das superfícies construídas pode ser 2 a 3 vezes maior do que das superfícies planas; esse impacto energético é explicado pelo aprisionamento de radiação no cânion, pelo efeito geométrico na radiação de onda curta via múltiplas reflexões entre as faces do cânion, e pela redução da perda de ondas longas pela ocultação de porções do céu resfriado (OKE et al., 2017).

A urbanização modifica o ambiente local (GIRIDHARAN; LAU; GANESAN, 2005). A forma urbana tem papel importante no fenômeno de ilha de calor (ARNFIELD, 2003; UNGER, 2004) e no microclima urbano (HE et al., 2015). Espaços urbanos abertos são amplamente afetados pelo desenho do ambiente construído (HOLST; MAYER, 2010; LEE; HOLST; MAYER, 2013; LIN; HO; HUANG, 2007; LINDBERG, 2007; RATTI; RICHENS, 2004) e pelas coberturas do solo (JOHANSSON, 2006).

A densidade construída é dada pelo volume construído, assim um mesmo valor de densidade construída pode apresentar diferentes desenhos urbanos (GUSSON; DUARTE, 2016).

O uso do volume construído para sombrear a área entre edifícios (conceito de *shadow umbrella*) é uma das maneiras de, por meio do desenho urbano, diminuir o ganho de calor nas cidades tropicais (EMMANUEL, 1993;2005). Um estudo anterior desenvolvido para São Paulo, SP, com arranjos urbanos compostos por três tipologias distintas de edifícios na quadra, mostrou que a tipologia torre apresentou menor Tar a 1,5m do solo em relação à tipologia de bloco perimetral e edifícios lâmina, devido a um maior sombreamento mútuo entre os edifícios torre durante o dia e, com isso, menor ganho de calor (GUSSON; DUARTE, 2016).

Outro estudo feito em ambiente urbano ainda mais denso, em Shangai (China), mostrou a ocorrência de extremos de calor na tipologia perimetral, com a presença de pátios fechados, rodeados por edifícios de baixa altura, principalmente devido à falta de sombreamento, maior exposição ao sol e à proximidade entre as paredes (CHEN et al., 2016).

Resultados medidos e simulados com o modelo ENVI-met para a cidade Putrajaya (Malásia) também indicaram que o ambiente ao longo do *boulevard* com edifícios altos é mais ameno do ponto de vista microclimático do que a área de edifícios residenciais com baixa altura no subúrbio (QAID et al., 2016).

O desenho urbano também influencia ventilação de áreas adensadas, bloqueando ou canalizando ventos, aumentando ou diminuindo sua velocidade. Para isso, edifícios com diferentes alturas, aberturas ao longo da altura, abertura entre pódios e nos próprios pódios e implantações não alinhadas contribuem para ventilação urbana e melhoria da sensação térmica em países tropicais (NG, 2016).

2.4.1 Quantificação da geometria edificada para estudos microclimáticos

Para estudos microclimáticos urbanos é necessário descrever a geometria urbana de forma quantitativa, mesmo sendo algo complexo. Uma das formas de quantificar a geometria urbana é pela razão altura/largura (A/L), essa proporção é mais utilizada nos modelos de *cânions* urbanos, em 2D; outra forma de descrição também para cânions é a orientação do eixo da via, sempre em sentido horário, a partir do Norte, e uma terceira forma seria o fator de visão de céu (FVC), que é definido pela proporção entre área de céu obstruída e área total da abóbada celeste visível. O fator de visão de céu é mais utilizado em geometrias urbanas heterogêneas (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011), como acontece na cidade de São Paulo.

A relação altura/largura (A/L) pode ser um bom descritor da densidade e geometria de cidades tradicionais onde edifícios históricos estão preservados e ocupam quadras de forma perimetral, mas pode ser difícil de aplicar nas cidades emergentes asiáticas (YANG; QIAN; LAU, 2013b), por exemplo. Apesar disso, alguns estudos têm utilizado a relação A/L como fator físico para controle da ilha de calor, melhora do microclima urbano e do conforto térmico dos espaços abertos (QAID; OSSEN, 2015), tais como nos estudos de ganho e perda de radiação e ventilação urbana (JOHANSSON, 2006; MARCIOTTO; OLIVEIRA; HANNA, 2010; XI et al., 2012), bem como no efeito da Tar e de superfície (ANDREOU; AXARLI, 2012; BOURBIA; AWBI, 2004; BOURBIA; BOUCHERIBA, 2010; JOHANSSON; EMMANUEL, 2006).

Segundo Oke et al. (2017), alguns parâmetros usados para descrever a geometria urbana e suas proporções são:

- fração da área plana edificada (*building plan area fraction - λ_p*): proporção entre a área ocupada por um elemento construído sobre a área total do plano, ou seja, taxa de ocupação (TO);
- relação altura/largura (A/L): utilizada para descrever cânions urbanos, a partir de um corte em 2 dimensões, pela proporção A/L , onde A é a altura do edifício

e L a largura das vias. É importante em vários aspectos do clima urbano incluindo acesso solar, sombreamento, aprisionamento da radiação e conforto térmico;

- fração da área dos pavimentos (*floor space ratio* - λ_{floor}): proporção entre a área de todos os pavimentos edificados sobre a área total onde estão contidos, em outras palavras, coeficiente de aproveitamento (CA);
- coeficiente de superfícies (*complete aspect ratio* - λ_c): área total ocupada pelas superfícies edificadas, tanto na horizontal como na vertical, incluindo o piso, sobre a área total plana onde estes estão inseridos. Ele é importante, pois altera a área em que a radiação é absorvida, refletida e emitida;

A característica complexa da geometria urbana aumenta o coeficiente de superfícies que, por sua vez, favorece o armazenamento de calor urbano em dois modos: primeiro, ao aumentar a área da superfície para trocas energéticas, comparada com uma superfície plana, o que faz com que haja múltiplas reflexões da radiação de onda curta e redução da perda de radiação de onda longa, aumentando a absorção de calor se comparado a uma superfície plana; segundo, maior coeficiente de superfície significa aumento das barreiras ao vento e diminuição da perda de calor sensível por transporte turbulento (OKE et al., 2017).

- índice de área frontal (IAF – *frontal aspect ratio* - λ_f): soma de todas as superfícies a barlavento sobre a área plana total em que estão inseridas. É utilizado para estudos de ventilação;
- fator de visão de céu (FVC – *sky view fator* - Ψ_{sky}): medida tridimensional para um único ponto em uma superfície. É definido pela fração do fluxo de radiação que sai da superfície a partir deste ponto e que chega à atmosfera (JOHNSON; WATSON, 1984). É importante para cálculo de radiação, acesso solar e resfriamento noturno de cânions urbanos. Para calcular o FVC se considera a geometria esférica, ângulos sólidos não planos e a orientação da superfície (JOHNSON; WATSON, 1984). O FVC diminui com o aumento da relação A/L (Figura 10).

Figura 10 - Fator de visão do céu.

(a) Visão esquemática de cânion urbano simétrico e seus descritores geométricos e (b) Fator de visão do céu (FVC) em função da relação A/L . Fonte: Adaptado de Errell; Pearlmutter; Williamson (2011).

Outros parâmetros também usados na descrição da geometria urbana para estudos climáticos incluem, segundo Ng, Ren e Katzschner (2015) e Ren, Ng e Katzschner (2011):

- densidade do volume construído (DVC): volume edificado para uma área, corresponde à área edificada multiplicada pela altura edificada;
- rugosidade (RL): maior ou menor fricção entre superfícies urbanas e ventos que a atravessam, sendo usada em estudos sobre ventilação urbana.

A seguir será aprofundada a teoria sobre os parâmetros mais utilizados atualmente em estudos microclimáticos que analisam a geometria e as superfícies edificadas: relação altura/largura (A/L), fator de visão de céu (FVC) e orientação das vias.

2.4.2 Efeito da relação altura/largura (A/L) no microclima urbano

Um dos parâmetros de determinação da geometria dos cânions é a relação altura/largura, que é definido pela razão entre a altura média das paredes dos edifícios voltadas para o cânion (do inglês *height* - H) e a largura do cânion (do inglês *width* - W) (OKE, 1988). Um cânion é considerado uniforme se tem relação A/L igual a 1, pouco profundo se relação A/L abaixo de 0,5, e profundo se possui relação A/L maior ou igual a 2 (AHMAD et al., 2005).

O primeiro estudo climático relativo à relação A/L foi conduzido por Oke (1988). Arnfield (1990) argumentou que o conceito relação altura / largura estava relacionado

ao acesso solar sazonal. Os índices de A/L nesses dois estudos apenas investigaram ruas simétricas onde a altura dos edifícios em relação à largura da rua e a outros edifícios da região apresentam pouca variação. Esses estudos que investigaram ruas simétricas foram conduzidos em diferentes climas para examinar o microclima, a intensidade da ilha de calor urbana e o conforto térmico em espaços abertos.

Medições realizadas em Fez (Marrocos) por Johansson (2006), comparando o tecido antigo da cidade ($A/L = 9,7$), com o novo ($A/L = 0,6$) mostraram que às 16h a Tar foi 10°C mais baixa nas áreas antigas da cidade com redução de até 15°C no *Physiological Equivalent Temperature* (PET)⁴ e 25°C na temperatura radiante média (TRM), isso devido às proporções geométricas dos cânions profundos, que proporcionam sombreamento durante todo o dia. O que se notou também é que, embora a forma urbana compacta propicie proteção contra o sol e menor exposição à radiação solar, resultando em menores temperaturas durante o verão, ela é desvantajosa no inverno.

Ali-Toudert e Mayer (2006) avaliaram relações A/L de 0,5, 1, 2 e 4 na cidade de Ghardaia (Argélia) com o modelo ENVI-met 3.0. Os resultados mostraram diminuição de 3°C na Tar e redução de 8°C no índice PET, com o aumento da relação A/L.

Emmanuel, Rosenlund e Johansson (2007), comparando três valores de A/L (1, 1,8 e 3) com o modelo ENVI-met 3.0 para Colombo (Sri Lanka), verificaram que, com o aumento da relação A/L houve uma diminuição de até 0,4°C na Tar às 14h, 24°C na TRM e até 10°C no PET. Já no período noturno foi notado aumento de até 0,4°C na Tar e 2°C na TRM às 21h.

Erell et al. (2014) compararam 4 valores de A/L (0,1; 0,5; 1 e 2) para as cidades Eliat, (Israel), Cingapura (Cingapura), Adelaide (Austrália) e Gotemburgo (Suécia) utilizando o modelo *cânion air temperature* (CAT)⁵ e o *index of thermal stress* (ITS). O estudo constatou que com o aumento na relação A/L houve diminuição da Tar nas 4 cidades de até 0,8 °C em Eliat, 0,9 °C em Cingapura, 1,1 °C em Adelaide e 0,5 °C em Gotemburgo, às 12h.

A maioria dos estudos acima menciona que, no verão, em baixas latitudes, e nos trópicos, ao longo do ano, altos índices da relação A/L (altura do edifício duas vezes a largura da rua ou além), aumentam intensidade da ilha de calor à noite e melhoram microclima durante o dia. Simultaneamente, uma baixa relação A/L (altura

⁴Mayer e Hoppe (1987).

⁵Erell e Williamson (2006).

de construção de uma vez a largura da rua ou abaixo) diminui intensidade da ilha de calor à noite e piora microclima durante o dia. No inverno, em latitudes médias, baixos valores de A/L em edifícios simétricos propiciam calor diurno e frio noturno. Por outro lado, altos valores de A/L propiciam calor noturno e resfriamento diurno.

Em climas tropicais, as condições de temperatura noturna elevada para altos valores da relação A/L provocam estagnação do fluxo de ar e o calor armazenado afeta negativamente o clima. Condições microclimáticas diurnas são melhores para esses índices devido ao maior sombreamento. Essas condições diurnas das ruas com baixos valores de A/L dependem do efeito da radiação solar direta e, ao mesmo tempo, melhoram o clima durante a noite devido à liberação conveniente do calor armazenado.

O conhecimento disponível sobre microclimas e relação A/L é, em grande parte, restrito às relações de A/L simétricas. Valores de A/L altos, baixos e simétricos foram utilizados em vários estudos que apresentam necessidades conflitantes para o dia e para a noite nos trópicos e necessidades sazonais em outros lugares (QAID; OSSEN, 2015).

Cidades geralmente apresentam padrões irregulares de construção em cânions urbanos (CHEN et al., 2012). De acordo com Johansson e Emmanuel (2006), cada configuração urbana tem uma influência diferente sobre o clima no nível do pedestre. Cânions urbanos são classificados como simétricos se as fileiras de edifícios tiverem altura quase igual ou assimétricos se tiverem alturas significativamente diferentes (AHMAD; KHARE; CHAUDHRY, 2005; VARDOULAKIS et al., 2003). A localização dos edifícios mais altos e baixos, mesmo quando a diferença nas alturas dos edifícios é pequena, influenciam o microclima no cânion porque para cada configuração o acesso ao sol apresenta um comportamento diferente, assim as relações de A/L devem ser estudadas individualmente para descobrir sua influência no microclima em cada latitude (QAID; OSSEN, 2015).

Qaid e Ossen (2015) investigaram influência da relação A/L de ruas assimétricas nos microclimas de avenidas largas (bulevares) e examinaram uso da relação A/L como estratégia para melhorar microclima diurno de Putrajaya (Malásia). Foi utilizado modelo microclimático ENVI-met e os edifícios foram posicionados em ambos os lados da avenida e seus efeitos foram examinados ao se analisar fatores climáticos como Tar, temperatura de superfície, fluxo de radiação e velocidade do vento. Resultados mostraram que relações A/L de 0,8-2 e de 2-0,8 têm influências

diferentes sobre condições microclimáticas diurnas e ilhas de calor noturnas, apesar de terem valores de FVC similares, conforme Figura 11. Isso implica que o valor do FVC pode não ser fator decisivo que afeta microclimas do cânion urbano ou ilhas de calor, a menos que sua orientação seja considerada. É necessário estudo mais aprofundado para se investigar efeito do valor do FVC e da orientação criada por diferentes relações A/L assimétricas nas temperaturas do ar do dia e da noite.

Figura 11 - Relações A/L assimétricas propostas para os dois lados da via.

Esquema simétrico da direita é o existente. As setas indicam a direção do edifício mais baixo para cada cânion assimétrico. Fonte: Qaid e Ossen (2015).

Relações A/L assimétricas oferecem alternativa para implementar o conceito de *shadow umbrella* (EMMANUEL, 1993, 2005). Edifícios altos de cânions assimétricos desempenham um papel importante em aumentar a velocidade do vento ao nível da rua. Esses resultados estão de acordo com os pontos de vista apresentados por Johansson e Emmanuel (2006). Em clima quentes, edifícios altos que bloqueiam o sol do período da tarde são preferidos aos edifícios altos que bloqueiam o sol da manhã.

Yang, Wong e Lin (2015) investigaram o conforto térmico em ambientes urbanos de alta densidade em Cingapura e exploraram formas de melhorar o conforto térmico nesses ambientes, com foco no efeito da relação A/L. Assim, cinco cenários (A/L = 1, 2, 3, 4 e 5) foram simulados pelo ENVI-met 3.1. O estudo apontou que o sombreamento urbano no nível da rua é em função da orientação da via, bem como

da altura dos edifícios e da densidade construída (relação A/L). O sombreamento alcançado por meio de alta relação A/L pode reduzir substancialmente o desconforto térmico das pessoas no nível da rua. O valor de PET em um cânion profundo chegou a ser 20°C menor que o de um cânion raso. Uma relação de A/L 3 poderia ser considerada como limiar para o conforto térmico em espaços abertos nas ruas de Cingapura.

Pesquisa realizada com cânions urbanos demonstrou que o estresse térmico diminui à medida que se aumenta o A/L, ou seja, conforme os edifícios estão mais próximos e altos, isso devido à menor exposição à radiação solar direta e difusa, e, conseqüentemente, ao sombreamento, independente da orientação das vias e dos materiais empregados nas superfícies (ERELL et al., 2014).

2.4.3 Efeito do fator de visão de céu (FVC) no microclima urbano

O fator de visão de céu (FVC) determina a fração de radiação recebida (ou emitida) por uma superfície plana pela radiação emitida (ou recebida) pelo ambiente hemisférico inteiro. É um parâmetro adimensional que varia de 0 a 1, onde 1 seria o céu totalmente aberto e 0, totalmente obstruído (OKE, 1988) (Figura 12). O aumento da densidade urbana e do coeficiente de aproveitamento (CA) resultam em obstrução do céu e, conseqüentemente, reduzem valores de FVC (CHENG et al., 2006).

Edifícios altos e cânions urbanos profundos reduzem o FVC e aumentam a área sombreada, mantendo a base dos cânions urbanos mais frios durante o dia, mas aumentando sua temperatura à noite, devido ao aprisionamento da radiação de onda longa (ARNFIELD, 2003; ELIASSON, 1996; JOHNSON; WATSON, 1984; LINDBERG, 2007; OKE et al., 1991). Assim, o FVC pode ser um indicador representativo da densidade, da geometria e do layout urbano (CHEN et al., 2012; SVENSSON, 2004; WANG; AKBARI, 2014).

Segundo Zhang et al. (2012), para os pesquisadores de arquitetura e urbanismo, o FVC é definido como a proporção de céu visível por um ponto em relação a todo o domo e é calculado como a razão entre o ângulo sólido de um trecho visível do céu a partir de um certo ponto, pelo ângulo sólido do hemisfério, centralizado no mesmo ponto (Figura 12).

Figura 12 - Definição do FVC geométrica (esquerda) e por cossenos (direita).

Fonte: Zhang et al. (2012)

O efeito do FVC no fenômeno ilha de calor é explicado por meio das trocas radiantes (ERELL; WILLIAMSON, 2007). Diferentes valores de FVC conduzem a diferentes balanços de radiação e, conseqüentemente, a diferentes balanços de energia (HÄMMERLE et al., 2011). Edifícios obstruem o céu aberto e atrasam o resfriamento das superfícies durante noites calmas e de céu limpo, sendo mecanismo importante que conduz ao fenômeno da ilha de calor. É esperado que áreas urbanas com menores valores de FVC se resfriem mais devagar porque o céu está obstruído por edifícios e a radiação de onda longa tende a ficar aprisionada na camada limite urbana (GÁL; LINDBERG; UNGER, 2009).

Giridharan et al. (2007) estudaram 17 empreendimentos residenciais em Hong Kong com FVC variando entre 0,11 e 0,59 e constataram que FVC, velocidade do ar e albedo da superfície podiam explicar a ilha de calor urbana diurna com correlação positiva para FVC; observou-se que um aumento de 10% no FVC aumenta 2,9% a temperatura diurna e que esse mesmo aumento no FVC reduz 0,3% a ilha de calor noturna.

Bourbia e Awbi (2004) e Yan et al. (2014) também demonstraram que um FVC menor é associado à menor temperatura diurna do ar ao criar um efeito de ilha de resfriamento diurna (SHARMIN; STEEMERS; MATZARAKIS, 2017) .

Bourbia e Boucheriba (2010) investigaram o desenho das vias e seu impacto no clima urbano de uma cidade muito densa de clima semiárido, no norte da África, com FVC entre 0,076 e 0,58. Os autores verificaram que, quanto maior for a relação A/L, menor era a Tar entre 0h e 18h, sugerindo que o FVC fosse incorporado no planejamento urbano pelo seu papel em mitigar os efeitos da ilha de calor.

Utilizando uma base de dados 3D *G/S-based*, Gál, Lindberg e Unger (2009) e Chen et al. (2012) analisaram todo o ambiente urbano de Hong Kong. Um programa de computador foi desenvolvido pelos autores no sistema ArcGIS, e assim puderam gerar mapas do FVC para toda a área. Foi encontrada relação negativa entre FVC e Tar intraurbana, ao contrário da relação positiva anteriormente encontrada por Giridharan et al. (2007) e por Giridharan, Ganesan e Lau (2004), contrariando o que é mais observado, de que superfícies mais abertas recebem mais insolação durante o dia e, por isso, aumentam a Tar local conduzindo a temperaturas mais altas do que em uma superfície mais obstruída. Dois aspectos puderam ser atribuídos a esse resultado. Primeiro, o albedo superficial de um arranjo urbano é menor do que o de uma superfície plana, e que o albedo urbano de uma forma urbana com 50% da razão da área do terreno pela área edificada (taxa de ocupação 0,5) é significativamente menor do que aquela com 12,5% dessa razão (taxa de ocupação 0,125) (ITOH; ASHIE, 2009). Assim, espera-se que Hong Kong, com geometria urbana densa e alta, contribua para o aprisionamento de calor e para altas temperaturas nas áreas edificadas. O segundo aspecto seria relacionado aos ventos; como Hong Kong é uma cidade costeira, com ventos de velocidades maiores que 3 m/s em espaços abertos, a massa de edifícios altera os ventos e pode impactar na advecção do ar e na transferência de calor, o que poderia ser uma razão para as diferenças de temperatura encontradas.

No Brasil, Souza (1996) estudou a relação entre FVC e Tar em São Carlos, SP, tendo constatado fraca correlação entre Tar ao nível do pedestre e a geometria urbana, em áreas de média verticalização (A/L entre 20% e 85% e FVC entre 58% e 90%). Esse resultado pode ser devido à intensa ventilação na área de estudo. Em pesquisa de Souza et al. (2010), na cidade de Bauru, SP, foram comparadas áreas com valores de FVC entre 0,68 e 0,90, e o ponto com maior valor de FVC não foi o que apresentou menores temperaturas à noite. Assim, não foi possível estabelecer relação linear constante que diminua a temperatura à medida que o FVC aumente.

Em Curitiba, PR, Minella, Rossi e Kruger (2011) analisaram a relação entre FVC, temperatura radiante média e Tar no período diurno, e o FVC não demonstrou ser fator determinante no microclima urbano. Uma justificativa é que, para um mesmo valor de FVC valores distintos de radiação solar podem chegar durante o dia, podendo ser o ganho de radiação o parâmetro que influenciaria mais no aumento da temperatura radiante média e Tar, do que somente o FVC. Ainda no Brasil, Krüger,

Drach e Broede (2017) avaliaram o efeito combinado do microclima e do FVC no conforto dos pedestres na cidade do Rio de Janeiro, RJ, e concluíram que a percepção de estresse térmico é mais exacerbada quando se aumenta a abertura do céu.

He et al. (2015) fizeram estudo piloto em Pequim (China), cujo clima é continental úmido influenciado por monções, visando compreender melhor a correlação entre FVC e PET, particularmente variações sazonais, que podem contribuir para o desenho do cânion e o planejamento urbano em Pequim. Analisando 20 locais de observação e utilizando o modelo Ray Man, os resultados indicam que os cânions urbanos mudam de uma "fonte de calor" noturna em dias ensolarados para uma "fonte fria" noturna em dias chuvosos e nublados. Além disso, as condições de conforto térmico variam em diferentes estações. Áreas altamente sombreadas ($FVC < 0,3$) geralmente apresentam condições de calor menos frequentes durante o verão; no entanto, essas áreas apresentam períodos mais longos de desconforto no inverno do que áreas moderadamente sombreadas ($0,3 < FVC < 0,5$) e áreas ligeiramente sombreadas ($FVC > 0,5$) e vice-versa. Portanto, áreas moderadamente sombreadas são vantajosas para equilibrar desconforto pelo calor no verão e pelo frio no inverno, o que efetivamente prolonga períodos de conforto em espaços ao ar livre durante todo o ano em Pequim.

Analisando a influência de seis arranjos urbanos com diferentes FVC sobre o conforto térmico externo em Atenas (Grécia), Charalampopoulos et al. (2013) encontraram correlação significativa entre FVC e conforto térmico. Em experimentos de campo em Taiwan foi analisado potencial de arrefecimento de diferentes níveis de sombreamento no conforto térmico externo (LIN; MATZARAKIS; HWANG, 2010). Os autores descobriram que as áreas pouco sombreadas com alto FVC apresentam menor nível de conforto térmico no verão, enquanto áreas urbanas com baixo FVC apresentam pior desempenho térmico no inverno. Além disso, no contexto de verões quentes e invernos suaves em Taiwan, proporcionar áreas urbanas mais frescas no verão é mais importante do que criar espaços externos onde as pessoas poderiam se beneficiar da radiação solar direta. Portanto, o aumento do sombreamento através de edifícios e árvores foi proposto para melhorar o desconforto térmico durante o verão.

Embora a literatura relevante tenha demonstrado forte relação entre FVC e radiação líquida medida de onda longa, vários estudos experimentais apontaram que o FVC sozinho é insuficiente para a representação dos fenômenos térmicos complexos que ocorrem em cânions urbanos (ELIASSON, 1996; ELIASSON;

HOLMER, 1990; NIACHOU; LIVADA; SANTAMOURIS, 2008), principalmente em escala microclimática. Por exemplo, Eliasson (1996) descobriu que o valor do FVC por si só é insuficiente para explicar a variação da Tar entre centro e subúrbios da cidade, porque essa variação poderia resultar de fatores mais complexos e outros fatores regionais, como localização da cidade e propriedades do material usadas no meio ambiente urbano. Da mesma forma, Krüger, Pearlmutter e Rasia(2010) afirmaram que FVC é parâmetro limitante na descrição de irregularidades da geometria urbana para fins de estudos de conforto para pedestres. Outras variáveis climáticas e atributos urbanos influenciam a Tar e a temperatura radiante média. Jamei et al. (2016) concluíram que, quanto mais aumenta o FVC, mais aumenta o desconforto durante o dia e se reduz o efeito da ilha de calor à noite. No entanto, quanto mais baixo for o FVC, mais o desconforto diminui durante o dia, pois propicia mais área sombreada; porém, durante a noite, aumenta o efeito da ilha de calor.

Já um estudo feito em Montreal (Canadá) correlacionou FVC e condições ambientais urbanas e concluiu que, em áreas urbanas com maior FVC, a Tar foi maior durante o dia do que as áreas com baixo FVC, devido à alta capacidade térmica dos materiais urbanos nas áreas abertas (alto FVC) e sombra de grandes construções nas áreas de baixo FVC; por outro lado, à noite, a Tar é menor com alto FVC, devido à maior dissipação do calor nessas áreas, em comparação com as de menor FVC (WANG; AKBARI; CHEN, 2016).

Segundo Yang e Li (2015) os resultados de diferentes estudos são de alguma forma contraditórios, porque o FVC de cânions urbanos tem efeitos diferentes na temperatura de superfície. Upmanis e Chen (1999) pontuam que essa relação muda de acordo com a estação do ano, data e localização, o que pode confundir os resultados. Essa inconsistência é compreendida, pois os experimentos foram feitos em áreas urbanas reais e podem ter sido facilmente influenciados por diversas variáveis ambientais. Assim, modelagens numéricas devem ser o método mais efetivo para entender o mecanismo causal, em cada contexto urbano e climático.

2.4.4 Efeito da orientação das vias no microclima urbano

Vários estudos demonstraram empiricamente que a orientação afeta a distribuição de insolação em paredes e pisos de cânions urbanos (ARNFIELD, 1990; SWAID; HOFFMAN, 1990). A magnitude e a variação horária do balanço de energia superficial das paredes e pisos de um cânion são condicionadas pela influência da

geometria e orientação do cânion nas trocas radiantes (NUNEZ; OKE, 1977). A orientação das vias é um dos parâmetros importantes que determinam o acesso solar e velocidade do vento em cânions urbanos e, portanto, são significativos para estudos microclimáticos, pois ambos têm grande impacto no conforto térmico no nível do pedestre (GIVONI, 1989; HERRMANN; MATZARAKIS, 2012; YANG; QIAN; LAU, 2013a).

Em climas temperados é mais difícil ter uma orientação com melhor desempenho que outra, pois se tem necessidades contrárias para o verão e o inverno. Portanto, a orientação ideal depende do clima, da necessidade de sol ou sombra, da ventilação ou de um abrigo ao vento. A orientação com relação ao sol afeta ganhos de calor e a orientação com relação ao vento afeta perdas de calor pela ventilação, sendo que a ventilação é menos previsível que a trajetória solar, principalmente em ambientes urbanos densos. Já em climas tropicais a preocupação durante todo o ano é em diminuir o ganho de calor pela radiação, portanto o sombreamento será sempre vantajoso.

Shashua-Bar e Hoffman (2004) simularam três cânions com relação A/L de 0,25, 0,5 e 1 em duas orientações Norte-Sul (N-S) e Leste-Oeste (L-O), para a região metropolitana de Tel-Aviv (Israel). Os resultados indicaram que quanto mais profundo o cânion mais efeito terá a mudança de orientação, sendo que o máximo encontrado foi de 0,64 K mais frio na Tar na orientação N-S, se comparada a L-O. Como foram comparadas diferentes orientações dos cânions com uma relação A/L até 1, não daria para se afirmar que para a relação A/L a partir de 1 se observaria a mesma coisa, pois para a relação A/L até 1 é possível se obter um ganho de radiação direta mesmo na orientação N-S; já em cânions mais profundos a diferença de temperatura entre orientações pode não ter esse comportamento, pois em ambas as orientações o cânion estaria sombreado.

Nos estudos de Ali-Toudert e Mayer (2007) com o modelo ENVI-met 3.0 para a cidade de Ghardaia (Argélia), os cânions N-S apresentaram até menos 1°C na Tar e menos 12°C no PET, se comparados aos cânions L-O. Utilizando também o ENVI-met 3.0, Emmanuel, Rosenlund e Johansson (2007) encontraram diferenças de 0,1°C na Tar, 5°C no PET e 18°C na TRM nos cânions N-S quando comparados aos L-O na cidade de Colombo (Sri Lanka). Emmanuel e Fernando (2007) também simularam em Phoenix (Estados Unidos) com o mesmo modelo e não encontraram diferença na Tar entre as duas orientações, mas sim, de até menos 4°C na TRM nos cânions orientados

a N-S se comparados aos L-O. Essas três cidades apresentaram resultados semelhantes: maiores temperaturas do ar, PET e TRM nos cânions orientados L-O em comparação aos N-S. Essas cidades situam-se em climas quentes e desérticos (Ghardaia e Phoenix) e clima tropical de monções (Colombo), o que demonstra que cidades de clima quente, que estão localizadas em latitudes baixas e médias, têm grandes benefícios climáticos com a orientação N-S dos cânions urbanos.

Tsitoura, Michailidou e Tsoutsos (2016) realizaram simulações com o modelo ENVI-met 4.0, comparando vias nas orientações N-S, L-O, com relação A/L de 1,07 e 0,53 para uma área urbana de Rethymnon (Ilha de Creta, Grécia), de clima mediterrâneo, e concluíram que cânions N-S têm quase os mesmos valores das temperaturas máximas, enquanto cânions L-O têm uma diferença de 0,5-1,0°C; os cânions N-S têm aproximadamente os mesmos valores para as temperaturas de superfície máximas, enquanto cânions L-O têm diferenças maiores, de cerca de 6,0 °C. Os resultados também mostraram que a relação A/L afeta mais os cânions orientados a L-O, onde o sombreamento é crucial, pois a penetração do sol é maior quando comparada ao cânion N-S. No mesmo trabalho os autores também compararam casos com FVC igual a 0,30 e 0,10 e pode assumir-se que cânions N-S tiveram quase os mesmos valores de temperaturas máximas, enquanto que os cânions L-O apresentaram diferenças de 2,0 a 2,5 °C; os cânions N-S apresentaram diferença de 3 °C na temperatura de superfície máxima, enquanto cânions L-O apresentaram diferenças maiores, de cerca de 10 a 15 °C; nas orientações L-O, quanto menor o FVC, melhor será o conforto térmico em cerca de 5 °C no *Universal Thermal Climate Index* (UTCI). Já nas orientações N-S, como há falta de radiação direta nos cânions, o valor do UTCI é principalmente definido pela penetração do vento.

A maioria dos estudos realizados sobre o efeito da orientação das vias no conforto térmico concluiu que ruas orientadas L-O sofrem um período prolongado de exposição solar durante o verão, em comparação com as ruas orientadas N-S e, por isso, experimentam pior condição térmica durante o dia. A maioria deles propõe que cânions mais profundos propiciam sombreamento mútuo dos edifícios e também melhoram as condições de conforto térmico nas calçadas (JAMEI et al., 2016).

2.5 Efeito da materialidade construída no microclima urbano

A urbanização afeta a absorção e a reflexão da radiação solar, como também a absorção e a emissão de radiação de ondas longas (infravermelhas), provenientes das superfícies, devido ao efeito combinado da geometria urbana (que resulta na interferência da transmissão da energia radiante), das diferenças nas propriedades das superfícies dos materiais urbanos e da poluição do ar (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011).

Materiais de superfícies urbanas têm grande influência sobre o conforto térmico humano, pois pela temperatura das superfícies se determinam as trocas radiantes com os pedestres. Errell et al. (2014) mostraram que o uso de materiais com alto valor de albedo em superfícies de cânions urbanos diminui a Tar, mas que essa redução não é suficiente para aumentar as perdas radiantes e, por isso, o conforto térmico do pedestre pode estar comprometido. Já Doulos, Santamouris e Livada (2004) analisaram propriedades termofísicas de 93 materiais usados em pavimentos urbanos, classificados em '*cools*' e '*warms*'. As cores, rugosidades superficiais e dimensões dos materiais também foram analisadas. O estudo contribuiu para escolha mais apropriada dos materiais de pavimentos urbanos, no que se refere à diminuição do efeito de ilha de calor e no aumento do conforto do pedestre.

Yang e Li (2009), estudando o comportamento diurno de superfícies urbanas em Hong Kong, com medições de campo e termografia, mostraram que a temperatura das superfícies urbanas é importante variável também para estudos de ventilação urbana (Figura 13), pois as temperaturas das superfícies afetam os fluxos de convecção térmica e os fluxos induzidos termicamente tornam-se mais importantes em uma cidade densa quando a velocidade do vento é baixa.

Figura 13 - Variação de temperaturas superficiais na envoltória de edifícios.

Fonte: Yang e Li (2009).

Os materiais utilizados nas superfícies urbanas são fundamentais no balanço térmico urbano, pois absorvem radiação solar e infravermelha incidente e dissipam para a atmosfera a porcentagem do calor acumulado por meio de processos convectivos e radiativos, aumentando a temperatura do ambiente (SYNNEFA; SANTAMOURIS, 2016).

Superfícies pavimentadas são, geralmente, de concreto e asfalto e apresentam altas temperaturas de superfície durante o verão. Diminuir a temperatura superficial dos pavimentos pode contribuir muito para melhorar as condições térmicas em cidades que sofrem de altas temperaturas. Pavimentos e coberturas frias (*cool pavements*) são principalmente baseados em superfícies que apresentam elevado albedo combinado à elevada emissividade térmica (SANTAMOURIS, 2013).

Materiais frios (*cool materials*) podem ser utilizados em pavimentos urbanos, nas coberturas ou fachada dos edifícios, sendo que a aplicação e o impacto nas fachadas são pouco investigados, devido aos seguintes fatores: alto poder de mitigação dos tetos frios, por receberem mais radiação incidente do que o plano vertical em função da geometria dos *cânions* urbanos, o que faz com que fique complexa a estimativa do impacto do uso de materiais refletores nas fachadas urbanas, e, também, pela pouca pesquisa relacionada aos potenciais problemas de desconforto visual causados pela alta refletância no espectro visível das superfícies (SYNNEFA; SANTAMOURIS, 2016).

Há três tipos de materiais frios para envelope urbano: materiais frios brancos ou claros, frios coloridos e as inovações tecnológicas (fotovoltaicos, termocromáticos e retrorrefletores). Materiais fotovoltaicos, além de serem frios, também podem apresentar antipoluentes; os termocrômicos conseguem mudar suas propriedades óticas e térmicas, ficando escuros no frio e claros no calor (SYNNEFA; SANTAMOURIS, 2016). Os retrorrefletores funcionam melhor em ambientes urbanos com edifícios altos; estes, aplicados nas fachadas, permitem que a luz incidente seja refletida na direção da radiação incidente, em vez de refletida de forma difusa no cânion urbano (AKBARI; KOLOKOTSA, 2016).

A avaliação experimental do regime térmico das superfícies pode ser efetuada utilizando-se técnicas de mesoescala, ou métodos de medição de microescala que envolvam termografia infravermelha e monitorização convencional da temperatura (SANTAMOURIS, 2013).

Técnicas baseadas em sensoriamento remoto a bordo de satélites fornecem ferramenta útil para se entender a distribuição espacial das temperaturas da superfície urbana e avaliar em uma fase inicial o impacto dos materiais dos pavimentos na ilha de calor urbana de superfície (*surface urban heat island - UHI Surf*), porém, estão associadas a várias restrições tais como as limitações de tempo estabelecidas pela órbita dos satélites, a resolução das imagens e os problemas associados à interpretação das imagens. As técnicas de medição em microescala fornecem informações detalhadas sobre as condições térmicas das áreas estudadas e permitem uma compreensão profunda dos processos térmicos correspondentes (SANTAMOURIS, 2013).

A maioria dos experimentos de campo em microescala foi realizado usando-se termografia infravermelha ou medições de temperatura superficial convencionais usando-se termopares. Técnicas específicas de microescala apresentam grau de precisão muito elevado e podem fornecer resultados instantâneos e informações sobre a variação diurna dos padrões de temperatura; porém, não podem fornecer visualização global da distribuição de temperatura em uma área grande, o que é mais vantajoso com uso de sensoriamento remoto a bordo de aviões ou de satélites (SANTAMOURIS, 2013).

Técnicas de simulação computacional foram desenvolvidas para se prever e analisar o desempenho térmico de pavimentos e demais superfícies urbanas. Os modelos são utilizados para se investigar fenômenos térmicos específicos, que não podem ser medidos de forma direta ou para se avaliar cenários urbanos de modo prognóstico (SANTAMOURIS, 2013).

Além do impacto térmico, a escolha dos materiais e componentes das superfícies urbanas tem também impacto visual e acústico. O ofuscamento provocado pelo desenho, pela localização e pela orientação de envoltórias altamente refletoras (geralmente envidraçadas ou metálicas) implica em desconforto e comprometimento da segurança no ambiente externo, especialmente para o trânsito, bem como no aumento da carga térmica e consumo de energia de edifícios vizinhos afetados, que recebem uma concentração de radiação que provoca ganhos de calor indesejados (SCHILER, 2009).

Alguns fenômenos estão estreitamente relacionados com a forma que causa múltiplas reflexões, como o caso de um edifício em Londres, de formato côncavo, com 167m de altura, todo em vidro. O albedo do vidro depende do ângulo de incidência da

radiação solar; quando o ângulo aumenta ($>80^\circ$) a sua refletância também aumenta, o que para este edifício acontece em setembro, no final da tarde, quando o ângulo solar combinado com a orientação côncava do edifício causou uma reflexão solar de forma especular, atingindo uma rua a 60m de distância, com uma temperatura superficial em torno de 100°C (Figura 14), o que fez parte de um carro estacionado derreter (FUTCHER et al., 2017; FUTCHER; KERSHAW; MILLS, 2013).

Figura 14 - Corte esquemático do efeito causado pelo edifício londrino.

Fonte: Futcher et al. (2017).

Em São Paulo, podem-se observar efeitos de múltiplas reflexões em alguns edifícios, como na Figura 15. As múltiplas reflexões comprometem o conforto visual do pedestre por ofuscamento, mas ainda há poucos estudos relativos à interface entre superfícies urbanas (de edifícios ou pavimentos) e meio externo; na maioria das vezes a escolha da envoltória dos edifícios e demais superfícies urbanas estão relacionadas a outros fatores, estéticos e econômicos, desconsiderando-se impactos ambientais provocados no interior dos edifícios e no meio externo.

Figura 15 - Edifícios na Av. Pres. Juscelino Kubitschek, Vila Olímpia, São Paulo às 9h.

Fonte: autora, em 14/05/2019.

2.5.1 Propriedades dos materiais urbanos

Superfícies urbanas apresentam diferentes propriedades que afetam o clima(OKE et al., 2017):

- radiantes: abrangendo geometria, absorvância à radiação solar, refletância à radiação solar, transmitância à radiação solar e emissividade;
- térmicas: calor específico, capacidade térmica, condutividade térmica, admitância térmica, difusividade térmica;
- úmidas: capacidade de armazenamento, permeabilidade, características dos estômatos, natureza química;
- aerodinâmicas: rugosidade, porosidade.

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura diferente de zero. Enquanto a transferência de energia por condução ou convecção requer meio material, a radiação não necessita dele. As propriedades físicas para estudos de transferência de calor são geralmente conhecidas por propriedades termofísicas e incluem duas categorias distintas: as propriedades de transporte e as propriedades termodinâmicas. As propriedades termodinâmicas referem-se ao estado de equilíbrio de um sistema; a capacidade térmica e o calor específico são duas dentre outras propriedades usadas na termodinâmica já a

condutibilidade térmica se classifica como propriedade de transporte (BERGMAN et al., 2014).

O balanço térmico das superfícies urbanas é determinado pela quantidade de radiação solar absorvida, radiação infravermelha emitida, calor transferido por convecção para o ar atmosférico, calor armazenado no material e do calor conduzido para o solo ou edifício. Quando os fenômenos de calor latente estão presentes, como evaporação, também afetam o regime térmico das superfícies (SANTAMOURIS, 2013). Os itens seguintes abordarão as propriedades das superfícies urbanas pertinentes ao trabalho.

2.5.1.1 Propriedades radiantes

a) Refletância (Albedo) (ρ)

Em geral, o valor da refletância é determinado pela cor e rugosidade do material. Cores claras apresentam menor absorção ao espectro visual da radiação solar, enquanto absorvância específica da parte infravermelha da radiação independe da cor percebida. Pesquisas vêm sendo feitas para aumentar a refletância dos materiais de superfícies. O desenvolvimento tecnológico aponta para duas direções diferentes: aumentar o albedo de pavimentos de cor clara ou branca, aumentando sua refletância espectral na parte visível da radiação solar, e aumentar a refletância espectral de materiais coloridos no espectro do infravermelho próximo (SANTAMOURIS, 2013).

Os materiais refletores ou frios apresentam refletância à radiação solar muito elevada, juntamente com elevada emissividade. A absorção mais baixa da radiação solar e a emissão infravermelha aumentada mantêm a temperatura de superfície dos materiais mais baixa e diminuem substancialmente o calor sensível liberado à atmosfera. Telhados refletores e pavimentos refletores contribuem muito para aumentar o albedo das cidades e, assim, diminuir sua temperatura de superfície e mitigar a ilha de calor urbana (SANTAMOURIS, 2015).

O albedo de uma fachada influencia o conforto térmico em um *cânion* urbano de duas maneiras diferentes. O albedo mais elevado reduz efetivamente a temperatura superficial das fachadas em vários graus, reduzindo a transferência de calor sensível, bem como a emissão de radiação infravermelha. Assim, um albedo superior conduz a uma temperatura de ar mais baixa e a uma temperatura radiativa mais baixa na vizinhança. Ao mesmo tempo, um albedo maior faz com que mais

radiação solar recebida seja refletida de volta para o cânion, resultando em temperatura radiativa mais alta dentro do cânion que resulta em efeito negativo sobre o conforto térmico humano, superando o efeito positivo da Tar mais baixa obtidas com baixo valor do albedo. Isso é muitas vezes negligenciado por pesquisadores que apenas se concentram na Tar e acabam recomendando o uso de superfícies altamente reativas como medida para mitigar o efeito da UHI (HUTTNER, 2012; ERELL et al., 2014)

A maioria dos estudos demonstra que quanto maior o albedo das superfícies edificadas menor a Tar, maior a temperatura radiante média, gerando mais desconforto ao pedestre. Emmanuel e Fernando (2007) avaliaram o efeito do aumento do albedo das fachadas dos edifícios em Colombo (Sri Lanka) e Phoenix (Estados Unidos) de 0,6 para 0,9 utilizando o modelo ENVI-met 3.0; concluíram que a Tar diminuiu até 1,3 °C às 14h e 0,6°C às 21h em Colombo e 0,5°C às 14h em Phoenix; às 21h constatou-se aumento na Tar de 0,1°C em Phoenix. Já a TRM mostrou aumento de 15°C em Colombo e de 13°C em Phoenix às 14h e uma diminuição de 1°C em Colombo e um aumento de 2°C em Phoenix às 21h. Emmanuel, Rosenlund e Johansson (2007) também simularam com ENVI-met 3.0 testando 3 diferentes valores de albedo em Colombo, 0,2; 0,3 e 0,6 e constataram redução de até 1,2 °C na Tar e um aumento de 15°C na TRM às 14h e diminuição de 1°C na TRM às 21h.

Erell et al. (2014) testaram valores de albedo 0,2, 0,45 e 0,7 ao meio-dia em 4 cidades: Eilat (Israel), Cingapura (Cingapura), Adelaide (Austrália) e Gotemburgo (Suécia). Os resultados foram diferentes para cada cidade, em todas houve diminuição da Tar e aumento no desconforto com aumento do albedo, sendo que Adelaide apresentou maior variação na Tar com diminuição de 1,3°C, seguida de Cingapura com redução de 1°C, depois Eilat com diminuição de 0,9°C e Gotemburgo com diminuição de 0,7°C. Já com relação ao desconforto, medido pelo ITS (Index of Thermal Stress)⁶, Eilat é o local que apresentou mais desconforto com 166W, em seguida Adelaide com 113W, Gotemburgo com 85W e, por último, Cingapura, com 72W. As diferenças nos valores das diferentes cidades se referem as características específicas dos locais, como clima e ângulos solares.

⁶ O ITS mede a taxa na qual o corpo humano deve secretar o suor para manter o equilíbrio térmico em condições quentes, em resposta à produção de calor metabólico e à troca de calor com o meio ambiente (GIVONI, 1963 apud ERELL et al., 2014).

Givoni, B. Estimation of the effect of climate on man - development of a new thermal index, PhD thesis, Technion – Israel Institute of Technology, 1963.

Por outro lado, alguns estudos recentes relacionam o aumento do albedo das superfícies edificadas a aumento também na Tar. Lee, Mayer e Schindler (2014) simularam o aumento de albedo de 0,1 para 0,9 das superfícies edificadas em Freiburg (Alemanha) e observaram aumento de 2% na Tar, 18% no PET e 31% na TRM. Taleghani et al. (2014) avaliando a variação do albedo de 0,1 , 0,55 e 0,96 em De Bilt (Holanda), verificaram que o aumento do albedo gerou aumento de 1°C na Tar e 30°C na TRM. Ghaffarianhoseini, Berardi e Ghaffarianhoseini (2015) analisaram 3 valores de albedo para as superfícies edificadas em Kuala Lumpur (Malásia) e notaram aumento de até 0,5°C na Tar e de até 12°C na TRM. Todos os estudos anteriores utilizaram o modelo ENVI-met 3.1.

Menores valores de albedo também diminuem a temperatura no interior do edifício, diminuindo o gasto com energia para resfriá-lo, mas, por outro lado, afeta o conforto do pedestre no entorno do edifício (HUTTNER, 2012; ERELL et al., 2014;) e a temperatura interna de edifícios adjacentes (YAGHOOBIAN; KLEISSL, 2012). Assim, a localização de materiais com altos valores de albedo precisa ser pensada para não afetar o conforto térmico do pedestre, nem a temperatura interna dos edifícios próximos e isso só pode ser avaliado com simulações preditivas.

Efeito da geometria urbana no albedo

Embora as relações entre FVC e ICU tenham sido amplamente investigadas por climatologistas, poucos estudos são dedicados às relações entre albedo urbano e intensidade de ICU. O albedo urbano depende da geometria urbana, das propriedades refletoras dos materiais e do arranjo espacial (orientação ou sombreamento) (KONDO et al., 2001; SANTAMOURIS et al., 2001).

Poucos estudos focam a influência da geometria urbana no albedo urbano usando indicadores morfológicos. Algumas tendências baseadas em simetrias paramétricas numéricas são dadas, por exemplo:

- O albedo urbano diminui com o aumento da relação altura / largura e com o aumento da altura do edifício (AIDA; GOTOH, 1982);
- O albedo urbano diminui com o aumento da altura do edifício e diminui ligeiramente quando as alturas de construção não são uniformes (KONDO et al., 2001);
- O albedo urbano depende tanto da taxa de ocupação quanto da densidade da fachada (área das fachadas dividida pela somatória da área de todas as superfícies –

fachadas, pisos e coberturas), e uma relação empírica não dimensional pode prever essa dependência (GROLEAU; MESTAYER, 2013).

Esses estudos foram conduzidos para geometrias genéricas (parcelas de ruas e de cânions) e não podem ser transpostos consistentemente para qualquer geometria urbana real (BERNABÉ et al., 2015). Algumas conclusões sobre o efeito dos indicadores morfológicos urbanos sobre o albedo incluem (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011):

- taxa de ocupação: em áreas com alta taxa de ocupação, uma grande proporção da radiação solar é refletida no nível da cobertura, e o efeito de múltiplas reflexões no cânion urbano é proporcionalmente menor. O albedo urbano também é alto em formas urbanas com taxas de ocupação muito baixas, porque os reflexos das superfícies das vias não são interceptados pelas superfícies das paredes adjacentes. A absorção máxima (ou o albedo mais baixo) ocorre em configurações com taxa de ocupação média;

- altura dos edifícios: edifícios mais altos criam cânions urbanos mais profundos. Para determinada largura de via isso tende a aumentar a reflexão mútua e a absorção de radiação entre as faces do edifício e, portanto, reduzir o albedo. Essa é a principal razão pela qual os valores de pico da radiação líquida (Q^*) durante o dia tendem a ser mais altos para superfícies urbanas com cânions profundos do que para aquelas com edifícios baixos;

- uniformidade de altura dos edifícios: quando as superfícies das coberturas dos edifícios em um quarteirão estão todas na mesma altura, é menos provável que os reflexos de qualquer superfície da cobertura sejam interceptados por outro edifício. As alturas de construção uniformes resultarão, portanto, em albedo mais alto, enquanto edifícios de alturas variáveis criarão uma superfície, em geral, mais rugosa (e menos refletora), absorvendo mais a radiação solar incidente;

- orientação das vias: embora a orientação afete a penetração da luz direta do sol ao nível da via em padrões que variam de acordo com padrões regulares sazonais e diurnos, o efeito geral sobre o albedo urbano parece ser insignificante.

Múltiplas reflexões fazem um cânion ser mais eficiente em absorver radiação de onda curta do que o albedo individual de cada material de cada face, assim o albedo de um cânion é inferior ao albedo de cada material que compõe o cânion, ou seja, o albedo de um cânion é menor que o das faces que o compõe (OKE et al., 2017). Para ilustrar, na Figura 16, um cânion foi rebatido, de modo que suas três faces são

mostradas como segmentos de uma superfície horizontal. O albedo médio (para um cânion de comprimento unitário) é:

$$\rho_{Surf} = \frac{W\rho_{floor} + H[(\rho_{Wall1} + \rho_{Wall2})]}{2H + W} \quad (8)$$

onde, ρ_{Surf} é o albedo médio na superfície do cânion, $W\rho_{floor}$ a largura do cânion multiplicada pelo albedo do piso, somado a $H(\rho_{Wall1} + \rho_{Wall2})$ que representa a altura do cânion multiplicada pela soma dos albedos das 2 paredes internas do cânion, divididos por $2H + W$ que é altura do cânion multiplicado por 2, somada a largura do cânion, W .

Figura 16 - Efeito da geometria urbana 2D no albedo do cânion.

Avaliado pela comparação de fluxos solares medidos (a) dentro e fora, através do topo de um cânion de comprimento unitário (a soma espacial Σ é conduzida através do topo do cânion W), versus (b) a soma dos fluxos dentro e fora das mesmas faces quando colocadas planas. Fonte: Oke et al. (2017).

A "eficiência" da absorção de radiação em um cânion (R_c) pode ser avaliada comparando-se a capacidade de absorção das faces planas com a do cânion como um todo, conforme medido no topo do cânion (ρ_{top}),

$$R_c = \frac{1 - \rho_{top}}{1 - \rho_{Surf}} \quad (9)$$

onde ρ_{top} é obtido como a razão entre a irradiância de ondas curtas que atinge o cânion (K_i), e a refletância em ondas curtas do cânion (K_r) (Figura 16). Esse efeito

é maior em cânions mais profundos e estreitos (isto é, maior valor de A/L) onde o fator de visão da envoltória aumenta, mas diminui o FVC. O aprisionamento de calor no cânion significa que, sendo os outros fatores iguais, o albedo de um cânion é inversamente relacionado à A/L .

Assim, a forma rugosa da superfície urbana favorece múltiplo reflexo da radiação de ondas curtas, de modo que, mantendo-se todos os outros fatores iguais, a absorção pela superfície urbana é aumentada em comparação com uma superfície plana e horizontal feita do mesmo material. Além disso, como a mesma entrada de energia é espalhada por uma área de superfície maior, comparada a uma superfície horizontal (isto é, o coeficiente de superfície λ_c é maior), a densidade de fluxo média recebida por face é menor do que em superfície plana com o mesmo material.

Para se isolar o efeito da geometria urbana no albedo, Aida (1982) construiu modelo físico de geometria urbana básica com blocos de concreto dispostos em base plana de concreto para simular faixa de valores de A/L e coeficiente de superfície λ_c . O albedo dos blocos e da base era idêntico (0,4). Radiação solar incidente e refletida de onda curta foi medida acima do modelo para se obter albedo integrado da superfície urbana. Resultados mostram que na medida em que se aumenta A/L de 0 (superfície plana) para 2, o albedo do sistema diminui de 0,40 para 0,23, aumento na absorção de 27% obtido através do efeito apenas da geometria (Figura 17).

A Figura 18 apresenta resultados de modelo numérico de um cânion 2D para intervalo de A/L em diferentes latitudes, somadas em um período de um dia inteiro, no momento de um equinócio. Valores efetivos de albedo são menores do que a média dos três valores para as faces, ambos devido ao aprisionamento no cânion e ao fato de que frações significativas das faces estão na sombra. Forma da relação mostra que o impacto da geometria no albedo se torna muito menor a partir de relação A/L de 1. Também ilustra que o efeito da latitude é mais aparente para cânion orientado por L-O e é relativamente menor para o caso N-S. O ângulo de altitude (β) é crítico porque determina extensão em que o feixe de irradiação direta penetra no cânion. Vias orientadas entre direções ortogonais têm efeito geométrico intermediário. Variações diurnas do albedo efetivo no cânion são influenciadas tanto pelo albedo dos componentes individuais do cânion como pela relação A/L (FORTUNIAK, 2008).

Figura 17 - Efeito da forma urbana sobre o albedo da superfície.

Urban form	H/W	λ_c	Albedo α	Change in absorption
0	1	0.40
0.5	1.5	0.32	+17%
1	2	0.27	+21%
2	3	0.23	+27%

Valores obtidos usando-se modelo em escala construído a partir de blocos de concreto colocados sobre base do mesmo material e observado durante período de um ano completo por Aida (1982). A "alteração na absorção" é calculada em comparação com o caso plano. Fonte: Oke et al. (2017).

Figura 18 - Efeito da forma urbana sobre o albedo e da superfície.

Relação entre o albedo efetivo, a média de um dia completo, e A/L para um cânion 2D (albedo de paredes 0.25 e piso 0.15) cujo eixo é orientado (a) N-S, e (b) L-O, plotado para latitudes 0° , 20° , 40° e 60° no momento de um equinócio. Fonte: Oke et al. (2017).

Yang e Li (2015) pesquisaram três variáveis da geometria urbana em Hong Kong (Figura 19); a primeira examinou impacto da densidade construída nos cenários A, mantendo-se altura constante e variando taxa de ocupação, com índice de área plana em 0,11/0,25/0,44/0,64/0,79. Nos cenários B os autores analisaram efeito da altura dos edifícios. Com base na densidade típica de Hong Kong, a taxa de ocupação foi fixada em 0,44 e a altura variou até se chegar aos edifícios altos. Nos cenários C, os autores fixaram taxa de ocupação e altura dos edifícios mais altos variando alturas dos mais baixos para se determinar o efeito da irregularidade de altura. Nesse estudo, o modelo tridimensional de temperatura de superfície (MUST – *Model for Urban Surface Temperature*) foi usado para avaliar impacto da geometria no albedo urbano e na temperatura de superfície das vias. Em todos os cenários foi encontrada relação clara entre FVC e temperatura de superfície das vias. Quanto maior o FVC, maior a temperatura de superfície das vias. Em arranjos de edifícios altos de alta densidade, foram encontradas baixas amplitudes térmicas na temperatura de superfície das vias e temperaturas máximas mais cedo do que em arranjos baixos de baixa densidade.

Figura 19 - Geometria urbana dos cenários estudados.

Fonte: Yang e Li (2015).

No cenário A, para arranjos com baixa e alta taxa de ocupação, o albedo aumentou, porém, para arranjos com taxa de ocupação intermediária o albedo diminuiu. Isso é devido à maior influência das superfícies horizontais, no caso, o piso nas taxas de ocupação mais baixas, coberturas nas taxas de ocupação mais altas e paredes verticais nas taxas de ocupação intermediária, onde múltiplas reflexões da radiação solar incidente diminuem o albedo médio urbano. A temperatura de superfície diminuiu conforme aumentou taxa de ocupação. No cenário B, quanto mais se aumentou altura dos edifícios mais o albedo diminuiu e o mesmo ocorreu para temperatura de superfície. No cenário C, quanto mais uniforme era a altura dos edifícios, mais alto era o albedo; por outro lado, temperatura de superfície no verão tende a diminuir, mas no inverno permaneceu a mesma, devido à altura solar menor.

A luz do sol entrando em um cânion pode ser refletida pelas paredes dos edifícios, mas se encontrar uma superfície envidraçada, ela pode ser transmitida para o interior do edifício, absorvida e refletida. Boa parte dos edifícios de escritórios contemporâneos é caracterizada por extensas áreas envidraçadas, e a radiação transmitida pode ser proporção significativa de luz solar incidente. A modelagem numérica mostrou que, embora o albedo de cânions relativamente profundos ($A/L > 1$) seja inferior a 0,2 para materiais de construção típicos com reflexões difusas, como a alvenaria, aumentar proporção de aberturas envidraçadas resulta em menor albedo no cânion para uma ampla gama de ângulos de sol. Em cânions muito profundos ($A/L > 2$), o albedo previsto para a radiação solar direta de todos os ângulos do sol, bem como para a radiação solar uniforme difusa, é insignificante - entre 0,01 e 0,03 (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011).

O albedo de uma área urbana também se altera com a altura solar (Figura 20). Como regra geral, o albedo de uma superfície aumenta com o ângulo de altura solar⁷. Portanto, baixos ângulos do sol resultam em maior reflexão de coberturas planas. Isso é verdade independentemente da elevação baixa ser resultante da hora do dia (início da manhã ou final da tarde), estação (inverno, exceto nas regiões equatoriais) ou latitude geográfica. Uma vez que o ângulo do sol é grande o suficiente para permitir a penetração substancial da radiação solar nos cânions das ruas, os reflexos internos

⁷o ângulo de incidência é medido a partir de uma linha normal à superfície, portanto um ângulo de incidência de 90 graus é paralelo à superfície, enquanto a incidência de zero graus é perpendicular a ela.

evitam que grande parte dessa luz solar escape (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011).

Figura 20 – Relação albedo de superfície, ângulo solar e ângulo zenital

Relação entre albedo de superfície α e ângulo de altitude solar β (eixo inferior) ou o ângulo zenital Z (eixo superior). Os resultados da vegetação incluem os dados de florestas e pastagens, os de cidades incluem Hamilton, no Canadá; St. Louis, Estados Unidos; Vancouver, Canadá; e Basileia, Suíça. Fontes: CHRISTEN; VOGT, 2004; GRACE, 1983; ROUSE; BELLO, 1979; WHITE; EATON; AUER, 1978) apud OKE et al, 2017).

b) Emissividade (ϵ)

Os materiais emitem radiação de onda longa em função da sua temperatura e emissividade. Altos valores de emissividade correspondem a bons emissores de radiação de onda longa e podem rapidamente diminuir a energia absorvida. A emissividade é o fator mais importante que afeta a temperatura superficial dos materiais durante o período noturno. Foi encontrada boa correlação entre temperatura média da superfície noturna e a correspondente emissividade do material (SANTAMOURIS, 2013).

Altos valores de emissividade contribuem para diminuição da temperatura da fachada e, como consequência, para redução da Tar. Mas, ao mesmo tempo, também aumentam a emissão de radiação de onda longa. Assim, no tocante ao conforto térmico humano, os efeitos negativos da emissividade mais alta superam os efeitos positivos e também podem ser observados durante a noite (HUTTNER, 2012).

A grande maioria das superfícies tem emissividades superiores a 0,90, mas existem algumas com valores de ϵ significativamente mais baixos. Por isso, as superfícies feitas de metal, especialmente as polidas, aparecem como objetos de

menor emissão ("frio") em imagens infravermelhas, por exemplo, claraboias, telhados metálicos, veículos (SOBRINO et al., 2012).

Fachadas inteiras de edifícios altos podem ser cobertas com vidro de baixa emissividade. A lei de Kirchhoff estabelece que uma superfície com baixa emissividade tem absorção igualmente baixa, e como as faces do cânion não transmitem quase nenhuma radiação de ondas longas, elas são refletoras das ondas longas que chegam das faces no seu campo de visão. Isso afeta o armazenamento de calor de objetos próximos.

Para Sobrino et al. (2012) a emissividade da superfície é um parâmetro de entrada essencial para acurácia da temperatura de superfície, embora as múltiplas reflexões causadas pela geometria complexa dos edifícios nas áreas urbanas tenham sido pouco estudadas (OKE et. al, 2017).

A configuração dos cânions também favorece maior absorção de onda longa ($L_{\downarrow}$). Embora a refletância média da radiação de onda longa incidente ($L_{\downarrow}$) nas faces seja muito pequena, a múltipla reflexão entre as faces leva a um pequeno aumento líquido na absorção. Define-se uma emissividade efetiva do cânion seguindo Harman, Best e Belcher, (2004):

$$\varepsilon_{top} = \frac{L_{top}^*}{L_{top}^* (blackbody)} \quad (10)$$

isto é, a razão do saldo de radiação de onda longa (L_{top}^*) no topo do cânion dividido pela mesma quantidade, mas em um sistema de corpo negro isotérmico. Assim, a emissividade do sistema cânion é ligeiramente maior que a da soma da média de suas faces individuais (Figura 21).

Figura 21 – Emissividade efetiva equivalente.

Emissividade efetiva equivalente ε de um cânion isotérmico 2D a 295 K, com emissividades da parede e do piso de 0,9 e L de entrada de 275 W m². Calculado por Scott Kravynhoff usando o modelo TUF-2D (KRAYENHOFF; VOOGT, 2007). Fonte: Oke et al. (2017).

2.5.1.2 Propriedades térmicas

Para o balanço de energia de superfície as propriedades térmicas relevantes são suas habilidades de transferir e armazenar calor.

Cidades em que se utilizam materiais de construção mais leve são propensas a exibir grande variação de temperatura superficial e baixo armazenamento de calor se comparadas às cidades que utilizam materiais mais pesados, como uma alvenaria mais grossa, por exemplo.

As propriedades térmicas que controlam os distintos processos de aquecimento e fenômenos térmicos são:

a) capacidade térmica de componentes (C_T)

A capacidade térmica (C) é o produto da densidade (ρ) pelo calor específico (c) do material, expressa a habilidade de armazenar calor e propicia a diferença de temperatura devido ao ganho ou perda de calor sensível (OKE et al., 2017). A capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor é determinada por:

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad \frac{J}{m^2 \cdot K} \quad (11)$$

Sendo e a espessura em metros.

A capacidade térmica dos materiais de superfície tem impacto semelhante nas temperaturas máxima e mínima das superfícies, como a condutividade térmica. Alta capacidade térmica diminui a temperatura média máxima das superfícies mas, ao mesmo tempo, aumenta a média mínima (SANTAMOURIS, 2013).

A alta capacidade térmica de materiais de superfície urbana também contribui para a ilha de calor noturna, uma vez que grande parte da radiação recebida durante o dia é armazenada nesses materiais e não liberada até a noite (OKE et al., 1991).

b) condutividade térmica (λ) em W/(m.K)

É a habilidade de uma substância de conduzir densidade de fluxo de calor (W/m^2) ao passar energia de uma molécula para outra em dado gradiente de temperatura (K/m). Condutividade térmica alta significa que grande quantidade de calor é transmitida em um dado gradiente de temperatura, enquanto baixos valores implicam que pouco calor irá ser conduzido no mesmo gradiente de temperatura (OKE et al., 2017).

A condutividade térmica e a capacidade térmica são os principais parâmetros adicionais que afetam o desempenho térmico das superfícies. O aumento da condutividade térmica das superfícies contribui para transferir mais rapidamente o calor desta para o meio (SANTAMOURIS, 2013).

c) difusividade térmica (α)

É a razão da condutividade térmica de um material (λ) pela sua capacidade de armazenar energia térmica (C) (ABNT, 2005), ou seja, é o quão fácil a temperatura é transmitida pelo material. Ela controla o tempo em que a troca de temperatura leva para percorrer o material e ajuda a estimar a profundidade da camada envolvida nas trocas térmicas. Consequentemente, a velocidade da atividade térmica está diretamente relacionada com sua habilidade de conduzir, mas inversamente proporcional à quantidade de calor necessário para aquecer ou resfriar a substância. Materiais com altos valores de difusividade térmica permitem penetração rápida das mudanças da temperatura superficial e uma camada espessa está envolvida, enquanto baixa difusividade térmica significa que as trocas estão restritas às camadas superficiais, ou seja, pouco profundas (OKE et al., 2017).

$$\frac{\alpha = \lambda}{C} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) \quad (12)$$

d) admitância térmica (μ)

Também chamada de “inércia térmica” (OKE et al., 2017), é a taxa de fluxo de calor entre a superfície interna de um elemento ou componente construtivo e o ar, por unidade de variação de temperatura (ABNT, 2005). Para materiais de construção o valor envolve a condutividade térmica e capacidade térmica.

A admitância térmica é a propriedade térmica mais importante no clima urbano porque ela é diretamente relacionada com a habilidade do sistema de armazenar calor e com a amplitude da curva de temperatura de superfície. Além disso, essa propriedade governa o particionamento da energia entre os dois meios (ex: ar e material construtivo). Quando a admitância térmica de um material de superfície é alta, a maior parte do calor de superfície que entra é usada para aquecer o substrato (ou seja, é armazenado), e relativamente pouco é deixado para aquecer a atmosfera. Então, superfícies com alta admitância térmica acumulam calor no material e há relativamente pouca mudança na temperatura de superfície durante o dia, isto é, tem

pequena variação na temperatura de superfície diurna. Porém, superfícies com baixa admitância térmica armazenam menos calor; sua temperatura de superfície tem grande amplitude e essas superfícies liberam grande quantidade de calor para a atmosfera.

A admitância térmica para o solo ou para os materiais construtivos é dada por:

$$\mu = \sqrt{\lambda C} = C\sqrt{\alpha} \left(\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} \right) \quad (13)$$

A difusividade térmica e a admitância térmica dependem dos valores de capacidade térmica e condutividade térmica, sendo essas duas propriedades térmicas mais importantes e que somadas com as propriedades radiantes e com a geometria urbana são responsáveis pelo aquecimento de áreas urbanas.

2.6 Temperatura radiante média (trm) como variável microclimática

A radiação solar e o sombreamento desempenham papéis mais importantes do que a Tar e a velocidade do vento ao se mensurar o conforto térmico, especialmente durante o verão (CHENG et al., 2012; YANG et al., 2011). A preponderância da troca radiante em condições de clima quente tem sido reconhecida por diversos pesquisadores (FAZIA ALI-TOUDERT; MAYER, 2006; MATZARAKIS; RUTZ; MAYER, 2007, 2010; MAYER; HOPPE, 1987; PEARLMUTTER; BITAN; BERLINER, 1999; THORSSON; LINDBERG, 2007).

A temperatura radiante média (TRM) é um dos mais importantes parâmetros meteorológicos, que rege o balanço energético humano e o conforto térmico no ambiente externo (ALI-TOUDERT; MAYER, 2006; MAYER; HOPPE, 1987). É definida como a "temperatura uniforme de um invólucro imaginário no qual a transferência de calor radiante do corpo humano é igual à transferência de calor radiante no invólucro não uniforme real" (ASHRAE, 2001). Em estudos térmicos para espaços abertos, a TRM é um parâmetro mais adequado do que parâmetros convencionais como a Tar, uma vez que apresenta grandes variações espaciais em curtas distâncias, o que é particularmente importante no complexo ambiente urbano (ALI-TOUDERT; MAYER, 2007).

Seu valor é dado em °C e é influenciado não só pelo sombreamento entre os edifícios, mas também pelas propriedades térmicas e radiantes dos materiais no seu

entorno. Entre as variáveis relacionadas ao conforto térmico, a TRM se mostrou determinante e está sendo estudada como a variável mais importante na determinação de mortes relacionadas com o calor (THORSSON et al., 2014).

Espaços ao ar livre que compõem o ambiente urbano diferem fundamentalmente de um ambiente fechado; pedestres experimentam grandes flutuações nos estímulos térmicos devido à radiação, de duas formas. A primeira delas é a radiação de onda curta, emitida a partir da superfície extremamente quente do sol e comumente chamada de luz solar, embora cerca de metade dessa radiação esteja na faixa não visível, próxima ao infravermelho do espectro. A segunda é a radiação de ondas longas (ou térmica), que é emitida pela atmosfera e por superfícies terrestres de baixa temperatura que nos cercam no ambiente construído. Ambas as formas de radiação podem ser expressas em termos da taxa na qual a energia é absorvida (ou emitida) por uma área unitária da superfície do nosso corpo (W/m^2), e combinada como uma troca líquida total de radiação R_n entre o corpo e ambiente urbano (Figura 22) (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011):

$$R_n = (K_{dir} + K_{dif} + K_h + K_v)(1 - \rho_s) + L_d + L_h + L_v - L_s \quad (14)$$

Nessa equação, a porção de onda curta do balanço de radiação dos pedestres R_n é subdividida nos seguintes componentes:

- K_{dir} – Radiação direta de ondas curtas incidente no corpo humano;
- K_{dif} – Radiação difusa de ondas curtas incidente no corpo;
- K_h – Radiação indireta incidente no corpo, refletida de superfícies horizontais;
- K_v – Radiação indireta incidente no corpo, refletida de superfícies verticais.
- ρ_s - Albedo da pele e/ou roupas e a proporção de toda a radiação incidente de onda curta que é absorvida pelo corpo.

Na mesma equação, a radiação de ondas longas é subdividida como:

- L_d – Radiação de onda longa incidente no corpo, emitida para baixo pelo céu;
- L_h – Radiação de onda longa incidente no corpo, emitida pelas superfícies horizontais;

- L_v – Radiação de onda longa incidente no corpo, emitida por superfícies verticais;
- L_s – Radiação de ondas longas emitida pelo corpo para o meio ambiente.

Todos os componentes de radiação acima representam fontes de energia que cumulativamente aquecem o corpo, exceto pela emissão de ondas longas do próprio corpo - o que representa resfriamento e, portanto, é um termo negativo na equação.

Figura 22 - Representação esquemática das trocas de radiação entre um pedestre e o ambiente urbano circundante.

Fonte: Erell, Pearlmutter e Williamson (2011), baseado em Monteih e Unsworth (1990), Pearlmutter, Berliner e Shaviv (2006) e Pearlmutter, Bitan e Berliner (1999).

Em regiões de latitude média, os pedestres são os que mais sofrem com o estresse térmico devido ao superaquecimento ao meio do dia no verão. É durante esse período que a radiação solar (isto é, ondas curtas) é mais intensa, e a extensão em que pessoas e superfícies estão expostas a essa radiação é provavelmente o fator determinante do conforto térmico nos espaços da cidade. O corpo de um pedestre pode ficar sem sombra e, portanto, exposto aos raios solares que chegam diretamente da direção do sol (ou seja, radiação direta). Pode também absorver a energia solar indiretamente, por meio de radiação difusa que é espalhada pela atmosfera e, assim, chega de toda a abóbada celeste, ou devido ao reflexo da luz solar das superfícies adjacentes do edifício e do solo (radiação refletida). A radiação de ondas curtas do sol também aquece o corpo de uma forma ainda mais indireta, elevando a temperatura das superfícies adjacentes e aumentando a emissão de radiação de ondas longas.

A radiação direta é decisivamente influenciada pela geometria, ou seja, pela geometria tridimensional do espaço urbano e pela geometria solar (posição relativa do sol no céu em determinado momento e local).

Uma pessoa em pé entre edifícios e outros elementos em um espaço urbano é exposta à radiação de ondas longas que é emitida de cada uma dessas superfícies verticais, bem como do solo e do céu. A extensão da exposição do pedestre à emissão de cada uma dessas fontes dependerá da temperatura e da emissividade da respectiva parte do ambiente ao redor e de seu fator de visão correspondente.

2.6.1 Métodos para estimar a TRM

Uma maneira de se estimar a TRM em espaço urbano complexo é usando termômetros de globo, que foram originalmente desenvolvidos para se estimar TRM em ambientes fechados. O cálculo da TRM pela temperatura do globo é baseado em um equilíbrio presumido entre o balanço de radiação e a troca de calor convectiva do globo. No entanto, o tempo de resposta térmica da esfera metálica (20 a 30 minutos) costuma ser muito lento para que esse equilíbrio seja mantido na prática, quando exposto a condições externas que mudam rapidamente (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011).

Para superar esse problema, uma versão distinta do termômetro globo vem sendo adotada nos últimos anos. Ela compreende um globo cinza de acrílico de 38mm de diâmetro, geralmente uma bola de pingue-pongue, com acabamento cinza (RAL 7001) para aproximar a absorção típica da pele e da roupa. A temperatura do globo, que é tomada para representar a temperatura média da superfície externa da esfera, é medida colocando-se um sensor de temperatura no centro da esfera. No entanto, o cálculo da TRM com base nessa temperatura requer estimativa precisa da temperatura e velocidade do ar no entorno imediato e é bastante sensível à assimetria de radiação e outras variáveis. A equação dada pela ISO 7726 (1998) é:

$$TRM = \left[(T_g)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 v_a^{0.6}}{\varepsilon_g D^{0.4}} (T_g - T_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273.15 \quad (15)$$

onde T_g é a temperatura do globo ($^{\circ}\text{C}$), v_a é a velocidade do ar (m/s), T_a é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), D é o diâmetro do globo (mm) e ε_g é a emissividade do globo.

Um outro meio de se obter a TRM é por dados medidos de densidade de fluxo de radiação de onda longa e curta nas três dimensões humanas: N-S, L-O e acima e

abaixo. Uma terceira possibilidade é a simulação em modelos computacionais como ENVI-met ou SOLWEIG.

Os valores de TRM são determinados pela geometria do edifício, albedo das fachadas e solo e cobertura vegetal, componentes que podem ser efetivamente alterados por intervenções no desenho urbano. A variação espacial de TRM pode ser usada para identificar áreas e pontos vulneráveis ao aquecimento em ambiente urbano complexo e propiciar subsídios para o desenho urbano (CHEN et al., 2016). Ela pode ser a variável mais adequada para caracterizar diferenças intraurbanas de condições de conforto térmico em comparação com variáveis meteorológicas tradicionais, como Tar, especialmente em ambiente urbano complexo.

Nos estudos de Lindberg, Onomura e Grimmond (2016), tipos de cobertura de pavimentos naturais e construídos são comparados com áreas com sombras com o uso do modelo SOLWEIG. Os resultados sugerem que a alteração dos materiais de superfície do solo não é uma medida tão eficaz como o sombreamento para reduzir a carga radiante durante episódios de ondas de calor. No entanto, alterar os materiais da superfície do solo pode contribuir para redução significativa da TRM em áreas onde a sombra não é uma opção. Já para Johansson (2006) a TRM para uma pessoa em pé no meio da rua foi o parâmetro mais fortemente ligado à relação A/L.

Lai, Maing e Ng (2017) estudaram como a geometria urbana, representada pelo FVC, influencia a TRM diurna através dos fluxos radiantes de ondas longas e curtas no espaço aberto, quando em condições de sombra, a fim de melhorar ainda mais o conforto térmico exterior. Os resultados sugerem que a temperatura de superfície do entorno tem maior relevância para valores de TRM externo sob área sombreada. A Tar explicou 74% das variações na TRM, e em torno de 25% da variação na TRM pode ser atribuída a outros fatores microclimáticos urbanos tais como entorno edificado, por exemplo, disposição dos edifícios e o material do entorno. O resultado também mostrou que há alta dependência da TRM da radiação solar global no momento da medição e que em ambientes sombreados o controle da TRM se dá pelo controle do fluxo de radiação de ondas longas.

Nos espaços exteriores urbanos, a TRM é primariamente determinada pela geometria do edifício, desenho da rua, albedo de fachada e solo e cobertura vegetal. Esses componentes podem ser efetivamente alterados por intervenções de projeto. Portanto, entender como a variação espacial da TRM é afetada por diferentes

configurações urbanas é importante e pode proporcionar implicações valiosas para o desenho e planejamento urbano sensível ao clima (CHEN et al., 2016).

2.7 Conclusões do capítulo

As cidades já apresentam fenômeno de aquecimento local, que é a ilha de calor urbana, resultante, dentre outras causas, da densidade construída, ou seja, dos edifícios altos e cânions urbanos estreitos que aumentam a temperatura à noite devido ao aprisionamento da radiação de onda longa. Mas, ao mesmo tempo, a alta densidade construída gera mais sombreamento entre edifícios fazendo com que a T_{ar} , das superfícies e a temperatura média radiante sejam menores durante o dia. Portanto, uma questão a ser investigada é como geometria e materialidades em arranjos densos influenciam o microclima urbano.

A geometria é importante, pois, por meio dela se obtém o sombreamento no entorno edificado durante o dia e ela também define o aprisionamento dos fluxos de radiação de onda curta e longa. A materialidade influencia na inércia térmica e nas trocas radiantes superficiais. Portanto, quando se fala em efeito da densidade construída tem que ser estudado o efeito tanto da geometria edificada quanto da materialidade.

Os meios mais usados para se quantificar a geometria urbana em estudos microclimáticos são fator de visão de céu (FVC), relação A/L e orientação das vias. A relação A/L, mesmo que muito utilizada, é difícil de ser aplicada na representação da densidade edificada com torres espaçadas, que é a configuração mais comum nas cidades brasileiras. A relação A/L serve como descritor das cidades europeias onde a maioria das edificações é em formato perimetral. Já o FVC serve melhor como descritor do tipo torre. A orientação das vias serve para ambos os casos.

As superfícies urbanas em estudos climáticos são descritas pelas suas propriedades termo radiantes, sendo que a mais estudada é o albedo. As trocas radiantes e são as que têm maior influência nos índices de conforto térmico, sendo representadas pela variável temperatura radiante média (TRM). A emissividade também é importante para as trocas radiantes, mas como há pouca variação nos seus valores para materiais de construção, ela acabou sendo menos estudada.

Os valores do albedo não variam somente com o tipo de material superficial, mas também com a geometria edificada, isso porque o aprisionamento de calor nos cânions urbanos aumenta consequentemente a absorção de calor pelas superfícies

devido às múltiplas reflexões em um cânion urbano. Assim, geometria e materialidade se unem na determinação dos efeitos da densidade construída no microclima urbano.

Dada a condição climática da cidade de São Paulo, a complexidade da geometria urbana e a lacuna de conhecimento existente entre a influência da densidade construída no microclima urbano para essa cidade, este trabalho abordará o impacto da geometria urbana, materialidade (o tipo de material e componente construtivo) e superfícies (no caso, o albedo) no microclima urbano tendo como variável principal de comparação a temperatura radiante média.

3 VERTICALIZAÇÃO E O CLIMA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

3.1 A verticalização no município de São Paulo

São Paulo, ao longo dos anos, sofreu alterações na legislação urbanística que contribuíram para as diferenças na densidade construída e na geometria urbana edificada presentes nos diferentes bairros. Até 1930 as ações urbanísticas foram pautadas por planos, a partir de 1972 pela lei de zoneamento e, entre 1934 e 1972, houve uma mescla entre planos e zoneamento (NOTO, 2017).

Em 1934 o código de Obras Arthur Saboya manteve os limites de altura vinculados à largura das vias, mas permitiu o escalonamento dos edifícios até o teto de 80m em algumas vias. Logo depois, em 1940, o prefeito Prestes Maia, com o decreto lei nº 41, estabeleceu gabaritos mínimos em algumas vias do centro do município, de 22m e 39m, permitindo a verticalização até 115m nos lotes de meio de quadra e de até 135m nos lotes de esquina na avenida Ipiranga, além de uma certa liberdade de altura nos chamados “pontos focais de grande interesse arquitetônico”, como nos cruzamentos entre avenidas (CAMPOS, 2019; NOTO, 2017; SOMEKH, 2014), por exemplo, entre 1929 e 1957, 60% dos edifícios da cidade apresentam de 5 a 10 vezes a área do lote e cerca de 20% mais do que 10 vezes a área do lote (DEVECCHI, 2010).

Em 1957, com a Lei Municipal 5.261, tem-se a primeira menção ao coeficiente de aproveitamento (CA) de 6 para edifícios comerciais e de 4 para edifícios residenciais. De acordo com Campos (2019), essa legislação foi muito burlada até que, em 1966, o CA residencial foi igualado ao comercial e passou a ser 6 também. Essa lei veio ao encontro do adensamento intenso na zona central que estava aumentando mais do que os investimentos em infraestrutura na cidade.

De 1966 a 1971, com a “ameaça” da lei de zoneamento, o crescimento econômico e a origem do Banco Nacional de Habitação (BNH), há um aumento na verticalização da cidade para além dos distritos Sé e República (NOTO, 2017; SOMEKH, 2014). Em 1972 foi aprovada a Lei Geral de Zoneamento (Lei 7085/1972 e, posteriormente, sua alteração para a Lei 8001/1973) e, em 1975, o Código de Obras (Lei 8266/1975). Os edifícios novos passaram então a não ser mais regidos pelo conjunto preexistente, mas, sim, pelo lote, com a taxa de ocupação e coeficientes de aproveitamento regendo a sua forma, em nome de um controle na densidade

populacional e melhorias na ventilação e iluminação dos edifícios, além de aumentar a taxa de permeabilidade, liberando o solo (NOTO, 2014).

Com o controle de uso da terra com base no coeficiente de aproveitamento, a verticalização se espalhou na cidade para bairros mais distantes do centro até 1988, em um processo iniciado desde 1957, de “desverticalização” (SOMEKH, 2014).

De 1988 a 2004 têm-se já as operações urbanas (Lei 10.209/1988) em que se introduziu, pela primeira vez, a outorga onerosa, um mecanismo de retorno, para a municipalidade, da valorização que os imóveis adquirem mediante o aumento de seu potencial construtivo. Neste período há um aumento na verticalização mediante negociação por meio da outorga onerosa. De 2005 a 2012, com modificações no zoneamento (para se atingir o CA máximo de 4 há que se pagar obrigatoriamente a outorga onerosa, e isso é válido apenas para algumas zonas) e a escassez de outorga onerosa nos distritos de maior procura, a verticalização se distribui pela área metropolitana, ampliando os deslocamentos pendulares (GAGLIOTTI, 2013; SOMEKH, 2014). Na prática, as mudanças nas legislações de 1957, 1972 e 2004 reduziram o potencial construtivo, favorecendo a dispersão da verticalização, que chega até a região metropolitana (GAGLIOTTI, 2013).

A redução do CA e a oneração do potencial construtivo incentivou a incorporação de áreas não computáveis nas edificações como o caso das varandas *gourmets*, produzindo plantas residenciais nas quais, na maioria das vezes, a varanda se torna o cômodo maior da residência e seu fechamento é feito por vidros, permitidos após a obra, criando um espaço de uso interno, e não mais de transição, desconfortável do ponto de vista do conforto térmico e que afeta negativamente as condições de conforto na unidade residencial como um todo (ALVES, 2019).

A partir de 2014 foram aprovados o Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo (PDE, 2014), Lei 16.050/2014, a Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo (LPUOS, 2016), Lei 16.402/2016, e o Código de Obras e Edificações (COE, 2017), Lei 16.642 de 2017, todas em vigor atualmente. No zoneamento se mantiveram os coeficientes de aproveitamento 4 (máximo) apenas para outorga onerosa, sendo que 87% do território apresenta, na nova lei, coeficiente de aproveitamento máximo de 2 (São Paulo, 2018), e a maior parte do território, coeficiente de aproveitamento básico de 1.

3.2 O clima no município de São Paulo

O município de São Paulo tem população de 11.253.503 habitantes e ocupa área de 1.523,3 km², sendo um dos municípios constituintes da região metropolitana mais populosa do país com um total de 22 milhões de habitantes (UN, 2018) e com uma área de 7.947,3 km² (IBGE, 2011) (Figura 23). O município situa-se na latitude 23°33'01" Sul e na longitude 46°38'02" Oeste. O clima de São Paulo é típico das regiões subtropicais do Brasil, com invernos secos de junho a agosto e verões úmidos de dezembro a março (OLIVEIRA et al., 2002).

Figura 23 – Localização do município de São Paulo.

(a) Localização do Estado de São Paulo no Brasil e na América do Sul, (b) da região metropolitana no estado e (c) do município na região metropolitana. Fonte: São Paulo (2004).

De acordo com dados mais recentes da UN (2018), a aglomeração urbana de São Paulo é a quinta mais populosa do mundo junto com a cidade do México, ficando atrás de Tóquio (Japão), Nova Déli (Índia) e Shangai (China).

A região metropolitana de São Paulo está localizada em um platô de 700m e a 50 km a Oeste do oceano Atlântico. No Oeste e no Sudoeste da região metropolitana há um maciço de aproximadamente 900 m de altitude. O platô é quase todo rodeado

por um terreno elevado de 800 a 1200 m e as características mais importantes são a cadeia montanhosa a 1200 m de altitude ao Norte e uma escarpa a 800 m ao Sul (Figura 24). Mesmo com a localização a 50 km do oceano Atlântico e a 700 m acima do nível do mar, a frente da brisa marítima é acoplada à circulação vale-montanha na Escarpa Sul e atinge a área urbana (DIAS; MACHADO, 1997).

Figura 24 - Topografia da região metropolitana de São Paulo.

(a) Topografia da região metropolitana de São Paulo. A linha tracejada branca marca a localização da seção transversal vertical (b) Topografia do domínio mais interno. A letra S corresponde a estações de superfície. (c) Topografia da seção vertical sobre a Linha tracejada branca. Polígono vermelho representa classes de terra urbana e suburbana na RMSP. Fonte: Ribeiro et al. (2018).

A região metropolitana de São Paulo é influenciada por três circulações termicamente dirigidas: brisa marítima, ilha de calor urbana (ICU) e vale-montanha. Após analisar dados de vento de 11 estações de superfície, os autores notaram que, em média, a brisa marítima atinge o platô da região metropolitana mais de 50% dos dias do ano. Sendo que a direção mais frequente do vento é a Sudeste (SE). Concluíram também que a ilha de calor urbana e a circulação vale-montanha são mais importantes quando os ventos estão fracos (OLIVEIRA; BORNSTEIN; SOARES, 2003)

Ferreira et al. (2012) avaliaram intensidade da ilha de calor na região metropolitana de São Paulo no ano de 2004 e encontraram intensidade máxima no período da tarde e intensidade mínima no início da manhã. Uma Ilha de Resfriamento Urbano (UCI - *Urban Cool Island*) foi observada de maio a junho. Ribeiro et al (2015) observaram comportamento similar, embora tenham notado que a propagação da brisa marítima poderia ter impacto na intensidade da ilha de calor urbano (ICU). Segundo Oliveira, Bornstein e Soares (2003), a brisa marítima pode ser identificada como fator para diminuição na Tar, para aumento na umidade específica e, na velocidade do vento, mudança na direção de NE-NO para SE. Presença de maior intensidade da ilha de calor no período da tarde em São Paulo pode ter relação com passagem da brisa marítima pela região rural ao Sul da cidade de São Paulo que faz diminuir temperatura na área rural (RIBEIRO et al., 2018).

Ribeiro et al. (2018) investigaram a propagação da brisa marítima na camada limite urbana da região metropolitana de São Paulo e identificaram que, no verão, a brisa marítima atinge a área central urbana às 17h, causando diminuição da temperatura em 3,1K e uma mudança na direção do vento em 140°. No inverno, observaram que a propagação da brisa marítima ocorre mais cedo e mais rápido do que no verão, atingindo a área central urbana às 15h e causando uma diminuição na temperatura em 4K, em média. A presença da brisa marítima tem um efeito mitigador na intensidade da ilha de calor urbana ao diminuir a Tar, o que aumentaria o conforto térmico durante o verão e aumentaria a umidade durante o inverno predominantemente seco da região metropolitana de São Paulo.

A seguir tem-se a análise dos dados climáticos do município de São Paulo obtidos da Estação Meteorológica do IAG-USP (Água Funda), localizada no Parque CienTec - Parque de Ciência e Tecnologia da Universidade de São Paulo, uma das instituições que constituem o Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (antigo Parque do Estado), Bairro da Água Funda, São Paulo, SP, latitude 23,6512°S, longitude 46,6224°W e altitude de 799,2m, dados estes disponíveis no Boletim Climatológico Anual da Estação Meteorológica do IAG/USP (Boletim Climatológico Anual da Estação Meteorológica do IAG/USP (IAG/USP, 2017).

De acordo com a média climatológica (1933-2017) que corresponde ao período de funcionamento da estação, a temperatura média mensal do ar para os meses de verão ultrapassou os 20°C, já para os meses de inverno foi abaixo dos 17°C (Figura 25). Já a temperatura média máxima mensal do ar para os meses de verão ultrapassou

os 25°C e para os meses de inverno ficou abaixo de 23°C (Figura 26). A temperatura média mínima mensal para os meses de verão ultrapassou os 15°C e, para os meses de inverno ficou em torno dos 10°C (Figura 27). Nota-se no gráfico que o mês de Abril de 2016 apresentou temperatura média mensal e média mensal máxima bem acima do que a média climatológica para o mesmo período e também mais alta do que a média climatológica para os meses de verão.

Figura 25 - Temperatura média mensal do ar para 2016 e 2017, normais, média 1991-2017 e média climatológica.

Fonte: IAG/USP (2017).

Figura 26 - Temperatura média máxima mensal para 2016 e 2017, valores diários extremos para cada mês observados em toda a série (1933-2017), além das normais e da média climatológica. No eixo X, há indicativo do ano de ocorrência dos valores extremos de cada mês.

Fonte: IAG/USP (2017).

Figura 27 – Temperatura média mínima mensal para 2016 e 2017, valores extremos diários observados para cada mês, em toda a série (1933-2017), além das normais e da média climatológica. No eixo X, há indicativo do ano de ocorrência dos valores extremos de cada mês.

Fonte: IAG/USP (2017).

De acordo com as figuras acima, a temperatura média mensal do ar na estação de monitoramento aumentou 2,3°C entre 1933 e 2017. Já a temperatura média máxima do ar aumentou 2,1°C no mesmo período e a temperatura média mínima do ar apresentou aumento de 2,4°C (IAG/USP, 2017), demonstrando tendência de aumento da Tar na estação meteorológica ao longo dos 84 anos de medição.

A média climatológica (1933-2017) para os dados de precipitação mensal acumulada (Figura 28) evidencia a característica climática do município de inverno seco e verão úmido com precipitação mensal acima de 150 mm nos meses de verão e abaixo de 50 mm nos meses de inverno. Nota-se que o mês de abril de 2016 apresentou precipitação mensal bem abaixo da média climatológica, com valores próximos a zero.

Figura 28 – Precipitação mensal acumulada nos anos de 2016 e 2017, além das normais e da média climatológica.

Fonte: IAG/USP (2017).

A umidade relativa média mensal de acordo com a média climatológica (1957-2017) para os meses de verão é acima de 80% e, para os meses de inverno, abaixo de 80%, sendo agosto o mês com valores mais baixos, abaixo de 78% (Figura 29). A Figura 30 mostra o número de dias com umidade relativa do ar abaixo de 30% por mês, dentre os quais os meses de agosto e setembro foram os que apresentaram

mais dias nessas condições, com uma média de 5 dias com umidade relativa do ar abaixo dos 30%. Nota-se que o mês de abril de 2016 apresentou umidade relativa bem abaixo da média climatológica.

Figura 29 - Umidade relativa do ar média mensal para os anos de 2016 e 2017, além da normal e da média climatológica.

Fonte: IAG/USP (2017).

Figura 30 – Número de dias com umidade relativa abaixo de 30% em 2016 e 2017, além da média e da normal climatológica.

Fonte: IAG/USP (2017).

Com relação à velocidade média do vento a Figura 31 mostra que os meses com maiores velocidades do vento são de setembro a janeiro com valores acima de 1,94 m/s (7 km/h), o que não é um valor muito alto. A velocidade média do vento fica entre 1,66 m/s (6 km/h) e 2,22 m/s (8 km/h) durante o ano. Já a frequência da direção média do vento é predominantemente de SE e SSE (Figura 32), conforme indicado pela média climatológica (1957-2017). Nota-se que o mês de abril de 2016 apresentou velocidade média do vento bem abaixo da média climatológica e dos valores obtidos para o mesmo mês em 2017.

Figura 31 – Velocidade média mensal do vento (Km/h) nos anos de 2016 e 2017, além da normal e da média climatológica.

Fonte: IAG/USP (2017).

Figura 32 - Frequência da direção média do vento nos anos de 2016 e 2017, além da frequência média 1957-2017.

Fonte: IAG/USP (2017).

Com relação à irradiação solar global (Figura 33), a média climatológica aponta que os valores seguem a sazonalidade, sendo maiores nos meses do verão e menores dos meses de inverno. Nota-se que o mês de abril de 2016 apresentou valores maiores de irradiação global do que a média climatológica para o mesmo período.

Figura 33 – Irradiação solar global para os anos de 2016 e 2017, além da normal e da média climatológica.

Fonte: IAG/USP (2017).

O município de São Paulo apresenta verões quentes e chuvosos e invernos secos, com o equinócio de outono apresentando temperaturas média e precipitação mais altas do que o equinócio de primavera. A velocidade do vento sofre pouca variação ao longo do ano e o vento predominante é sudeste, há influência da brisa marítima no período vespertino.

O período de verão, por ser o mais chuvoso, traz uma limitação às medições de campo, pois com a presença de nebulosidade e precipitação, valores de radiação umidade e ventos passam a ser específicos daquele evento climático. Ele seria a representatividade do que seria o extremo com maior irradiação solar global, mas a presença de muitas nuvens interfere nos dados. Já o período de inverno que é mais seco é também o que apresenta menor irradiação solar global. Já os períodos próximos aos equinócios, representam o meio termo entre os dois solstícios, e uma condição média com relação a temperatura do ar e irradiação solar, além do que a

maior parte do ano se passa próximo dessas condições, podendo ser meses mais representativos para as medições de campos e estudos microclimáticos visando planejamento urbano.

4 MATERIAL E MÉTODO

O processo metodológico do trabalho é indutivo, com as medições de campo, a leitura em paralelo com as estações de referência no município de São Paulo, a modelagem e calibração do modelo com base nas medições de campo e a simulação dos cenários paramétricos. O modelo ENVI-met utilizado é um modelo dedutivo, assim, como forma de raciocínio amplo tem-se a indução e para gerar os resultados tem-se um modelo de simulação que por definição é um modelo dedutivo. Abaixo tem-se o fluxograma da metodologia do trabalho (Figura 34).

Figura 34 - Fluxograma do método

Fonte: elaborado pela própria autora

4.1 Modelo Envi-Met V4.4.3

Dentre as razões para alterações climáticas provocadas pela urbanização estão armazenamento de calor, aprisionamento da radiação, aumento da rugosidade e menor evaporação, fenômenos que são vistos em qualquer cidade do mundo, em menor ou maior grau, mas que são mais evidentes em megacidades densamente construídas (KATZSCHNER, 2010). Para o estudo desses fenômenos, um dos modelos mais promissores atualmente é o ENVI-met.

O modelo ENVI-met é um modelo tridimensional que simula interações entre superfície-vegetação-atmosfera e permite analisar, numa perspectiva de microescala, a interação entre desenho urbano e microclima (BRUSE, 2017). Ele calcula efeitos no microclima urbano por meio das variáveis: radiação, reflexão da radiação por edifícios e vegetação, fluxo do ar, temperatura, umidade, turbulência local e sua taxa de dissipação. Também determina temperaturas de superfície (pisos e envoltória dos edifícios), as trocas de água e calor dentro do solo e parâmetros biometeorológicos. A versão 4 do modelo tem como principais avanços o fato da modelagem poder ser construída num formato 3D, permitindo ao usuário especificar propriedades físicas em cada elemento individualmente nas fachadas dos edifícios; avanços no cálculo de temperatura da fachada e no balanço de energia dos fechamentos verticais, levando em consideração a inércia térmica das fachadas; a inclusão das propriedades físicas das fachadas, que incluem dados de reflexão, absorção, transmissão, emissividade, condutibilidade térmica, calor específico e a espessura do componente construtivo; a ferramenta *forcing*, onde é possível informar a variação hora a hora das variáveis atmosféricas e, por fim, a implementação de um banco de dados 3D de vegetação permitindo definição da vegetação arbórea de forma mais elaborada (HUTTNER, 2012; SIMON, 2016).

Para qualquer simulação que se faça no modelo, é essencial calibração prévia para se verificar a resposta do mesmo aos parâmetros de entrada, sob as mesmas condições climáticas na área de estudo; em outras palavras, para se verificar se os resultados da simulação se assemelham aos dados medidos *in loco*. Só assim é possível maior confiabilidade no modelo computacional para realização de estudos preditivos, sejam eles paramétricos ou de proposições de projeto para áreas reais.

O ENVI-met V4.4.3 é um modelo holístico tridimensional não-hidroestático para simulação de interações superfície-vegetação-atmosfera (Figura 35), frequentemente

usado para simular ambientes urbanos. Ele é projetado para microescala com resolução horizontal típica de 0,5 a 10 m e um período de 24 a 48 horas com intervalo de tempo de 1 a 5 segundos. Essa resolução permite analisar interações em pequena escala entre edifícios, superfícies e plantas (BRUSE, 2017).

O cálculo do modelo inclui:

- Fluxos de radiação de ondas curtas e longas;
- Transpiração e evaporação da vegetação para o ar, incluindo simulação completa de todos os parâmetros físicos da planta (por exemplo, taxa de fotossíntese);
- Cálculo dinâmico da temperatura superficial e da temperatura da parede para cada fachada e elemento de cobertura, suportando até 3 camadas de materiais e 7 pontos de cálculo na parede ou teto;
- Intercâmbio de água e calor dentro do sistema de solo, incluindo captação de água da planta.
- Representação 3D da vegetação, incluindo modelagem dinâmica do balanço hídrico de cada espécie;
- Dispersão de gases e partículas. O modelo suporta partículas (incluindo sedimentação e deposição em folhas e superfícies), gases inertes e gases reativos do ciclo de reação monóxido de nitrogênio (NO) - dióxido de nitrogênio (NO₂) - ozônio (O₃).
- Cálculo de índices biometeorológicos: temperatura média radiante, PMV / PPD, PET e UTCI.

Figura 35 - Arquitetura do modelo.

Fonte: Bruse (2017)

A versão 4 apresenta três tipos diferentes de licenças: *Lite*, *Science* e *Business*. A *Lite* é para iniciantes no modelo e simulações microclimáticas simplificadas (50 X 50 grades); a *Science* para estudantes, pesquisadores e universidades e a *Business* para arquitetos, paisagistas, planejadores urbanos e outros profissionais para serviços de consultoria. Nesse trabalho será utilizada a licença *Science*⁸. No Quadro 2 constam ferramentas do modelo disponíveis para cada tipo de licença.

⁸ O Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT) da FAU-USP adquiriu a licença *Science* com recursos de reserva técnica da bolsa estágio de pesquisa no exterior (BEPE – FAPESP processo 2016/01204-7) da então pós-doutoranda Paula Shinzato (FAPESP processo 2014/50978-0) em 11/2016. Como o *full forcing* se tornou disponível a partir de jan/2019, o autor do modelo, Prof. Dr. Michael Bruse, concedeu a extensão da licença apoiando o desenvolvimento de dissertações e teses em andamento.

Quadro 2 - Ferramentas do modelo disponíveis para cada tipo de licença.

	LITE	SCIENCE	BUSINESS
	iniciantes, testes	universidades *estudantes	arquitetos, paisagistas, planejadores urbanos e outros usos profissionais
Tipo da licença	usuário individual	até 50 assentos	até 5 assentos
Uso comercial	—	—	X
Tamanho do modelo	50x50x40	ilimitado	ilimitado
Modelo microclimático holístico com modelagem da vegetação em 3D (Albero)	X	X	X
Software com edição de banco de dados, construção do modelo, análise de resultados e visualização	X	X	X
Simulação paralela em múltiplas cores	—	X	X
Dados de saída dos processos físicos detalhados dos edifícios (temperatura das fachadas e fluxos de energia, microclima no envelope do edifício, interior do edifício dividido por zonas)	—	X	X
Coberturas e fachadas verdes	—	X	X
Inserção d'água para resfriamento evaporativo (fontes d'água e aspersores de névoa)	X	X	X
<i>Simple-forcing</i> (para valores de temperatura e umidade do ar a 2m do solo, para um ciclo de 24 horas)	X	X	X
<i>Full-forcing</i> (todas as variáveis, incluindo velocidade e direção do vento)	—	X	X
Modelo de fachada com 7 nós e 3 camadas com cálculos prognósticos da temperatura interior	X	X	X
Análise de acesso solar (horas de sol e sombra nas fachadas e pisos)	—	X	X
Dispersão de poluentes	—	X	X
Análise da radiação em alta resolução	—	X	X
BioMet (índices de conforto)	—	—	X
Suporte personalizado	—	—	X

* A Licença para estudantes contém todos os recursos da Licença *Science*, mas apenas para um único usuário e sem a possibilidade da simulação em paralelo nos vários núcleos da CPU.

O modelo principal (Figura 36) tem três dimensões, duas horizontais (x e y) e uma vertical (z). Dentro deste modelo principal, os elementos da área de interesse são colocados: edifícios, vegetação e diferentes tipos de superfícies. A área de interesse deve ser formatada em grades. Quanto menor for a grade, mais fina será a resolução do modelo e mais células serão necessárias para cobrir determinada área.

Como o armazenamento numérico de memória disponível é limitado, várias estratégias são usadas no ENVI-met para conseguir mais espaço usando menos grades. Uma delas foi o uso de um Modelo 1D adicional. Para permitir simulação precisa de processos de camada limite, é necessário estender o modelo até altura de 2500m no mínimo (altura média da camada limite planetária). Como não é possível e não é necessário estender o modelo 3D completo até essa altura, o modelo 1D assume o cálculo a partir do topo do modelo 3D até o topo total do modelo a 2500m. Além disso, o modelo 1D fornece perfis verticais de todas variáveis do modelo para limite de entrada do modelo 3D, como T_{air} , umidade específica, vetores de vento (horizontal), energia cinética e troca turbulenta (BRUSE, 2017).

Já o modelo de solo calcula a transferência de calor das superfícies para o solo e vice-versa. Além disso, a parte hidrológica do modelo de solo fornece informações importantes sobre a água disponível dentro do solo. Esses dados são necessários para estimar a evapotranspiração máxima da vegetação e a evaporação da água disponível na superfície do solo.

Figura 36 - Modelo principal 3D.

Fonte: Bruse (2017)

Na estrutura básica do modelo 3D, é possível ter dois tipos de grades verticais: uma grade equidistante (A), onde todas as grades, exceto as cinco mais baixas, têm extensão vertical idêntica Δz , e uma grade telescópica (B1, B2 e C), onde o tamanho da grade se expande com a altura (Figura 37). A grade equidistante tem o mesmo espaçamento sobre todas as camadas verticais. Apenas a grade mais baixa é dividida em 5 subgrades com $\Delta z_s = 0,2 \Delta z$. Essa grade deve ser usada se o domínio do modelo é de altura limitada e resultados a serem obtidos em todas as alturas devem ter mesmo nível de detalhamento.

A grade telescópica permite cobrir modelos com alturas maiores. Essa grade deve ser usada se o domínio do modelo tiver objetos altos como arranha-céus. Porém, ao usar modelo de grade vertical, resultados obtidos nas grades superiores do modelo podem ser menos detalhados do que aqueles das inferiores. Na

Figura 37, têm-se três opções de grades telescópicas que podem ser aplicadas nas áreas a serem simuladas. Na grade telescópica B1, é possível especificar tamanho da grade mais baixa acima da superfície (não é dividida em subcaixas) e porcentagem de aumento para próxima caixa (fator de extensão s). Na B2, é possível especificar determinada altura a partir da qual o fator de extensão deve começar e todas as camadas abaixo desse nível serão espaçadas com uma constante e, acima da altura especificada, o telescópico começará como descrito antes. Embora a opção C tenha sido gerada com o método de grade telescópica, é a grade menos telescópica disponível. Para se gerar uma grade vertical sem dividir a grade mais baixa em cinco subgrades, usa-se método de grade telescópica com um fator de extensão de $s = 0$.

Figura 37 - Diferentes conceitos para organizar o layout da grade vertical.

(A) grade equidistante, (B) grade telescópica e (C) grade telescópica sem fator de extensão. Fonte: Bruse (2017)

4.1.1 Modelo atmosférico

O ENVI-met inclui modelo completo de dinâmica de fluidos (CFD) 3D para cálculos de ventilação. Os efeitos da vegetação são incluídos como forças de arrasto no campo de vento. O fluxo do vento perto de cada fachada e segmento do telhado é calculado na simulação detalhada da física do edifício.

A Tar e a umidade específica do ar são determinadas pelas diferentes fontes de calor sensível e vapor dentro do domínio do modelo. A superfície do solo e as folhas da vegetação atuam como fontes ou sumidouros para temperatura e umidade no modelo atmosférico. Paredes e coberturas atuam principalmente como superfícies que trocam calor com a atmosfera, mas também podem atuar como fontes de umidade se fachadas ou coberturas verdes forem aplicadas.

O ENVI-met contém módulos de análise desenvolvidos recentemente para modelar fluxos de radiação de ondas curtas e longas dentro de ambientes complexos. O esquema considera sombreamento por geometrias complexas, reflexos por diferentes materiais de superfície e de construção e o efeito da vegetação em todos os fluxos radiativos.

O modelo de dispersão de poluentes do ENVI-met permite a liberação, dispersão e deposição de até 6 diferentes poluentes incluindo partículas, gases passivos e gases reativos. Sedimentação e deposição em superfícies e na vegetação são consideradas, bem como a reação fotoquímica entre monóxido de nitrogênio (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂) e ozônio (O₃).

No modo padrão do ENVI-met V4.4.3 e na versão anterior as variáveis meteorológicas são definidas pelos seguintes parâmetros de inicialização, no arquivo de configuração:

- posição geográfica e tempo (radiação solar);
- velocidade do vento horizontal a 10m acima do solo;
- direção do vento;
- rugosidade (sob o anemômetro);
- Tar inicial;
- umidade específica na parte superior do modelo (H = 2500m);
- umidade relativa a 2m acima do solo;
- temperatura inicial do solo;
- cobertura de nuvens (em oitavas).

Com esses valores de inicialização o programa primeiro calcula modelo 1D que se estende desde o nível do solo até altura de 2500m acima do solo. Do solo para o topo do modelo 3D, o modelo 1D tem o mesmo espaçamento do modelo 3D. O modelo 1D é então integrado até que o perfil vertical de todas as variáveis (velocidade do vento, turbulência, Tar, umidade específica) esteja em estado quase estacionário, ou seja, na mesma condição do nascer/pôr do sol, onde teoricamente a atmosfera estará em condição de estabilidade estática, quando a Tar é igual à temperatura potencial. Na sequência, esse modelo 1D é usado para iniciar o modelo 3D (HUTNER, 2012).

Durante a execução da simulação, o cálculo das variáveis atmosféricas dentro da área do modelo 3D depende fortemente das condições de contorno (*Lateral Boundary Condition - LBC*) adotadas para simulação. Esse tipo de inicialização do modelo tem a vantagem de que poucas variáveis meteorológicas têm que ser conhecidas para se iniciar uma simulação; porém, dessa forma o modelo não é capaz de produzir variações diurnas realistas para maioria das variáveis meteorológicas. As variações diurnas são altamente idealizadas e, muitas vezes, nem sequer reproduzem dias com condições meteorológicas estáveis, com precisão (HUTNER, 2012).

Um modo de minimizar erros causados pelas simulações com poucos dados iniciais de entrada foi introduzir ferramenta que utilizasse mais dados de entrada, no caso, a ferramenta *forcing*. Nela, as variáveis que podem ser forçadas, são:

- velocidade do vento horizontal;
- direção do vento;
- temperatura do ar;
- umidade específica;
- radiação de onda curta direta;
- radiação de onda curta difusa;
- radiação de onda longa;
- cobertura de nuvens.

Além de duas exceções, essas variáveis podem ser forçadas independentemente umas das outras e em qualquer combinação escolhida. As duas exceções são:

- Nebulosidade e radiação não podem ser utilizadas ao mesmo tempo, uma vez que a cobertura de nuvens tem influência direta sobre balanço de radiação.
- Velocidade e direção do vento estão diretamente ligadas, não sendo possível forçar apenas uma delas, pois uma depende sempre da outra.

As variáveis atmosféricas (velocidade e direção do vento, Tar e umidade específica) são forçadas pelo menos a dois níveis de altura: no nível do solo ($z = 0$) e no topo da área do modelo 1D ($z = 2500\text{m}$). Valores para os outros níveis de altura são interpolados pelo modelo.

O forçamento da radiação pode ser conseguido ajustando-se valores para cobertura de nuvens, com o ENVI-met calculando radiação recebida na altura do modelo ou fornecendo valores medidos para radiação de onda curta direta e difusa recebida, bem como radiação de onda longa.

As variáveis direção do vento, temperatura potencial e umidade do ar são assumidas como constantes em altura e os valores nas camadas limite inferior (0m) e superior (2500m) são tomados próximos aos níveis para os quais os dados foram informados.

A velocidade do vento é sempre assumida como 0m/s ao nível do solo (0m), e extrapolada de forma logarítmica até o topo do modelo, a 2500m, com base nos valores próximos ao nível para o qual foram fornecidos os dados. Essa extrapolação é feita automaticamente pelo ENVI-met usando interpolação linear para temperatura e umidade específica e interpolação logarítmica para velocidade do vento.

Se o ENVI-met encontrar seção de forçamento no arquivo de configuração, ele lê todo o arquivo e salva todas variáveis. Na inicialização, assim como durante a simulação, o modelo verifica entre quais passos de forçamento está a simulação no momento, interpola os valores em conformidade - temporalmente e espacialmente - e grava os valores no perfil 1D que são então copiados para células nos limites de entrada da área do modelo (Figura 38). O mesmo perfil 1D é usado para todas células de modo que as condições meteorológicas são as mesmas em todas as células dos limites de entrada (HUTNER, 2012).

Figura 38 - Fluxograma da ferramenta *forcing* no ENVI-met.

Fonte: Hunter (2012).

Devido à interpolação temporal linear, o intervalo de tempo entre os forçamentos não deve ser muito grande, isto é, maior do que uma hora, por recomendação dos desenvolvedores.

4.1.2 Modelo do ambiente edificado e demais superfícies urbanas

O novo editor do ENVI-met V4.4.3 incorpora formato de dados 3D completo, bem como ferramenta de edição 3D; assim, edifícios e outras estruturas podem ser construídos em 3D. O novo formato de arquivo usa grade tridimensional para definir quais células de grade são ocupadas por edifícios e quais materiais de fachada são usados; para isso, é necessário preencher três campos de dados (x, y, z) e essas informações são salvas em arquivo binário. As direções da parede são definidas de acordo com a direção da normal à superfície (HUTNER, 2012) (Figura 39).

Figura 39 - Exemplo da grade tridimensional para paredes.

Fonte: Hutner (2012)

A edição desse novo formato de arquivo permite modificar cada célula da grade. O editor oferece visualização 3D que permite ao usuário olhar e trabalhar em sua área de modelo de todos os ângulos possíveis; o usuário pode atribuir material específico a cada elemento de fachada para cada célula da grade e obter a visualização correspondente. Diferentes materiais de parede e cobertura podem ser representados por diferentes cores ou texturas (HUTNER, 2012).

Em modelos 2.5D, a grade vertical é gerada com base na altura das edificações do modelo e sua configuração pode ser alterada a qualquer momento. Em modelos 3D completos a grade vertical é fixa a partir do momento em que o modelo foi criado. A única maneira de mudá-la é converter para modelo 2.5D (e perder todas as informações 3D extras), alterar configurações de grade e, em seguida, convertê-lo novamente para 3D. Em suma, ao se criar um modelo 3D, deve-se pensar na configuração da grade vertical em detalhes, antes de começar a editar o modelo (BRUSE, 2017).

A modelagem 3D permite simulação de espaços semiabertos e elementos avulsos que podem ser utilizados para representar espaços que são fechados por paredes e/ou coberturas, mas não se comportam como um edifício, como, por exemplo, pontos de ônibus e estruturas de sombreamento, toldos ou estruturas semelhantes que não preenchem uma célula de grade inteira. Antes da introdução dos elementos individuais, tais elementos tinham que ser negligenciados ou abordados colocando-se um edifício na célula da grade (HUTNER, 2012).

Os elementos avulsos no ENVI-met (Figura 40) têm as mesmas propriedades físicas que as paredes convencionais que, conforme os edifícios são obstáculos sólidos para vento e turbulência, mas podem transmitir radiação. Esses elementos avulsos, no entanto, não usam as mesmas rotinas de cálculo de temperatura que as

paredes e coberturas. A principal diferença é a suposição de que os elementos avulsos são finos e, portanto, têm distribuição de temperatura mais homogênea.

Figura 40 - Exemplo dos elementos avulsos.

Fonte: Hutner (2012)

O ENVI-met permite parametrizar cada parede e cobertura de um edifício. Paredes podem ser compostas por 3 camadas de diferentes materiais com propriedades físicas individuais. Cada segmento da parede e cobertura é representado por seu próprio modelo termodinâmico que consiste em 7 nós de cálculo. A temperatura do nó exterior é atualizada continuamente em relação às variáveis meteorológicas na fachada e ao estado térmico dos edifícios e outros objetos no seu entorno. O estado térmico dos nós da parede interna é calculado a partir das propriedades físicas atribuídas a ela com base na lei de Fourier⁹ de condução de calor (BRUSE, 2017).

O precursor do modelo de sete nós foi o de três nós, sendo um nó no exterior, um no meio e um no interior do componente, quando as paredes (ou coberturas) eram compostas por estrutura uniforme construída a partir de um único material (Figura 41). Em comparação com a abordagem de estado estacionário usado na versão 3 do modelo ENVI-met, o modelo de três nós produziu resultados muito melhores nas temperaturas de superfície (HUTNER, 2012). No entanto, devido à restrição de apenas três nós e, portanto, a um material na parede, estruturas nas quais uma parede consiste em camadas de materiais diferentes não poderiam ser replicadas sem parametrizações das propriedades individuais de cada material (SIMON, 2016).

⁹A lei de Fourier estabelece que o fluxo de calor através de um material é proporcional ao gradiente negativo de temperatura.

Figura 41 - Esquema do modelo de 3 nós.

Fonte: Hutner (2012)

No modelo de sete nós é permitida a construção de até três camadas diferentes de materiais de espessuras variadas. Cada material é editado com suas propriedades físicas (absorção, transmissão, reflexão, emissividade, calor específico, condutividade térmica e densidade). Os nós são colocados no centro e nas bordas de cada material, assim, uma parede com três materiais tem sete nós. A Figura 42 mostra esquema do novo modelo de paredes e coberturas; pontos vermelhos simbolizam diferentes nós, localizados no centro e nas bordas laterais de cada material (SIMON, 2016).

Figura 42 - Esquema do modelo de 7 nós.

Fonte: Simon (2016)

Com a atualização para o modelo de 7 nós, o banco de dados de materiais permite criar materiais ou editar propriedades físicas dos já existentes. As propriedades que podem ser editadas, tanto para os novos materiais como para os existentes, são: absorção, transmissão, reflexão, emissividade, calor específico, condutividade térmica e densidade. A seção de paredes e coberturas permite criar

manualmente ou editar componentes com até três materiais diferentes, com espessuras e características próprias que podem ser parametrizadas (Figura 43).

Figura 43 - Edição de um componente com 3 materiais.

Fonte: Autora

Com relação à temperatura interna, o ENVI-met estima dinamicamente no edifício como resultado dos fluxos de entrada e saída através dos segmentos de parede e cobertura adjacentes, mas sem considerar ventilação natural. Essa simulação é executada paralelamente à simulação de microclima ao ar livre para cada edifício no domínio do modelo, de modo que é fornecida resposta constante entre condições climáticas externas e estimativa das condições internas e interações com outros edifícios.

4.1.3 Dados de entrada

Na versão mais atual, a V4.4.3 Summer 19 há uma ferramenta chamada ENVIguide que une todos os dados necessários para simulação. O primeiro dado solicitado é dia e horário do início da simulação e o período que ela irá durar; a partir disso é solicitado o arquivo .INX no qual o modelo foi desenhado com a ferramenta

SPACE. Nesse momento pode-se fazer prévia da quantidade de radiação direta e difusa que irá incidir no modelo no período de 24 horas. Após isso, o usuário tem a opção de escolher três níveis de simulação: iniciante, intermediário e avançado. Cada um deles permite a inserção de níveis mais básicos de dados atmosféricos até mais avançados. O Quadro 3 apresenta itens que podem ser alterados em cada nível:

Quadro 3 - Níveis da simulação.

	Iniciante	Intermediário	Avançado
Temperatura do ar	min. e max.	min. e max., <i>simple</i> ou <i>full forcing</i> : horária.	min. e max., <i>simple</i> ou <i>full forcing</i> : horária.
Velocidade do vento	média diária	<i>simple forcing</i> : valor inicial a 10m. <i>full forcing</i> : horária (opcional).	<i>simple forcing</i> : valor inicial a 10m. <i>full forcing</i> : horária (opcional).
Direção do vento	predominante	<i>simple forcing</i> : valor inicial. <i>full forcing</i> : horária (opcional)	<i>simple forcing</i> : valor inicial. <i>full forcing</i> : horária (opcional)
Rugosidade abaixo do anemômetro	_____	<i>simple forcing</i>	<i>simple forcing</i>
Umidade relativa	_____	min. e max., <i>simple</i> ou <i>full forcing</i>	min. e max., <i>simple</i> ou <i>full forcing</i>
Umidades e temperaturas iniciais em camadas do solo	_____	opcional: o modelo calcula, mas permite edição.	opcional: o modelo calcula, mas permite edição.
Dispersão de poluentes	_____	opcional: o modelo calcula, mas permite edição.	opcional: o modelo calcula, mas permite edição.
Condição de nuvens	_____	<i>simple forcing</i> : opcional, o modelo calcula, mas permite edição.	<i>simple forcing</i> : opcional, o modelo calcula, mas permite edição.
Radiação (onda curta direta e difusa e onda longa)	_____	<i>full forcing</i> : opcional.	<i>full forcing</i> : opcional

Além das citadas acima, o nível avançado traz também outras opções de edição:

- *background* da concentração de poluentes;
- temperatura no interior dos edifícios;
- alta resolução da radiação (*Indexed View Sphere – IVS*);
- intervalo de tempo para salvar dados;
- condições da vegetação;
- diminuição dos *timesteps* para evitar instabilidade;
- ajuste no intervalo de tempo para a atualização de alguns processos;
- ajuste da radiação solar (somente no *simple forcing*);
- *lateral boundary condition* (somente no *simple forcing*);
- ajuste no *flowsteps* mínimo e no *inflow*;
- escolha do campo de pressão;
- escolha do método de cálculo para a resistência do vento nas fachadas;
- escolha do modelo de turbulência;
- opção de usar *single core* ao invés do *multi core*.

4.1.4 Banco de dados

O gerenciador de banco de dados do ENVI-met é o aplicativo central para organizar diferentes tabelas de dados, desde materiais de construção sobre perfis de solo até fontes de poluentes. Ele oferece conjunto de ferramentas para fornecer acesso aos dados armazenados em seu sistema e ajuda a visualizar, editar e adicionar conjuntos de dados (BRUSE, 2017).

O banco de dados do modelo é formado por pastas onde são armazenadas especificações técnicas dos seus componentes: materiais de construção, perfis de solo, plantas e fontes de emissão de poluentes que serão utilizados nas simulações. As pastas são divididas por temas, incluindo: perfis de solo, materiais, paredes, elementos avulsos, plantas simples, fontes de emissão e localização.

Para cada componente que for utilizado nas simulações, o mesmo tem que já existir no banco de dados ou tem que ser criado no banco com suas características específicas. Abaixo, tem-se a descrição dos parâmetros necessários para criação de componente do banco de dados em cada pasta (Quadro 4).

Quadro 4 - Parâmetros para a criação de componentes no banco de dados.

Solos - diferentes tipos de solos que podem ser utilizados no perfil de solos	
Parâmetro	Unidades
Umidade do solo no ponto de saturação	$\text{m}^3(\text{água})/\text{m}^3(\text{solo})$
Umidade do solo na capacidade de campo	$\text{m}^3(\text{água})/\text{m}^3(\text{solo})$
Umidade do solo no ponto de murcha	$\text{m}^3(\text{água})/\text{m}^3(\text{solo})$
Potencial matricial	m
Condutividade hidráulica	$\text{m/s} \cdot 10^{-6}$
Capacidade térmica volumétrica	$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) \cdot 10^{-6}$
Constante de Clapp & Hornberger	-----
Condutibilidade térmica	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Perfil de solo - camada vertical com diferentes tipos de solo	
Parâmetro	Unidades
Rugosidade	m
Albedo	0-1
Emissividade	0-1
Materiais - que podem ser utilizados em paredes e coberturas	
Parâmetro	Unidades
Espessura	m
Absorção	0-1
Transmissão	0-1
Reflexão	0-1
Emissividade	0-1
Calor específico	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
Condutibilidade térmica	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Densidade	kg/m^3
Paredes - conjunto de materiais que compõe parede ou cobertura, compostos de 3 camadas	
Parâmetro	Unidades
Espessura das camadas	m
Parâmetro	Unidades
Material	(pasta de materiais)
Espessura	m
Plantas simples - plantas 1D	
Parâmetro	Unidades
Tipo de fixação de CO ₂	----- (Ex: C3, ...)
Tipo de folha	----- (Ex: decíduas, ...)
Albedo	0-1
Altura	m
Profundidade da raiz	m
Densidade foliar (LAD)	1/10
Densidade de Raiz (RAD)	1/10
Fontes de emissão - perfil de emissão para diferentes fontes de poluentes	
Parâmetro	Unidades
Altura padrão	m
Geometria do emissor	Ex: pontos
Perfil de emissão (horário, para 24h)	Microg/s, Microg/(s*m), Microg/(m ² *s)
Localização - locais geográficos para localizar cada simulação	
Parâmetro	Unidades
Latitude	graus
Longitude	graus
Fuso horário	(Ex: GMT-3)
Altitude	m

4.1.5 Dados de saída

Há dois tipos de arquivos de dados de saída, o arquivo de texto simples e os arquivos binários. Os arquivos principais estão armazenados no formato binário e necessitam ser lidos pela ferramenta Leonardo que oferece visualização 2D e 3D dos resultados. O modelo apresenta 10 arquivos com dados de saída que são nomeados de acordo com os tipos de dados fornecidos: Atmosfera, Edifícios, Entrada, Log, Poluentes, Radiação, Receptores, Solos, Acesso solar e Superfície.

O arquivo **Atmosfera** contém todas informações sobre o estado da atmosfera do primeiro nível acima do solo até o topo do modelo 3D, em diferentes momentos da simulação, e nele está o maior conjunto de dados de saída do modelo. Os dados de superfície não fazem parte dos dados da atmosfera, mas dos arquivos de superfície e fluxo. No APÊNDICE consta lista de variáveis de saída do arquivo atmosfera.

A pasta **Edifícios** contém dados ao longo da superfície dos edifícios. Inclui dados estáticos como material, albedo (subpasta STATIC), bem como dados dinâmicos de meteorologia ao longo dos edifícios e dados físicos dos edifícios (subpasta DYNAMIC). No APÊNDICE há lista de variáveis de saída da pasta Edifícios.

A pasta **Inflow** fornece dados sobre o modelo 1D de entrada do ENVI-met usado para representar o ambiente do domínio do modelo. O estado do modelo 1D é salvo sempre que os dados principais do modelo são salvos. O Apendice B apresenta lista de variáveis de saída da pasta Inflow.

O arquivo **Log** contém cópia de todos dados de saída gerados durante execução do modelo.

A pasta **Poluentes** contém dados sobre concentração de poluentes na atmosfera do modelo e estará presente apenas se forem utilizados poluentes na simulação. O APÊNDICE apresenta lista de variáveis de saída da pasta Poluentes.

Na pasta **Radiação** encontram-se dados detalhados sobre diferentes fluxos de radiação no modelo.

No arquivo **Receptores** ficam séries temporais e dados de perfil nos pontos dos receptores (se inseridos). Dados estão subdivididos em atmosféricos, de superfície/fluxos e solos. No APÊNDICE está lista de variáveis de saída da pasta Receptores.

No arquivo **Solos** consta estado do solo do modelo e suas variáveis (APÊNDICE).

No arquivo **Acesso Solar** existe análise detalhada de dados de acesso solar como horas de sol; arquivos estão em formato “.edi” acessados com modelo Leonardo.

Na pasta **Surface** há o estado da superfície como interface entre atmosfera e modelo de solo. As variáveis de saída encontram-se no APÊNDICE.

O modelo ENVI-met apresenta quantidade grande de dados de saída que auxilia estudos microclimáticos com e sem vegetação e, com e sem presença de fontes poluidoras. Para o foco desta pesquisa, o efeito da geometria e das superfícies construídas no microclima urbano, os dados de saída mais relevantes estão nas pastas Atmosfera e Superfície; os dados da pasta Receptores são também importantes para calibração do modelo.

4.1.6 Estudos com o modelo ENVI-met

Alguns estudos já foram realizados para calibração do modelo na nova versão 4 e demonstraram bons resultados. Trabalhos desenvolvidos no LABAUT (Laboratório de conforto ambiental e eficiência energética) da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, mostraram boa correlação entre dados medidos e simulados para Tar na versão 4 para cidade de São Paulo (GUSSON; DUARTE, 2016a, 2016b, 2016c; DUARTE *et al.*, 2015, 2014; GUSSON, 2014). Pesquisas em outras cidades de clima tropical como Belo Horizonte (FRANCISCO, 2012) e Putrajaya na Malásia (QAID *et al.*, 2016), também obtiveram resultados satisfatórios para Tar. A experiência com a ferramenta *full forcing* obtidas por Shinzato *et al.* (2019) mostraram boa correlação entre dados medidos e simulados, principalmente pelo uso de dados de entrada de radiação horários.

Salata *et al.* (2016) testaram a V4 para Roma e, utilizando mesmos dados de entrada, compararam resultados obtidos com a versão 3; na V4, observaram valores de Tar mais altos durante as horas mais quentes do dia e temperaturas mais baixas durante as horas mais frias do dia, em comparação com a versão anterior. Isso demonstra melhora nos resultados de Tar na V4, já que na versão anterior a amplitude térmica simulada no modelo era sempre menor do que a medida. Com relação aos valores da temperatura radiante média, a V4 diminui a tendência observada na versão anterior de superestimar os valores da mesma, principalmente na presença da radiação solar direta, mostrando melhora dessa versão em relação à anterior.

Com relação aos valores simulados para temperatura de superfície, a nova versão de sete nós apresentou resultados satisfatórios tanto para temperatura interna

do ar quanto para temperatura da superfície das fachadas (SIMON, 2016). A Figura 44 mostra visualização do modelo Leonardo com resultado dos testes para temperatura de superfície dos edifícios.

Figura 44 - Temperatura das superfícies dos edifícios na simulação teste.

Fonte: Simon (2016)

A calibração de variáveis como temperatura do solo em diferentes profundidades, fluxo de calor do solo na superfície, temperatura da superfície do solo, além de temperatura e umidade do ar em 0,2 e 1,5m acima do solo também foram realizadas em Guangzhou (China) para os seguintes tipos de superfície: concreto, azulejo, asfalto e grama. Os resultados mostram que o modelo ENVI-met V4 é capaz de modelar o desempenho térmico de diferentes superfícies do solo e seus efeitos na temperatura e na umidade do ar local nos dias quentes de verão, com boa precisão (YANG *et al.*, 2013).

4.1.7 Conclusões do capítulo

A nova versão do modelo apresenta ferramentas que possibilitam o cálculo mais preciso das relações entre superfícies urbanas construídas e microclima urbano. Esses avanços contribuem para esta pesquisa e possibilitam maior acurácia nos dados obtidos.

Com a licença *Science* do modelo adquirida pelo LABAUT em 11/2016 por dois anos e estendida até 09/19 pelo autor do modelo, Prof. Dr. Michael Bruse, para a utilização do *full forcing* (disponível a partir de 01/19) e para apoiar as pesquisas já em

andamento no laboratório, foi possível a inserção mais completa de dados de entrada e a obtenção de dados de saída detalhados dos processos físicos nas superfícies edificadas.

O modelo tem apresentado bons resultados nas calibrações, mas é importante que, dependendo da densidade construída, seja feita nova calibração antes do desenvolvimento de estudos preditivos para determinada localidade. Dessa forma, medições microclimáticas foram realizadas na área de estudo para uma nova calibração do modelo, agora levando em consideração as diferentes superfícies edificadas e a ferramenta *full forcing*, visando avanços na predição de novos cenários edificados e seus impactos no microclima das cidades.

4.2 Calibração do modelo ENVI-met V4.4.3

4.2.1 Definição das áreas de estudo

De acordo com dados obtidos por Longarine (2018) a partir do Mapa Digital da Cidade - MDC (SÃO PAULO, 2008), o município de São Paulo apresenta duas regiões com predomínio de quadras com coeficiente de aproveitamento maior do que 5 (mapa no ANEXO D): uma está localizada na área central, do entorno do Vale do Anhangabaú até a região da praça da República, e a outra, ao longo da avenida Paulista (Figura 45).

Figura 45 - Área de estudo.

Fonte: Google Earth (agosto, 2019).

Na área central os distritos República e Sé são os que apresentam maior densidade construída, fruto de legislações urbanísticas mais antigas e que, em muitos casos, culminaram em edificações construídas muito próximas, contribuindo para ventilação e insolação insuficientes e locais insalubres. Já a área no entorno da Paulista, que compreende os distritos da Bela Vista, Consolação e Jardim Paulista, apresenta quadras com uma ocupação mais recente do que a área central, com edifícios mais espaçados, o que propicia melhor ventilação e insolação.

Assim, dentre essas duas alternativas, a área de estudo escolhida foi a do eixo da Avenida Paulista, em uma área que pertence a dois distritos: Jardim Paulista e Bela Vista, onde se encontram edifícios tanto de escritórios, envidraçados, quanto residenciais, em alvenaria, com umas das maiores densidades construídas do município de São Paulo, com edifícios mais espaçados e não justapostos como na área central e com a Bela Vista abrigando a maior densidade populacional residente, de 279 hab/ha (Figura 46).

Para a calibração do modelo foram instaladas duas estações meteorológicas na área, sendo uma próxima ao parque Trianon, no distrito do Jardim Paulista, no miolo de uma quadra com predomínio de edifícios comerciais, e a outra no distrito da Bela Vista, no miolo de uma quadra com predomínio de edifícios residenciais. Na Figura 47 e na Figura 48 apresentam-se perspectivas com a localização das 2 estações.

Figura 46 - Densidade populacional e construída no município de São Paulo (por distritos).

Fonte: Gusson, Madeira, Duarte (2012) baseados em ¹IBGE (2011) e ²SMDU (2008).

Figura 47 - Perspectiva com os dois locais de medição.

Fonte: Google Earth (outubro, 2016)

Figura 48 - Foto aérea dos dois locais de medição: entorno imediato em vermelho e a área do modelo para simulação em amarelo

Fonte: Google Earth (janeiro, 2019).

4.2.2 Medições microclimáticas nas áreas de estudo

Foram realizadas medições microclimáticas de acordo com guia WMO (2014) nas duas áreas de estudo, Edifício Siena e Edifício Paulista I, do dia 05 ao dia 25 de abril de 2016. Segundo dados do Boletim IAG, de abril de 2016 (IAG-USP, 2016), devido ao bloqueio atmosférico, esse foi o mês de abril com mais dias com temperatura acima de 30,0°C: foram 21 dias sob essas condições, caracterizando o mês de abril com mais dias de calor e o mais seco desde 1933. As medições foram feitas para que, posteriormente, seus dados sejam comparados com os dados obtidos na mesma situação urbana, com o modelo ENVI-met V4.4.3, para se fazer a calibração dos dados de entrada.

As variáveis coletadas nos levantamentos de campo foram: temperatura do ar (Tar, em °C), umidade relativa do ar (UR, em %), velocidade do vento (V.V, em m/s), sua direção (em graus a partir do Norte verdadeiro) e temperatura de globo cinza (Tg, em °C). As estações ficaram ininterruptamente nos dois locais durante todo o período. Também foram coletadas temperatura de superfície (°C) em datas pontuais.

O LABAUT tem duas estações meteorológicas Campbell¹⁰. As duas estações incluem: um tripé TW Tripod/ Mast Assembly 1,5m, um Measurement and Control Datalogger CR800-ST-SW-NC, e os sensores: Gill 2-D Sonic Wind WINDSONIC1-L24 (localizado a 1,5m dos solo), Vaisala Temperature/RH HMP45C-L12, Kipp & Zonen Pyranometer W / Sun Shield CMP3-L12, Solar Sensor Mounting Stand CM22, Temp Probe 108-L12, CSC Blackglobe-L15 Temperature Sensor For Heat Stress e Globo Cinza com sensor de temperatura Hobo TMCx-HD (Quadro 5). Os dados referentes à sensibilidade dos equipamentos, dentre outras informações, encontram-se no Anexo A.

¹⁰ Adquiridas com recursos dos projetos “O Impacto da vegetação nos microclimas urbanos: estudo quantitativo da intensidade, da distribuição espacial e da área de abrangência dos efeitos microclimáticos da vegetação urbana” – CNPq 400643/2010-3 e “Microclima urbano e conforto térmico em espaços abertos: estabelecimento de relações por meio de simulações computacionais e levantamentos empíricos na cidade de São Paulo” - CNPq 479563/2009-8. Posteriormente foram incluídos painéis solares com recursos do projeto “O impacto da vegetação nos microclimas urbanos: quantificação do índice de área foliar por dois métodos indiretos não-destrutivos” - CNPq 480636/2013-3. Os sensores Hobo TMCx-HD foram adquiridos com recursos do projeto “O papel do planejamento, do desenho urbano e do projeto de edifícios na adaptação à mudança do clima na microescala. Contribuições a uma abordagem interdisciplinar” – FAPESP 2016/02825-5 e com a reserva técnica da bolsa de doutorado da Paula Shinzato (FAPESP processo 2010/51125-0).

Quadro 5 - Sensores utilizados na estação meteorológica.

Instrumentação	Descrição dos instrumentos	Acurácia
Measurement and Control Datalogger CR800-ST-SW-NC	_____
Tripé TW Tripod/ Mast Assembly 1,5m	_____
Gill 2-D Sonic Wind WINDSONIC1- L24	Direção: +/- 3° Velocidade: +/-2%
Vaisala Temperature/RH HMP45C- L12	+/- 0,25°C
Kipp & Zonen Pyranometer W / Sun Shield CMP3-L12 / Solar Sensor Mounting Stand CM22	+/- 5%
CSC Blackglobe-L15 Temperature Sensor For Heat Stress e Temp Probe 108-L12	Globo: +/- 0,1°C Termômetro: +/- 0,3 °C
Globo cinza (diâmetro = 17cm) com sensor de temperatura Hobo TMCx- HD.	Termômetro: +/- 0,2 °C

Fonte: Elaborado pela autora

Para as imagens com a lente grande angular foram utilizadas câmera fotográfica Canon EOS 6D e lente Sigma 8mm F3.5 EX DG Circular Fisheye. As especificações da lente encontram-se no Anexo B.

As estações foram instaladas no miolo das quadras de interesse em ambas as áreas, por questões de segurança e por estes serem os locais com menor influência de ventos canalizados pelas vias adjacentes (WMO, 2014).

Na Bela Vista, a estação foi instalada no térreo de um edifício residencial localizado na quadra mais densamente construída dentro do distrito, circundada pelas vias: Rua São Carlos do Pinhal, Rua Pamplona, Alameda Ribeirão Preto e Alameda Campinas (Figura 49). O fator de visão de céu calculado com o modelo Rayman foi de 0,13 (Figura 50).

Figura 49 - Bela Vista: localização da estação meteorológica.

Fonte: a) *Google Earth* (janeiro, 2020), b) Fotos da autora (abril, 2016).

Figura 50 - Bela Vista: grande angular e fator de visão do céu do ponto onde foi colocada a estação

Fonte: Elaborado pela própria autora (abril, 2018).

Na área da Av. Paulista, a estação foi instalada no térreo de um edifício comercial, localizado na quadra circundada pelas vias: Avenida Paulista, Rua Pamplona, Alameda Santos e Alameda Casa Branca (Figura 51). O fator de visão de céu calculado com o modelo Rayman foi de 0,36 (Figura 52).

Figura 51 - Paulista: localização da estação meteorológica.

a) Estação meteorológica ●

b)

Fonte: a) *Google Earth* (janeiro, 2020) e b) Foto da autora (abril, 2016)

Figura 52 - Paulista: grande angular e fator de visão do céu do ponto onde foi colocada a estação.

Fonte: Elaborado pela própria autora (abril, 2018).

Os dados levantados e considerados para o trabalho foram de Tar ($^{\circ}\text{C}$) (Gráfico 1), umidade relativa do ar (%) (Gráfico 2), temperatura de globo cinza ($^{\circ}\text{C}$) (Gráfico 3), radiação solar (W/m^2) (Gráfico 4), velocidade e direção do ar (m/s) (Gráfico 6) das duas áreas de estudo: Bela Vista e Paulista no período entre 05 e 25 de abril de 2016.

Ao analisar os dados de Tar medidos (Gráfico 1), observa-se que a Tar no ponto Bela Vista apresenta valores mais altos do que o ponto Paulista entre 10h15 e 12h15; já o ponto Paulista apresenta valores mais altos do que o Bela Vista entre 13h e 19h30. A diferença média da Tar foi de $1,3^{\circ}\text{C}$ para mais no Bela Vista, às 10h30, e de $1,3^{\circ}\text{C}$ a mais no Paulista, às 13h30, sendo que a diferença foi maior no ponto Bela Vista no dia 07/04/16 às 10h30, com $2,4^{\circ}\text{C}$ a mais do que no ponto Paulista. Já no ponto Paulista a maior diferença de temperatura com relação ao Bela Vista ocorreu no dia 12/04/16 às 13h15 com $2,3^{\circ}\text{C}$ para mais em relação ao ponto Bela Vista.

As médias das temperaturas máximas foram de $30,8^{\circ}\text{C}$ no ponto Paulista e de $30,2^{\circ}\text{C}$ no ponto Bela Vista, sendo que o valor mais alto foi de 32°C no ponto Paulista, no dia 09/04/16 às 13h15 e de $31,3^{\circ}\text{C}$ no ponto Bela Vista, no dia 15/04/16 às 11h45, essa pequena diferença nas temperaturas máximas deve-se às diferenças no fator de visão de céu, na Paulista de 0,36 e, na Bela Vista, de 0,13, sendo esse mais sombreado do que o ponto Paulista.

Gráfico 1 - Tar nas duas áreas de medição: Paulista e Bela Vista.

Fonte: Elaborado pela própria autora

Gráfico 2 - Umidade relativa do ar nas duas áreas de medição: Edifício Paulista e Bela Vista.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Ao se analisar o Gráfico 3, observa-se maior amplitude da temperatura de globo cinza, no ponto Paulista se comparado ao da Bela Vista, provavelmente devido ao maior tempo de exposição a valores mais elevados de radiação solar. O ponto Bela Vista apresenta maior sombreamento relacionado à presença de edifícios altos, que obstruem parte da abóbada celeste e conferem a ele menor FVC.

A radiação solar direta atinge a estação entre 10h15 e 12h15 no ponto Bela Vista e entre 10h30 e 13h30 no ponto Paulista. A média dos máximos valores de radiação solar no ponto Paulista é de $804,22 \text{ W/m}^2$ e no ponto Bela Vista de $804,53 \text{ W/m}^2$, sendo que o valor mais alto encontrado para o ponto Paulista foi de 862 W/m^2 no dia 14/04/16 às 12h30 e, no ponto Bela Vista, de 851 W/m^2 no dia 14/04/16 às 12h (Gráfico 4).

Ao se analisar o gráfico de velocidade do ar nas duas áreas (Gráfico 5), observa-se que o ponto Paulista tem velocidades mais altas do ar do que o ponto Bela Vista, o que pode estar relacionado ao fato da área de medição no Paulista estar situada em um platô, no nível da Avenida Paulista, cerca de 10 m de altura da Alameda Santos e 5m de altura do ponto Bela Vista, e ser um ponto mais desobstruído, com maior FVC. Já a área da medição no ponto Bela Vista localiza-se na quadra mais densamente construída desse distrito e do município de São Paulo, com edifícios no seu entorno que medem, em média, 45m de altura e em um terreno mais baixo que o ponto Paulista, com valores médios de $0,62 \text{ m/s}$ no ponto Paulista e de $0,47 \text{ m/s}$ no ponto Bela Vista, assim como valores máximos de $1,82 \text{ m/s}$ no ponto Paulista e de $1,3 \text{ m/s}$ no ponto Bela Vista. Já a direção do ar predominante nos dois pontos (Gráfico 6) é bem diversa devido à heterogeneidade da malha urbana ao redor dos pontos, principalmente a posição dos edifícios no entorno imediato de ambas as estações.

Gráfico 3 - Temperatura de globo cinza nas duas áreas de medição: Paulista e Bela Vista.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Gráfico 4 - Radiação solar global nas duas áreas de medição: Paulista e Bela Vista.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Gráfico 5 - Velocidade do ar nas duas áreas de medição: Paulista e Bela Vista.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Gráfico 6 - Frequência da direção do ar nas duas áreas de medição: Paulista e Bela Vista.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Os dados de Tar e velocidade do ar foram comparados com o de outras 3 estações fixas referência localizadas na área urbanizada do município, mas com uso do solo diferente: a do IAG-USP (Água Funda) em uma área de parque; a do Aeroporto de Congonhas em uma área de média densidade construída (CA médio de 1,7) e a do INMET (Mirante de Santana) em uma área de baixa densidade construída (CA médio de 1,2) (Figura 53).

Figura 53 - Localização das estações meteorológicas.

a) Ponto Paulista, b) Estação Automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET/Mirante de Santana), zona Norte de São Paulo – SBXP - WMO: 83781, c) Ponto Bela Vista, d) Estação Meteorológica do Aeroporto de Congonhas, zona Sul de São Paulo – SBSP – WMO: 83780 e) Imagem de satélite da região metropolitana de São Paulo com localização das estações, f) Estação do IAG-USB/Água Funda: no parque Cientec (Parque de Ciência e Tecnologia da USP) localizado no parque estadual Fontes do Ipiranga (PEFI), zona Sul de São Paulo – WMO: 83004 Fonte: Google Maps (2018).

Devido ao bloqueio atmosférico, já mencionado no início deste item, a variação diurna da Tar foi quase a mesma para os dias da medição em cada um dos pontos. Assim, a comparação dos valores das 5 estações foi feita a partir da média da variação horária da Tar medida nos 20 dias, gerando um gráfico da Tar médio para um ciclo de 24 horas (Gráfico 7). Os dados de Tar confirmam a tendência já observada em outros estudos, onde locais com menor densidade construída perdem mais calor durante a noite do que locais com maior densidade construída. A diferença máxima encontrada foi de 4°C entre a estação IAG-USP (Água Funda) e o ponto na Bela Vista às 12h. Já durante o período da manhã essa tendência se inverte, sendo a Tar na estação IAG-USP (Água Funda) 2°C mais alta do que a temperatura no ponto da Paulista às 10h, devido ao fato de que somente no ponto da Paulista as superfícies ao redor da estação estão sombreadas nesse horário.

Os pontos da Bela Vista e Paulista foram onde a Tar teve a menor amplitude, sendo os pontos com as temperaturas máximas mais baixas durante o dia e com as temperaturas mínimas mais altas durante a noite. Ao se comparar os resultados dos pontos Bela Vista e Paulista observa-se que, no período da tarde, entre 12h e 18h, a Tar no ponto Paulista é mais alta do que no ponto Bela Vista em 0,5°C. Pela manhã, entre 10h e 12h a situação se inverte, com a Tar mais alta na Bela Vista em 0,3°C, nesse período com diferenças dentro da margem de acurácia do equipamento. Essa pequena diferença entre os pontos pode também estar relacionada à geometria dos edifícios que permitem maior ou menor sombreamento no entorno da estação, levando a uma diminuição ou aumento na Tar, respectivamente.

A Tar nas estações Congonhas e INMET (Mirante de Santana) apresentou comportamento intermediário entre os pontos mais densos (Bela Vista e Paulista) e o menos denso e vegetado (IAG-USP/Água Funda). Nos dois locais há predomínio de edificações de até 3 pavimentos, com poucos edifícios altos, fazendo com que não haja o benefício do sombreamento do entorno construído, como nos pontos Bela Vista e Paulista; por isso, a temperatura máxima durante o dia ficou mais alta do que nos pontos mais densos. À noite as estações Congonhas e INMET (Mirante de Santana) não tiveram perda de calor tão expressiva quanto a do IAG-USP (Água Funda), pois apresentam mais massa construída no seu entorno do que no entorno do parque, mas ainda assim bem menor do que nos pontos Bela Vista e Paulista.

Gráfico 7 - Comparação da média horária da Tar (°C) no período de 06 a 25 de abril de 2016.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Ao comparar dados da média horária da velocidade do ar (em m/s), Congonhas apresentou o valor mais alto, os pontos Bela vista e Paulista os valores mais baixos, enquanto IAG-USP (Água Funda) e INMET (Mirante de Santana), valores intermediários (Gráfico 8). O comportamento da estação do aeroporto de Congonhas pode ser explicado pela estação estar localizada em um platô que influenciaria a velocidade do ar na estação. Bela Vista e Paulista apresentaram valores mais baixos por estarem situados em área com alta densidade construída (CA médio de 7).

Gráfico 8 - Comparação da média horária da velocidade do ar (m/s) no período de 06 a 25 de abril de 2016.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

As conclusões relativas à comparação entre as 5 estações são que as maiores diferenças na Tar ocorreram no período noturno, devido ao efeito da ilha de calor urbana, ou seja, maior acúmulo de calor nas áreas mais adensadas. Já as áreas com maior FVC, Congonhas e IAG-USP (Água Funda) apresentaram maior aquecimento durante o dia. As duas áreas mais densas, Paulista e Bela Vista, por estarem sombreadas no período da manhã, são mais frias do que as áreas menos densas e com maior FVC no mesmo período. Assim, cenários mais densos tendem a apresentar uma Tar mais alta durante a noite, mas, durante o dia, o sombreamento proporcionado pelos edifícios mais altos resulta em uma Tar mais baixa durante o dia, em comparação com as áreas mais expostas à radiação solar.

4.2.3 Modelagem e simulação

As medições foram realizadas em dias de céu claro e sem nuvens. As variáveis necessárias para calibração do modelo ENVI-met V4.4.3 com ferramenta *full forcing* foram coletadas *in loco*, com exceção das variáveis radiação solar direta e difusa de ondas curtas e longas que foram registradas pela estação do Laboratório de Micrometeorologia (LabMicro) (Figura 54), situada em uma plataforma no topo do

edifício do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), na Cidade Universitária, Universidade de São Paulo (USP)¹¹.

Figura 54 - Plataforma Micrometeorológica do LabMicro no IAG-USP (Cidade Universitária).

Disponível em: <http://www.labmicro.iag.usp.br/laboratorios/LBM/index.html>. Acesso em 22/08/2019.

Analisando-se os dados de radiação de onda curta direta e indireta da plataforma IAG-USP (Cidade Universitária) para os dias da medição (de 5 a 25 de abril de 2016), observou-se que no dia 17/04 não foi registrada ocorrência de nuvens, assim optou-se por selecionar os dados de Tar e umidade relativa do ar medidos também dessa data (Gráfico 9). Como o ideal seria rodar 48h de simulação e utilizar resultados do segundo dia de medição, foram informados como dados de entrada para o *full forcing* os registros a partir de 16/04, começando às 4h de 16/04/2016 (com atmosfera neutra) e terminando às 4h de 18/04/2016.

¹¹ Dados gentilmente cedidos pelo pesquisador responsável, Prof. Dr. Amauri Pereira de Oliveira do Laboratório de Micrometeorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP).

Gráfico 9 - Radiação de onda curta, direta e difusa, e de onda longa medidas na plataforma do IAG-USP (Cidade Universitária) em 16 e 17/04/2016

Fonte: Elaborado pela autora.

A versão atual V4.4.3 do modelo não pede dados de umidade específica a 2500m para o início da simulação. De acordo com o Prof. Helge Simon¹², um dos desenvolvedores do modelo, a partir dessa versão é o modelo que calcula esse dado. Em versões anteriores a utilizada neste trabalho, o modelo pedia também como dado de entrada a umidade específica a 2500m, que estava disponível para São Paulo apenas em dois horários, às 21h e às 9h, horário local, com dados coletados por balões atmosféricos no aeroporto Campo de Marte na zona Norte da cidade de São Paulo. Para compatibilizar a disponibilidade desse dado com a atmosfera neutra, a simulação deveria necessariamente começar às 21h. Na versão atual V4, utilizada para este trabalho, o modelo calcula esse dado, podendo-se então dar início à simulação antes do nascer do sol, em atmosfera neutra.

A primeira tentativa de rodar a simulação foi feita com o nível avançado que tem o modo de alta resolução para radiação (IVS) ativo; porém, a simulação nesse modo não rodou e o modelo apresentou mensagem de erro. Em discussões com o Prof. Helge Simon, ele nos informou que esse modo exige muito da memória RAM do computador, mesmo que o modelo o rodasse demoraria mais tempo e, portanto, não se recomenda o uso do nível avançado no momento, com a disponibilidade de máquina que temos no laboratório. Assim, a simulação prosseguiu com o *full forcing* no modo intermediário (Tabela 1).

¹² Informação verbal obtida em março de 2019 em discussões com o Prof. Dr. Helge Simon durante o workshop ministrado por ele no LABAUT (FAU-USP). Disponível em: http://www.fau.usp.br/arquivos/informativo/Informativo_22_2019_web.pdf

Os dados de entrada para Tar e umidade relativa horárias foram obtidos a partir da média dos valores medidos nos dois pontos (Paulista e Bela Vista) no dia 17/04/2016, mesmo dia escolhido para os dados de radiação, já descritos acima. Os dados de velocidade e direção do vento foram mantidos os mesmos em todos os horários, pois em testes executados por Shinzato (2016) o modelo não rodou com dados diferentes em cada horário para direção e velocidade do vento. Como a velocidade do ar na área de medição é muito baixa, optou-se por manter a direção dominante e uma velocidade de entrada a 2m de altura que representasse o que foi medido no meio da quadra (em média 0,5 m/s); sendo assim, a partir de alguns testes com velocidades do ar diferentes, chegou-se ao valor de 1,15 m/s apresentado abaixo.

Tabela 1 - Dados de entrada da ferramenta *full forcing*.

Data	Hora	Radiação de onda curta direta (W/m ²)	Radiação de onda curta difusa (W/m ²)	Radiação de onda longa	Temperatura do ar (K)	Umidade relativa (%)	Velocidade do vento (m/s)	Direção do vento (°)
16.04.2016	04:00:00	0.000	0.000	356.438	295.59	72.5	1.15	135
16.04.2016	04:30:00	0.000	0.000	356.439	295.36	74.7	1.15	135
16.04.2016	05:00:00	0.000	0.000	356.440	295.13	77.0	1.15	135
16.04.2016	05:30:00	0.000	0.000	356.441	295.00	77.6	1.15	135
16.04.2016	06:00:00	0.000	0.000	356.442	294.88	78.1	1.15	135
16.04.2016	06:30:00	19.568	12.400	356.443	294.81	78.6	1.15	135
16.04.2016	07:00:00	91.923	38.529	356.444	294.75	79.0	1.15	135
16.04.2016	07:30:00	183.390	54.915	356.445	294.99	77.9	1.15	135
16.04.2016	08:00:00	294.767	67.610	356.446	295.24	76.9	1.15	135
16.04.2016	08:30:00	403.527	75.138	356.447	295.90	72.1	1.15	135
16.04.2016	09:00:00	498.635	81.043	356.448	296.57	67.3	1.15	135
16.04.2016	09:30:00	574.175	93.000	356.449	297.46	61.5	1.15	135
16.04.2016	10:00:00	657.679	91.819	356.450	298.36	55.6	1.15	135
16.04.2016	10:30:00	706.257	88.277	356.451	300.05	49.1	1.15	135
16.04.2016	11:00:00	733.220	99.053	356.452	301.73	42.5	1.15	135
16.04.2016	11:30:00	672.014	140.091	356.453	302.21	39.9	1.15	135
16.04.2016	12:00:00	820.478	193.972	356.454	302.69	37.2	1.15	135
16.04.2016	12:30:00	705.802	226.153	356.455	302.94	35.1	1.15	135
16.04.2016	13:00:00	635.836	177.734	356.456	303.20	33.0	1.15	135
16.04.2016	13:30:00	754.949	161.791	356.457	303.26	32.7	1.15	135
16.04.2016	14:00:00	159.044	118.391	356.458	303.32	32.5	1.15	135
16.04.2016	14:30:00	620.705	136.696	356.459	303.09	33.0	1.15	135
16.04.2016	15:00:00	549.829	158.396	356.460	302.87	33.6	1.15	135
16.04.2016	15:30:00	186.348	148.948	356.461	302.92	33.8	1.15	135
16.04.2016	16:00:00	250.967	83.405	356.462	302.97	33.9	1.15	135
16.04.2016	16:30:00	93.629	61.262	356.463	302.65	41.2	1.15	135

Tabela 1 - (cont.)

Data	Hora	Radiação de onda curta direta (W/m²)	Radiação de onda curta difusa (W/m²)	Radiação de onda longa	Temperatura do ar (K)	Umidade relativa (%)	Velocidade do vento (m/s)	Direção do vento (°)
16.04.2016	17:00:00	73.038	47.976	356.464	302.33	48.6	1.15	135
16.04.2016	17:30:00	17.975	9.448	356.465	301.82	50.0	1.15	135
16.04.2016	18:00:00	0.000	0.000	356.466	301.30	51.4	1.15	135
16.04.2016	18:30:00	0.000	0.000	356.467	300.74	55.3	1.15	135
16.04.2016	19:00:00	0.000	0.000	356.468	300.19	59.2	1.15	135
16.04.2016	19:30:00	0.000	0.000	356.469	299.92	57.5	1.15	135
16.04.2016	20:00:00	0.000	0.000	356.470	299.65	55.8	1.15	135
16.04.2016	20:30:00	0.000	0.000	356.471	299.38	54.7	1.15	135
16.04.2016	21:00:00	0.000	0.000	356.472	299.11	53.5	1.15	135
16.04.2016	21:30:00	0.000	0.000	356.473	298.95	46.4	1.15	135
16.04.2016	22:00:00	0.000	0.000	356.474	298.79	39.3	1.15	135
16.04.2016	22:30:00	0.000	0.000	356.475	298.53	40.4	1.15	135
16.04.2016	23:00:00	0.000	0.000	356.476	298.27	41.5	1.15	135
16.04.2016	23:30:00	0.000	0.000	356.477	298.16	42.1	1.15	135
17.04.2016	00:00:00	0.000	0.000	356.478	298.05	42.8	1.15	135
17.04.2016	00:30:00	0.000	0.000	356.479	297.72	44.3	1.15	135
17.04.2016	01:00:00	0.000	0.000	356.480	297.40	45.7	1.15	135
17.04.2016	01:30:00	0.000	0.000	356.481	297.31	47.0	1.15	135
17.04.2016	02:00:00	0.000	0.000	356.482	297.23	48.3	1.15	135
17.04.2016	02:30:00	0.000	0.000	356.483	296.96	50.7	1.15	135
17.04.2016	03:00:00	0.000	0.000	356.484	296.70	53.0	1.15	135
17.04.2016	03:30:00	0.000	0.000	356.485	296.44	56.6	1.15	135
17.04.2016	04:00:00	0.000	0.000	356.486	296.17	60.2	1.15	135
17.04.2016	04:30:00	0.000	0.000	356.487	295.92	61.8	1.15	135
17.04.2016	05:00:00	0.000	0.000	356.488	295.66	63.5	1.15	135
17.04.2016	05:30:00	0.000	0.000	356.489	295.41	65.9	1.15	135
17.04.2016	06:00:00	0.000	0.000	356.490	295.16	68.3	1.15	135
17.04.2016	06:30:00	18.316	10.905	356.491	294.85	71.0	1.15	135
17.04.2016	07:00:00	80.887	35.367	356.492	294.54	73.7	1.15	135
17.04.2016	07:30:00	189.078	47.599	356.493	294.65	72.3	1.15	135
17.04.2016	08:00:00	304.551	54.967	356.494	294.77	71.0	1.15	135
17.04.2016	08:30:00	408.191	63.367	356.495	295.47	66.4	1.15	135
17.04.2016	09:00:00	503.868	70.145	356.496	296.17	61.7	1.15	135
17.04.2016	09:30:00	589.078	76.335	356.497	297.15	56.6	1.15	135
17.04.2016	10:00:00	656.997	80.608	356.498	298.14	51.5	1.15	135
17.04.2016	10:30:00	708.987	75.451	356.499	299.80	45.6	1.15	135
17.04.2016	11:00:00	770.876	73.682	356.500	301.46	39.8	1.15	135
17.04.2016	11:30:00	803.641	76.335	356.501	302.21	36.3	1.15	135
17.04.2016	12:00:00	809.329	78.103	356.502	302.97	32.8	1.15	135
17.04.2016	12:30:00	760.865	78.398	356.503	303.17	32.3	1.15	135
17.04.2016	13:00:00	754.380	73.830	356.504	303.36	31.7	1.15	135

Tabela 1 - (cont.)

Data	Hora	Radiação de onda curta direta (W/m ²)	Radiação de onda curta difusa (W/m ²)	Radiação de onda longa	Temperatura do ar (K)	Umidade relativa (%)	Velocidade do vento (m/s)	Direção do vento (°)
17.04.2016	13:30:00	719.568	75.303	356.505	303.01	31.4	1.15	135
17.04.2016	14:00:00	665.301	77.956	356.506	302.67	31.2	1.15	135
17.04.2016	14:30:00	601.024	67.346	356.507	302.69	29.8	1.15	135
17.04.2016	15:00:00	525.711	62.630	356.508	302.71	28.5	1.15	135
17.04.2016	15:30:00	437.884	60.567	356.509	302.77	28.4	1.15	135
17.04.2016	16:00:00	329.352	53.788	356.510	302.83	28.2	1.15	135
17.04.2016	16:30:00	212.400	42.294	356.511	302.63	30.1	1.15	135
17.04.2016	17:00:00	106.598	26.820	356.512	302.44	32.1	1.15	135
17.04.2016	17:30:00	28.441	5.305	356.513	302.17	33.2	1.15	135
17.04.2016	18:00:00	0.683	0.000	356.514	301.90	34.4	1.15	135
17.04.2016	18:30:00	0.000	0.000	356.515	301.55	38.4	1.15	135
17.04.2016	19:00:00	0.000	0.000	356.516	301.21	42.4	1.15	135
17.04.2016	19:30:00	0.000	0.000	356.517	300.45	53.8	1.15	135
17.04.2016	20:00:00	0.000	0.000	356.518	299.69	65.3	1.15	135
17.04.2016	20:30:00	0.000	0.000	356.519	299.41	63.9	1.15	135
17.04.2016	21:00:00	0.000	0.000	356.520	299.13	62.5	1.15	135
17.04.2016	21:30:00	0.000	0.000	356.521	299.00	61.5	1.15	135
17.04.2016	22:00:00	0.000	0.000	356.522	298.87	60.6	1.15	135
17.04.2016	22:30:00	0.000	0.000	356.523	298.84	58.0	1.15	135
17.04.2016	23:00:00	0.000	0.000	356.524	298.80	55.4	1.15	135
17.04.2016	23:30:00	0.000	0.000	356.525	298.61	54.8	1.15	135
18.04.2016	00:00:00	0.000	0.000	356.526	298.43	54.3	1.15	135
18.04.2016	00:30:00	0.000	0.000	356.527	298.06	56.2	1.15	135
18.04.2016	01:00:00	0.000	0.000	356.528	297.70	58.1	1.15	135
18.04.2016	01:30:00	0.000	0.000	356.529	297.44	59.2	1.15	135
18.04.2016	02:00:00	0.000	0.000	356.530	297.17	60.3	1.15	135
18.04.2016	02:30:00	0.000	0.000	356.531	296.83	62.4	1.15	135
18.04.2016	03:00:00	0.000	0.000	356.532	296.50	64.5	1.15	135
18.04.2016	03:30:00	0.000	0.000	356.533	296.10	66.8	1.15	135
18.04.2016	04:00:00	0.000	0.000	356.534	295.70	69.2	1.15	135

Na versão V4.4.3 do modelo, foi disponibilizada a ferramenta *Monde*, capaz de importar geometria edificada, bem como as dimensões de quadras e vias de um arquivo no formato *.shapefile*, o que facilitou a modelagem. Como São Paulo dispõe de um mapa digital da cidade nesse formato (São Paulo, MDC, 2008), foi feita a modelagem a partir dele, adicionando-se edifício mais recente que ainda não estava construído na época (Figura 55 e Figura 56). Essa ferramenta também possibilita a importação da topografia do terreno, foram feitos alguns testes com a topografia, mas

os valores foram muito semelhantes aos obtidos sem a topografia e com a desvantagem de ter o tempo de simulação duplicado. Assim, optou-se por manter o terreno plano, sem a topografia.

Figura 55 - Modelo em 3D

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 56 - Modelo em 2D

Fonte: Elaborado pela própria autora.

A partir do *Monde* se exportou o modelo para o formato *.INX* (da ferramenta *Space*) já com os materiais dos edifícios e das vias, além das quadras com as dimensões das grades. Foram feitos testes com grades de 2,5x2,5, 3x3 e 4x4m e a que apresentou melhor resultado para radiação global no receptor foi a de 3x3m. O modelo compreendeu os dois pontos simulados, com a avenida Paulista ao centro. O Quadro 6 apresenta dados do arquivo *.INX*:

Quadro 6 - Dimensões do modelo para simulação das áreas de medição.

Dimensões do modelo (m)	702 x 621 x 256
Dimensões do modelo (grades)	234 x 207 x 40
Tamanho das grades (m)	3 x 3 x 4
Telescoping factor (%)	3
Iniciar telescoping em (m)	20

Ao utilizar *full forcing* não foi aconselhado pelo Prof. Helge Simon uso de grades de aninhamento (*nesting grids*), pois valores de temperatura poderiam chegar ao centro do modelo mais quentes do que o dado de entrada. Foram feitos testes sem o *nesting grid* e com edifícios justapostos à borda do modelo, o que gerou erros até a interrupção da simulação. Assim, foi deixada borda com cerca de 4 grades sem edifícios para funcionamento correto da simulação. O modelo ainda não dispõe de ferramenta adequada para informar qual tamanho de borda adequada; a informação disponível no *Model Inspector* solicita muito mais espaço de borda do que o necessário para o *full forcing*.

Os materiais utilizados nas superfícies de vias e quadras foram levantados *in loco* e foram adotados valores médios para eles. Os componentes das paredes e cobertura foram obtidos a partir da adaptação descrita no item 4.3.3. (Figura 57), sendo que a partir de alguns testes o componente que apresentou melhor resultado para as paredes foi o bloco de concreto com albedo das paredes de 0,3 e o da cobertura foi igual ao utilizado nos cenários paramétricos, descritos mais adiante.

Figura 57 - Componente construtivo das paredes utilizadas no modelo para calibração.

Fonte: Elaborado pela própria autora

A simulação levou ao todo 12 dias para rodar em um computador Intel core i7 – 6700 16GB RAM, 3,41 GHz, com 8 processadores lógicos e 4 núcleos. Para diminuir o tempo de simulação seria necessário aquisição de máquina com processador que tivesse mais núcleos.

4.3 Cenários paramétricos

Os cenários paramétricos consideram a mesma densidade de volume construído, mas com diferenças na geometria edificada e em propriedades dos materiais. A primeira parte será a análise da Tar e TRM ao nível do pedestre (1,5 m do solo) para diferentes geometrias edificadas, que englobam valores distintos para densidade de superfície, taxa de ocupação e altura. A segunda parte analisa as mesmas variáveis, porém com alterações nos componentes construtivos como bloco de concreto, tijolo cerâmico e vidro, considerando-se variações em seus respectivos albedos.

4.3.1 Geometria e densidade urbana

A geometria urbana impacta o microclima urbano de três formas: 1) resultando em menor ganho de energia radiativa direta de ondas curtas, por meio do sombreamento proporcionado pelos volumes dos edifícios; 2) resultando em maior ganho de radiação direta, difusa ou refletida de ondas curtas, permitindo exposição das superfícies urbanas à radiação solar de ondas curtas; e 3) contribuindo para múltiplas reflexões, tanto da radiação de ondas curtas como de ondas longas, levando ao aprisionamento de calor nos cânions urbanos devido aos valores mais baixos do fator de visão de céu (FVC) e mais altos da relação altura/largura (A/L), em áreas densamente construídas.

A verticalização, por si só, não significa necessariamente, adensamento populacional (GUSSON; MADEIRA; DUARTE, 2012), mas um adensamento populacional com qualidade ambiental só é possível com a verticalização. Como esse trabalho defende o adensamento do território como forma mais sustentável de apropriação do espaço e busca saber como a densidade construída interfere no microclima urbano, no nível do pedestre, a intenção foi trabalhar com cenários mais densos permitidos pela atual legislação, variando, dentre outros parâmetros, a taxa de ocupação. Ao se elaborar o desenho desses cenários observou-se que, se fosse seguido apenas o código de obras, considerando afastamentos obrigatórios do lote em relação à altura do edifício, seria possível aumento da altura dos edifícios com maior coeficiente de aproveitamento, para além dos valores existentes no município, que se originaram em função das diferentes legislações aplicadas ao longo da história. Assim, como exercício, os cenários propostos não estão levando em consideração o

CA máximo permitido atualmente, pois ficaria abaixo do que já foi construído em São Paulo (Quadro 7).

Quadro 7 - Altura das edificações considerando-se os CAs permitidos no zoneamento vigente (São Paulo, 2016)

	TO		
CA (quadra)	0,5	0,32	0,18
1	2 andares* – 6m	3 andares – 9m	5 andares – 15m
2	4 andares – 12m	6 andares – 18m	11 andares – 33m
3	6 andares – 18m	9 andares – 27m	16 andares – 48m
4	8 andares – 24 m	12 andares – 36m	22 andares – 66m

* considerando pé-direito de 3m.

Outro ponto considerado foi que, de acordo com o Código de Obras e edificações (COE, 2017), o coeficiente de aproveitamento considera algumas áreas como não computáveis como, por exemplo: terraços abertos com área construída máxima por pavimento de 5% a área total do terreno; em edifícios residenciais, áreas cobertas de uso comum no térreo ou em qualquer pavimento, respeitando-se o limite de 3m² por habitação; e, nos edifícios não residenciais, o pavimento térreo sem vedação e a circulação vertical de uso comum. Portanto, ressalva-se que o valor previsto em lei na legislação local não pode ser comparado diretamente com o coeficiente de aproveitamento utilizado nos cenários, pois para este estudo foi considerada toda a área construída, inclusive circulação e varandas.

No levantamento feito a partir do mapa digital da cidade por Longarine (2018), muitas quadras apresentaram coeficientes de aproveitamento superiores a 4. Isso devido às leis anteriores que permitiam valores maiores para o coeficiente de aproveitamento, bem como a consideração de toda área como computável no mapeamento (mapa completo disponível no ANEXO D). Na área da Avenida Paulista, por exemplo, observa-se que a maioria das quadras apresentam coeficiente de aproveitamento entre 4 e 9 (Figura 58); assim, procurou-se manter cenários com coeficientes de aproveitamento similares ao já encontrados na área. Todos os edifícios

dos cenários serão em forma de torre, por ser a forma mais construída na cidade atualmente.

Figura 58 - Coeficiente de aproveitamento das quadras na região da Av. Paulista.

Fonte: Longarine (2018)

O desenho dos cenários (Quadro 8) partiu da modulação das grades do modelo ENVI-met adotadas (2,5m x 2,5m). O próximo passo foi a definição das alturas e espaçamento entre os edifícios; para isso uma matriz de cálculo foi elaborada no software Excel a partir do item 5.1, do Anexo I do Código de Obras e Edificações (COE) do município de São Paulo (2017), que define as condições de aeração e insolação, ou seja, o afastamento do edifício com relação ao lote. A partir de 10m de altura a edificação precisa obedecer a seguinte equação:

$$A = \frac{(H - 6)}{10} \quad (16)$$

Onde: A = afastamento lateral e de fundo e H = altura da edificação em metros.

Não só o afastamento em relação ao lote teria que seguir a modulação das grades do modelo, mas também, os lados dos edifícios tinham que ser múltiplos de 2,5m. Outro ponto a ser considerado é que a intenção foi utilizar a ocupação máxima permitida da quadra, segundo esses parâmetros. A partir disso, cenários resultantes estão descritos abaixo (Quadro 8):

Quadro 8 - Cenários com variação na geometria urbana.

Volume construído (m³)	Taxa de ocupação (TO)	Altura (m)	Coefficiente de aproveitamento da quadra (CA)	Coefficiente de superfície	A/L	FVC	3D
220.000	0,5	44	7,33	4,5		0,30
259.200	0,32	81	8,64	6,2		0,21
214.200	0,18	119	7,14	6,7		0,21

A partir de 119m de altura, o espaçamento entre os edifícios teria que ser maior e, para isso, ou a planta dos oito edifícios da quadra teria que diminuir em projeção, ou a quadra passaria a ter menos edifícios. Como a implantação de cada edifício de 119m de altura já estava em 225m² (15m x 15m), um valor menor que esse não seria viável do ponto de vista imobiliário, portanto, para aumentar a altura e manter implantação com área viável, a única solução seria alterar a disposição dos edifícios na quadra, de oito edifícios para quatro, o que dificultaria comparação dos resultados no nível do pedestre com a implantação padrão adotada para todos os demais cenários, com 8 edifícios.

Ainda com relação à altura, optou-se por cenários com edifícios que não ultrapassassem a altura máxima permitida pelo município. De acordo com a Lei de Zoneamento (LPUOS, 2016), as Zonas Eixo da Estruturação da Transformação Urbana (ZEU) e todas as Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS), inclusive as Zonas de Centralidade em ZEIS (ZC-ZEIS), não apresentam gabarito de altura máxima para edificações, ou seja, não há limite de altura, mas precisa-se respeitar o CA.

Porém, pela existência de dois aeroportos dentro da área urbanizada, o que limita a altura nessas zonas é a Portaria 957/GC3 de 2015, do Comando da Aeronáutica, que determina que, em um raio de 4 quilômetros da pista do aeroporto, não poderá haver edificações acima de 45m do nível da pista e, em um raio de 20 quilômetros do aeroporto, não pode haver construções acima de 150m do nível da pista. Como a pista do Aeroporto de Congonhas está em uma altitude aproximada de 802m, um edifício na avenida Paulista (altitude aproximada de 824m), por exemplo, não pode ter edificações com mais de 128m e, nas marginais (altitude aproximada de 730m), não pode haver edificações acima de 222m. Assim, os estudos paramétricos foram limitados até uma altura de 128m, mesmo havendo na cidade, hoje, edificações mais altas que se localizam em altitudes mais baixas.

O sistema viário dos cenários tem as dimensões da Avenida Paulista, por ser viário que comporta densidade mais alta também de pessoas, com linhas de metrô, ônibus e ciclovias. As dimensões são: 10m da face dos edifícios até o leito carroçável nos dois lados (que podem ser 10m só de calçada ou 5m de recuo dos edifícios e 5m de calçada), 12,5 metros em cada leito carroçável e 5m na ciclovia, totalizando 50m de edifício a edifício.

A visualização dos cenários paramétricos com a lente grande angular foi elaborada por meio do software Sketch up pro 2016, com a câmera *fish-eye* do plug-in V-ray 3.4 (AMORIM; PEDROSA; CARVALHO, 2014) e o cálculo do FVC foi feito pelo modelo RayMan¹³. O local que a imagem foi obtida nos 3 cenários corresponde a marcação na Figura 59, no meio da via, no centro entre as duas quadras, a partir da cota 0 m.

Figura 59 - Imagem ponto FVC.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

4.3.2 Materialidade

De acordo com a revisão de literatura, a propriedade do material que mostrou ter maior relação com geometria edificada foi albedo. Em arranjos de alta densidade não se sabe se a alteração nos valores de albedo influenciaria valores de Tar e TRM ao nível do pedestre (1,5 m do solo), impactando seu conforto, nem de quanto seria esse impacto.

O albedo é uma propriedade radiativa que não depende, necessariamente, do tipo de componente construtivo. Como ele está presente na última camada, ou seja, no acabamento, pode-se ter o mesmo valor de albedo em uma alvenaria de tijolo

¹³Disponível em: <https://www.urbanclimate.net/rayman/>.

cerâmico ou de bloco de concreto, por exemplo, com a mesma pintura ou o mesmo revestimento, seja ele qual for.

Nesse ponto, interessa a este trabalho saber qual seria a influência do albedo nos componentes mais utilizados na construção civil na cidade de São Paulo e o efeito da associação do albedo com a geometria edificada.

Para definir componentes a serem testados, optou-se pelos mais utilizados nas edificações de São Paulo: tijolo cerâmico, bloco de concreto e vidro. No caso do vidro, além da reflexão e da absorção, têm-se também a transmissão, assim, os casos a serem testados foram: vidros mais transmissivos e vidros mais refletores. O tipo de vidro que foi o mais utilizado em edificações em São Paulo, o laminado (Figura 60), segundo levantamento de Polli (2017), com base no levantamento de todas as obras executadas com vidros da empresa Glassec Viracon.

Figura 60 - Tipo de vidro por porcentagem de vidro nas fachadas.

Fonte: Polli (2017).

No caso das alvenarias, optou-se por saber o efeito das situações extremas: ou toda pintada de branco, ou seja, com alto albedo, ou toda pintada de preto, com baixo albedo, como também vem sendo praticada em edifícios residenciais e comerciais em São Paulo. Assim, é possível saber qual o efeito nos dois extremos e todas as outras cores apresentariam resultado intermediário entre os dois valores.

Após definição dos materiais buscaram-se respectivas especificações no Anexo Geral V – Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros da portaria do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) nº 50/2013, a partir dos valores recomendados para zona bioclimática 3, onde se encontra a cidade de São Paulo (ABNT, 2005) (Quadro 9).

Quadro 9 - Tipo de vedações externas para a zona bioclimática 3.

Vedações externas	Tipo	Transmitância Térmica – U (W/m ² .K)	Atraso térmico $\phi - h$	Fator Solar -FS _o - %
Parede	Leve refletora	$U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$	$\leq 4,0$
Cobertura	Leve isolada	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 3,3$	$\leq 6,5$

Fonte: ABNT (2005).

Os componentes selecionados para simulação paramétrica, bem como suas dimensões, encontram-se no Quadro 10; os acabamentos selecionados e suas absorptâncias encontram-se no Quadro 11.

Quadro 10 - Propriedades térmicas das paredes e coberturas utilizadas nas simulações.

Imagem	Descrição	U [W/(m².K)]	C _T [kJ/m²K]
Argamassa Interna (2,5cm) + Bloco de Concreto (14cm) + Argamassa externa (2,5cm)	2,69	272
Argamassa interna (2,5cm) + Bloco Cerâmico (14cm) + Argamassa externa (2,5cm)	1,85	161
Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm + EPS 7cm + argamassa 1cm) Sem telha	1,80	132

Fonte: INMETRO, 2013.

Quadro 11 - Acabamentos das paredes utilizadas nas simulações.

Tinta / tipo	Número	Cor	Nome	Absortância
Acrílica Fosca	50		branco neve	0,102
Acrílica Semi-brilho	29		preto	0,971

Fonte: Dornelles (2008) *apud* INMETRO (2013).

Já os tipos de vidros mais transmissivos, refletores e absorptivos foram baseados nestes do Quadro 12.

Quadro 12 - Tipos de vidros e propriedades utilizados na simulação.

Fabricante	Produto	Descrição	Cor	Transmissividade	Refletividade	Absortância
Glassec Viracon	GL 1000	Laminado	Incolor	76%	7%	17%
Guardian	SNL 37 clear	Laminado	Verde	15%	40%	45%
Guardian	Silver 20 green	Laminado	Incolor	10%	17%	73%

Fonte: GLASSEC Viracon (Anexo D) e INMETRO (2013).

A partir da definição dos componentes e acabamentos foi elaborada primeira matriz de teste de sensibilidade para avaliar comportamento dos componentes e acabamentos em um dos cenários paramétricos, para depois definir os que seriam analisados em todos os cenários (Quadro 13).

Quadro 13 - Matriz de teste de sensibilidade.

Geometria	Componente	Acabamentos/Configurações
cenário 44m	Bloco de concreto	Branco Neve
		Preto
	Tijolo cerâmico	Branco Neve
		Preto
	Vidro Laminado	Refletor
		Absortivo
		Transmissivo

Fonte: Elaborado pela própria autora.

4.3.3 Modelagem e simulação

O modelo ENVI-met aceita, em sua base de dados de materiais, componentes construtivos com até três materiais, dispostos de forma vertical, ou seja, em 3

camadas, como são compostas as paredes construídas no Brasil, na maioria das vezes: argamassa interna, tijolo cerâmico furado ou bloco de concreto e argamassa externa. Entretanto, o tijolo não é um elemento uniforme; ao se fazer um corte longitudinal na parede, tanto ele quanto o bloco de concreto apresentam furos transversais. Assim, para se representar no modelo os componentes tijolo cerâmico e bloco de concreto, foi necessária adequação dos materiais nos dados de entrada para que apresentassem mesmo comportamento térmico dos dois componentes.

Weber et al. (2017) descreveram método para caracterização de componentes construtivos adequados à realidade brasileira para uso no modelo *EnergyPlus* que, assim como o ENVI-met, dispõe materiais constituintes da parede em camadas transversais ao fluxo de calor. Assim, a partir desse método, eles criaram tabela com propriedades térmicas de paredes, pisos e coberturas equivalentes. Para paredes de tijolo cerâmico e bloco de concreto que serão utilizados nas simulações, os materiais equivalentes são os indicados no

Quadro 14.

Quadro 14 - Propriedades do tijolo cerâmico e bloco de concreto utilizados nas simulações.

Mat	Bloco	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	Rt (m ² °C/W)	Ut (W/m ² °C)	Ct (kJ/m ² °C)
CERÂMICA	9 furos 14x19x29 cm	Argamassa interna e externa	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	1,83	161
			Cerâmica	1,65	0,900	1600	0,920	0,018		
			Câmara de Ar	10,7	0,360	-	-	0,297		
			Cerâmica	1,65	0,900	1600	0,920	0,018		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
CONCRETO	2 furos 14x19x39 cm	Argamassa interna e externa	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,68	272
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Câmara de Ar	8,00	0,636	-	-	0,126		
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Argamassa externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		

Fonte: Weber et al. (2017).

Para laje de cobertura os materiais equivalentes estão no Quadro 15.

Quadro 15 - Propriedades da laje de cobertura utilizada nas simulações.

Tipo	Bloco	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m³)	c (kJ/kgK)	Rt (m²°C/W)	Ut(W/m² °C)	Ct (kJ/m²°C)
LAJE PRÉ-MOLDADA	EPS 30x7x125 cm	Capa de concreto e argamassa	Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023	1,80	132
			EPS + concreto	7,00	0,223	373	1,00	0,314		
			Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009		

Fonte: Weber et al (2017).

As paredes de cerâmica e concreto equivalentes apresentam 5 camadas de materiais, sendo que o modelo ENVI-met aceita até 3 camadas. Assim, foram elaborados materiais equivalentes para esses dois componentes, de forma que a transmitância térmica total (Ut) e a capacidade térmica total (Ct) fossem as mesmas.

Assim, no caso da parede de tijolo cerâmico se partiu da soma das espessuras de argamassa e cerâmica para o novo material ($2,5 + 1,65 = 4,15$ cm) e da espessura da camada de ar (10,7 cm) existente para se calcular as novas propriedades, iniciando-se pelo cálculo de uma densidade equivalente, por meio da capacidade térmica do material equivalente, mantendo-se o valor da cerâmica para calor específico. A capacidade térmica do ar foi desprezada.

$$\text{Então: } Ct = 2.(e.c.p) = 2.(0,0415.0,92.p) = 161$$

$$\rho = 2180 \text{ kg/m}^3$$

Para manter o valor da transmitância térmica total e da espessura, foi calculado novo valor equivalente para a condutividade térmica:

$$Ut = 1/Rt = 1,85 = 1/0,13 + (0,0415/\lambda + 0,17 + 0,0415/\lambda) + 0,04$$

$$\lambda = 0,41 \text{ (W/m.K)}$$

E, no caso da parede composta por bloco de concreto, partiu-se da soma das espessuras de argamassa e do bloco para o novo material ($2,5 + 3 = 5,5$ cm) e da espessura da camada de ar (8 cm) existente, para se calcular as novas propriedades, iniciando-se pelo cálculo de uma densidade equivalente, por meio da capacidade térmica do material equivalente, mantendo-se o valor do concreto para o calor específico. A capacidade térmica do ar foi desprezada.

$$\text{Então: } Ct = 2.(e.c.p) = 2.(0,05.1,0.p) = 272$$

$$\rho = 2472 \text{ kg/m}^3$$

Para se manter o valor da transmitância térmica total e da espessura, foi calculado um novo valor equivalente para a condutividade térmica:

$$U_t = 1/R_t = 2,69 = 1/ 0,13+(0,055/\lambda + 0,17 + 0,055/\lambda) + 0,04$$
$$\lambda = 3,46 \text{ (W/m.K)}$$

Assim, têm-se propriedades dos materiais e componentes equivalentes que representam argamassa com tijolo cerâmico e argamassa com bloco de concreto. Após essa definição foi feita a inserção dos materiais no banco de dados do modelo (Figura 61).

Figura 61 - Materiais e cores.

Componente	Branco Neve	Preto																																				
<div>Tijolo Cerâmico</div> <div><div>Wall</div><div><div>0.04150 m0.10700 m0.04150 m</div><div>Calc. Transmission:0.0000</div><div>4.15 cm10.70 cm4.15 cm</div><div><div>Outside</div><div><div>[TJ1014]</div><div>Tijolo 14+ARG</div></div><div><div>[CAMA10]</div><div>CAMARA_AR_10</div></div><div><div>[TJ1014]</div><div>Tijolo 14+ARG</div></div><div>Inside</div></div><div>19.00 cm</div></div></div>	<div><div>Database-ID: [BLO149]</div><div>Name: BlocoConcreto14+ARG_09</div><div>Color: </div><div><table><tr><th>Parameter</th><th>Value</th></tr><tr><td>Default Thickness</td><td>0.05500</td></tr><tr><td>Absorption</td><td>0.10200</td></tr><tr><td>Transmission</td><td>0.00000</td></tr><tr><td>Reflection</td><td>0.89800</td></tr><tr><td>Emissivity</td><td>0.90000</td></tr><tr><td>Specific Heat</td><td>1000.00000</td></tr><tr><td>Thermal Conductivity</td><td>3.46000</td></tr><tr><td>Density</td><td>2472.00000</td></tr></table></div></div>	Parameter	Value	Default Thickness	0.05500	Absorption	0.10200	Transmission	0.00000	Reflection	0.89800	Emissivity	0.90000	Specific Heat	1000.00000	Thermal Conductivity	3.46000	Density	2472.00000	<div><div>[BLO140]</div><div>BlocoConcreto14+ARG_00</div><div></div><div><table><tr><th></th><th>Value</th></tr><tr><td>ness</td><td>0.05500</td></tr><tr><td></td><td>0.97100</td></tr><tr><td></td><td>0.00000</td></tr><tr><td></td><td>0.02900</td></tr><tr><td></td><td>0.90000</td></tr><tr><td></td><td>1000.00000</td></tr><tr><td>luctivity</td><td>3.46000</td></tr><tr><td></td><td>2472.00000</td></tr></table></div></div>		Value	ness	0.05500		0.97100		0.00000		0.02900		0.90000		1000.00000	luctivity	3.46000		2472.00000
Parameter	Value																																					
Default Thickness	0.05500																																					
Absorption	0.10200																																					
Transmission	0.00000																																					
Reflection	0.89800																																					
Emissivity	0.90000																																					
Specific Heat	1000.00000																																					
Thermal Conductivity	3.46000																																					
Density	2472.00000																																					
	Value																																					
ness	0.05500																																					
	0.97100																																					
	0.00000																																					
	0.02900																																					
	0.90000																																					
	1000.00000																																					
luctivity	3.46000																																					
	2472.00000																																					
<div>Bloco de Concreto</div> <div><div>Wall</div><div><div>0.05500 m0.08000 m0.05500 m</div><div>Calc. Transmission:0.0000</div><div>5.50 cm8.00 cm5.50 cm</div><div><div>Outside</div><div><div>[BLOC14]</div><div>BlocoConcreto14+ARG</div></div><div><div>[CAMA08]</div><div>CAMARA_AR_8</div></div><div><div>[BLOC14]</div><div>BlocoConcreto14+ARG</div></div><div>Inside</div></div><div>19.00 cm</div></div></div>	<div><div>Database-ID: [TJD149]</div><div>Name: Tijolo14+ARG_09</div><div>Color: </div><div><table><tr><th>Parameter</th><th>Value</th></tr><tr><td>Default Thickness</td><td>0.04150</td></tr><tr><td>Absorption</td><td>0.10200</td></tr><tr><td>Transmission</td><td>0.00000</td></tr><tr><td>Reflection</td><td>0.89800</td></tr><tr><td>Emissivity</td><td>0.90000</td></tr><tr><td>Specific Heat</td><td>920.00000</td></tr><tr><td>Thermal Conductivity</td><td>0.41000</td></tr><tr><td>Density</td><td>2108.00000</td></tr></table></div></div>	Parameter	Value	Default Thickness	0.04150	Absorption	0.10200	Transmission	0.00000	Reflection	0.89800	Emissivity	0.90000	Specific Heat	920.00000	Thermal Conductivity	0.41000	Density	2108.00000	<div><div>[TJD140]</div><div>Tijolo14+ARG_00</div><div></div><div><table><tr><th></th><th>Value</th></tr><tr><td>ness</td><td>0.04150</td></tr><tr><td></td><td>0.97100</td></tr><tr><td></td><td>0.00000</td></tr><tr><td></td><td>0.02900</td></tr><tr><td></td><td>0.90000</td></tr><tr><td></td><td>920.00000</td></tr><tr><td>ductivity</td><td>0.41000</td></tr><tr><td></td><td>2108.00000</td></tr></table></div></div>		Value	ness	0.04150		0.97100		0.00000		0.02900		0.90000		920.00000	ductivity	0.41000		2108.00000
Parameter	Value																																					
Default Thickness	0.04150																																					
Absorption	0.10200																																					
Transmission	0.00000																																					
Reflection	0.89800																																					
Emissivity	0.90000																																					
Specific Heat	920.00000																																					
Thermal Conductivity	0.41000																																					
Density	2108.00000																																					
	Value																																					
ness	0.04150																																					
	0.97100																																					
	0.00000																																					
	0.02900																																					
	0.90000																																					
	920.00000																																					
ductivity	0.41000																																					
	2108.00000																																					

Fonte: Elaborado pela própria autora

Como o modelo somente aceita 3 camadas de materiais em cada componente, o vidro foi representado como se fossem 3 camadas de vidro, mas a espessura total foi de um vidro laminado comum de 8cm (Figura 62).

Figura 62 - Representação do vidro no modelo ENVI-met.

Fonte: Elaborado pela própria autora

Abaixo, têm-se as propriedades dos vidros que foram simulados (Figura 63):

Figura 63 - Propriedades dos vidros simulados.

Database-ID: [VLAREF]		Database-ID: [VLATRA]		Database-ID: [VLAABS]	
Name: Laminado Reflexao		Name: Laminado Transmissao		Name: Laminado Absorcao	
Color: 		Color: 		Color: 	
Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
Default Thickness	0.00266	Default Thickness	0.00266	Default Thickness	0.00266
Absorption	0.45000	Absorption	0.17000	Absorption	0.73000
Transmission	0.15000	Transmission	0.76000	Transmission	0.10000
Reflection	0.40000	Reflection	0.07000	Reflection	0.17000
Emissivity	0.85000	Emissivity	0.85000	Emissivity	0.85000
Specific Heat	750.00000	Specific Heat	750.00000	Specific Heat	750.00000
Thermal Conductivity	1.00000	Thermal Conductivity	1.00000	Thermal Conductivity	1.00000
Density	2500.00000	Density	2500.00000	Density	2500.00000
Extra ID	0	Extra ID	0	Extra ID	0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

As coberturas dos edifícios foram especificadas de acordo com o componente do Quadro 15, laje de concreto e contrapiso, e representadas no modelo como na Figura 64.

Figura 64 - Componente da cobertura dos edifícios.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

A partir da definição de materiais e componentes, foi feito teste de sensibilidade para ver se o modelo representaria diferenças entre componentes construtivos e seus acabamentos nas condições microclimáticas externas, no nível do pedestre. O teste foi realizado com uma quadra do cenário paramétrico de altura 44 m e o resultado analisado foi uma média dos valores de TRM no nível do pedestre, a 1,5 m do solo, na área demarcada em vermelho (Figura 65). Aqui cabe uma ressalva em relação às condições de exposição ao sol ou sombreamento para esse arranjo e época do ano simulada, porque vão afetar muito os resultados.

Figura 65 - Quadra do cenário paramétrico teste.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Analizando os resultados (Gráfico 10), observa-se que o tijolo cerâmico branco e o bloco de concreto branco apresentaram mesmo comportamento, com praticamente uma linha sobreposta a outra. A partir disso, decidiu-se simular apenas o concreto branco e considerar seu resultado como similar à cerâmica branca. Ambos foram os que mais contribuíram para valores mais altos de TRM no nível do pedestre. Em seguida, vidros refletores e absorptivos apresentaram comportamento muito semelhante; ambos contribuem para aumento da TRM no entorno durante o dia, mais do que o vidro mais transmissivo, mas também são os que perdem calor mais rápido durante a noite, fazendo do ambiente ao seu redor o mais ameno no período noturno.

O cenário com tijolo cerâmico pintado de preto também apresentou mesmo comportamento durante o dia em relação aos cenários com os vidros absorptivo e refletor; porém, durante a noite, contribuiu para aumento da TRM mais do que os vidros, resultando no mesmo comportamento noturno se comparado ao tijolo cerâmico branco e ao bloco de concreto branco. O componente que resultou na maior TRM no período noturno foi o bloco de concreto pintado de preto; porém, durante o dia, foi o cenário com a menor TRM no centro da quadra, pois o componente absorve a maior parte da radiação.

Gráfico 10 - Média da TRM no centro da quadra a 1,5m do solo.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Com relação à Tar externa no meio da quadra (Gráfico 11), no período da manhã, todos os componentes e acabamentos se comportam de forma muito semelhante porque as superfícies estão na sombra; já no período entre 11h e 15h os vidros absorvivo e refletor contribuem para aumento da Tar externa, seguidos pelo vidro transmissivo e pelo tijolo cerâmico pintado de branco. O bloco de concreto pintado de preto e de branco resultam em menor Tar externa nesse período do dia, enquanto o tijolo cerâmico pintado de preto resultou em aumento da Tar externa no período da tarde, entre 14h e 18h.

No período noturno o bloco de concreto pintado de preto resultou em Tar mais elevada, seguido pelo tijolo cerâmico pintado de preto e de branco e pelo bloco de concreto pintado de branco, que resultam praticamente na mesma Tar externa; já os vidros são os que resultam em menor Tar noturna, no centro da quadra.

Gráfico 11 - Média da Tar no centro da quadra, a 1,5m do solo.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Após esse primeiro teste de sensibilidade, o componente tijolo cerâmico pintado de branco foi eliminado dos testes com os demais cenários, pois apresentou comportamento muito próximo ao do bloco de concreto pintado de branco nas análises de TRM; já na análise de Tar apresentou comportamento muito próximo ao do tijolo cerâmico pintado de preto no período noturno.

O vidro absoritivo também foi excluído dos testes com os demais cenários, pois nesse primeiro teste mostrou comportamento muito semelhante ao vidro refletor durante o dia e aos outros vidros durante a noite, para TRM e Tar.

A análise será então composta de 3 cenários para geometria e 3 para componentes construtivos, sendo que o bloco de concreto terá dois acabamentos, tijolo cerâmico, um, e o vidro, duas configurações, totalizando 15 cenários a serem simulados (Quadro 16).

Quadro 16 - Cenários a serem simulados.

Geometria	Componente	Acabamentos/Configurações
cenário 44m	Bloco de concreto	Branco Neve
		Preto
	Tijolo cerâmico	Preto
	Vidro laminado	Refletor
		Transmissivo
cenário 88m	Bloco de concreto	Branco Neve
		Preto
	Tijolo cerâmico	Preto
	Vidro laminado	Refletor
		Transmissivo
cenário 119 m	Bloco de concreto	Branco Neve
		Preto
	Tijolo cerâmico	Preto
	Vidro laminado	Refletor
		Transmissivo

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Como as áreas de maior densidade previstas pelo plano diretor estarão localizadas nos eixos onde se tem mais infraestrutura de transporte, a via que circunda a quadra principal dos cenários tem as mesmas dimensões da avenida Paulista, com 10m de calçada de cada lado (que pode ser 5m de recuo dos edifícios e 5m de calçada ou 10m de calçada nas áreas que terão mais circulação de pessoas, como nas entradas e saídas dos metrô), 12,5m de leito carroçável e 5m de ciclovia no canteiro central.

Como se pretende avaliar o comportamento no entorno da área edificada, no nível do pedestre, e os locais por onde circulam mais pedestres são as calçadas e não os miolos de quadra, então os cenários contemplam também os edifícios que estão rentes às vias, nas quadras lindeiras à quadra localizada no centro do modelo.

Todos os cenários apresentam mesma área de 108.900 m², com 330m x 330m, em grades de 2,5m x 2,50m, que refletem dimensões dos edifícios e da avenida Paulista. No eixo vertical as dimensões e quantidade de grades variam para se adaptar à altura de cada cenário. O quadro 17 mostra descrições da modelagem de cada um dos cenários.

Quadro 17 – Características dos cenários simulados.

<p>Cenário 44m</p>	Dimensões do modelo (m)	330 x 330 x 90
	Dimensões do modelo (grades)	132 x 132 x 30
	Tamanho das grades (m)	2.5 x 2.5 x 3
	Telescoping Factor (%)	0
	Iniciar telescoping em (m)	0
<p>Cenário 81m</p>	Dimensões do modelo (m)	330 x 330 x 189
	Dimensões do modelo (grades)	132 x 132 x 40
	Tamanho das grades (m)	2.5 x 2.5 x 4
	Telescoping Factor (%)	1
	Iniciar telescoping em (m)	10
<p>Cenário 119m</p>	Dimensões do modelo (m)	330 x 330 x 363
	Dimensões do modelo (grades)	132 x 132 x 45
	Tamanho das grades (m)	2.5 x 2.5 x 4
	Telescoping Factor (%)	4
	Iniciar telescoping em (m)	30

Fonte: Elaborado pela própria autora

As paredes dos edifícios para cada um dos cenários serão modeladas com os 5 materiais de fachada definidos no item anterior; o piso das vias (asfalto), das quadras (concreto) (Figura 66) e a cobertura dos edifícios (laje de concreto (Figura 64 página 143) serão compostos pelos mesmos materiais em todos os 15 cenários.

Figura 66 - Superfície dos cenários com asfalto nas vias e concreto nas quadras e canteiros centrais.

Fonte: Elaborado pela própria autora

Pavimentos das quadras e canteiro central das avenidas são compostos por concreto e suas características térmicas são apresentadas na Figura 67.

Figura 67 - Características dos materiais dos pavimentos das quadras e canteiros centrais.

Database-ID: [00002B] Name: <u>Cement Concrete</u> Color: 	
Parameter	Value
Typ of material	Artificial material
Water content at saturation	0.00000
Water content at field capacity	0.00000
Water content at wilting point	0.00000
Matrix potential	0.00000
Hydraulic conductivity	0.00000
Volumetric heat capacity	2.08300
Clapp & Hornberger Constant	0.00000
Heat Conductivity	1.63000
Additional Value 1	0.00000
Additional Value 2	0.00000

Database-ID: [PAV001] Name: <u>Pavimento</u> Color: 	
Parameter	Value
z0 Roughness Length	0.01000
Albedo	0.40000
Emissivity	0.90000
ExtraID	0
Surface is irrigated	False
Additional Value 1	0.00000
Additional Value 2	0.00000

Fonte: Elaborado pela própria autora

As vias foram compostas por asfalto à base de gnaise em uma espessura de 40 cm e o solo Sandy Clay Loam, baseado em Shinzato (2016), conforme características indicadas na Figura 68.

Figura 68 - Características do solo e do asfalto dos cenários.

Fonte: Elaborado pela própria autora

Cada um dos 15 cenários consumiu 3 dias de simulação, e foram utilizados 4 computadores simultaneamente, com 8 processadores lógicos e 4 núcleos.

4.4 Tratamento dos resultados

Para análise estatística foi utilizada análise de variância (ANOVA) como modelo linear. A ANOVA verifica se existe diferença significativa entre médias de duas ou mais populações e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. A hipótese nula afirma que todas as médias de população (médias de nível de fator) são iguais, enquanto a hipótese alternativa afirma que pelo menos uma é diferente. ANOVA é considerada um caso especial de regressão linear que, por sua vez, é um caso especial do modelo linear geral. O modelo linear generalizado (GLM) é um método estatístico utilizado para descrever relação estatística entre um ou mais preditores em função de uma variável contínua. O GLM codifica níveis de fatores com codificação binária (0, 1) e esse procedimento é utilizado para determinar se as médias de dois ou mais grupos são diferentes (AGRESTI, 2015).

Para aplicação do modelo é necessário que as amostras sejam aleatórias e independentes, os erros devem seguir distribuição normal e as variâncias devem ser iguais (BUSSAB & MORETTIN, 2017).

Com os resultados obtidos, aplicou-se teste de Tukey para testar a hipótese de que qualquer fonte de variação no modelo é igual a zero, para comparar cada média de grupo com qualquer outra média de grupo e identificar se há diferença significativa entre os resultados obtidos (AGRESTI, 2015).

A ANOVA identifica de que forma os fatores analisados influenciam nas variáveis de interesse. Os fatores utilizados incluíram componentes construtivos (bloco de concreto com acabamento branco e preto, tijolo cerâmico com acabamento preto e dois tipos de vidros: laminado refletor e laminado transmissivo), orientação das vias (N-S, L-O e meio da quadra) e altura dos edifícios (44m, 81m e 119m). As variáveis resposta incluíram temperatura do ar (Tar), temperatura radiante média (TRM) e o índice de temperatura equivalente percebida (TEP) nos horários 5h e 12h.

Para analisar essas influências é possível ajustar modelo de ANOVA somente com efeitos principais ou modelo de ANOVA com interações. No primeiro caso obteve-se a influência média de cada fator sobre a variável resposta quando esse é considerado isoladamente. Por exemplo, este modelo poderia indicar que, se o componente vidro laminado transmissivo for utilizado ao invés do concreto branco, então a Tar às 5h será, em média, menor no espaço externo a 1,5 m do solo. Devido ao baixo número de parâmetros, este modelo é facilmente interpretável. Já o modelo ANOVA com interações captura a influência combinada de diversos fatores atuando

simultaneamente. Por exemplo, este modelo poderia indicar que quando a altura do edifício é de 44m, a TRM às 12h é semelhante nos eixos Leste-Oeste e no meio da quadra. Por outro lado, o modelo também poderia indicar que, quando a altura do edifício é 81m, a TRM às 12h é consideravelmente menor no eixo Leste-Oeste do que no meio da quadra. Assim, no modelo com interações, o efeito do eixo sobre a temperatura pode variar de acordo com a altura do edifício. Esse modelo é mais geral do que o anterior, mas é mais difícil de interpretar devido à quantidade elevada de parâmetros.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Comparação entre dados medidos e simulados

O Gráfico 12 apresenta comparação entre dados medidos e simulados para os dois pontos, Paulista e Bela Vista. A Tar se comportou praticamente igual no período da noite até às 11h da manhã quando, pela influência da radiação solar incidente, a temperatura medida acabou ficando um pouco mais alta do que a simulada, chegando a 1,2°C a mais às 13h no ponto Bela Vista e a 0,6°C a mais às 13h no ponto Paulista. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra resultados da análise estatística r^2 (coeficiente de determinação) e rmse (raiz do erro médio quadrático) para os dois pontos. O r^2 para Tar foi de 0,99 para os dois pontos, o que é uma ótima correlação. A diferença foi muito pequena, o que significa que o modelo representa bem a Tar.

Gráfico 12 - Temperaturas do ar, de globo e radiante média medidas e simuladas

Fonte: Elaborado pela própria autora.

No caso da temperatura radiante média o modelo acompanhou a curva do dado medido, mas sempre um pouco abaixo da TRM calculada pela temperatura de globo. A temperatura radiante média é mais sensível à radiação, portanto, como o modelo representa média dos materiais que estão no local e não os materiais exatos, isso pode ter influenciado nos resultados também. Se for observado o teste estatístico r^2 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) percebe-se que o modelo teve bom desempenho ao representar ambas temperaturas com valores de 0,93.

Tabela 2 - Análise estatística da comparação entre dados medidos e simulados.

variável	r2	rmse
Tar Paulista	0,99	0,26
Tar Bela Vista	0,99	0,35
TRM_Paulista_globo-cinza	0,93	6,22
TRM_BelaVista_globo-cinza	0,93	7,04

Fonte: Elaborado pela própria autora

O que mais chamou a atenção nessa etapa da simulação foi o resultado noturno, pois pelo modelo a TRM chegou a 14°C no momento mais frio, enquanto a TRM calculada pelo globo chegou a um mínimo de 21°C. Por causa dessa diminuição à noite pode-se questionar que talvez a radiação de onda longa possa não estar sendo tão bem representada, ou que, pelo fato de os edifícios não estarem representados sem toda a sua estrutura interna, como lajes e paredes, não tenha acumulado o calor que de fato ocorre na situação real.

Ao ser questionado sobre os resultados o Prof. Helge Simon ponderou que¹⁴:

“The forced longwave radiation is only for the radiation coming from the sky. The model calculates all other longwave radiation depending on surface temperatures and physical parameters (emissivity, etc.). I am not so sure that the model is wrong – given all input parameters the model might be very correct. You must consider that it only ran for 48 hours and that the building materials are only an estimate.” Sendo assim, no seu conjunto, os resultados foram considerados bastante satisfatórios.

¹⁴ Informação obtida por e-mail trocado com o prof. Dr. Helge Simon, um dos desenvolvedores do modelo ENVI-met, no dia 11 de agosto de 2019.

O Gráfico 13 apresenta comparação do índice de temperatura equivalente percebida (TEP) (MONTEIRO; ALUCCI, 2012) calculado a partir da TRM calculada com a temperatura de globo medida *in loco* e do TEP com dados simulados. Os dados do TEP noturno seguiram a TRM medida ao ter resultado simulado bem abaixo do medido. Durante o dia o TEP apresentou boa correlação, exceto para o ponto Paulista no qual, no período mais quente do dia, o TEP medido foi mais alto do que o simulado. Os dados de TEP obtidos a partir da TRM calculada com a temperatura de globo medida *in loco* apresentaram sensação de neutralidade para o período noturno, o que significa que, mesmo em um período com temperaturas bem altas, e com o efeito de aquecimento noturno constatado pela comparação em relação às outras estações fixas de referência (ver item 4.2.2), à noite a sensação térmica nos espaços externos é ainda considerada confortável.

Gráfico 13 - TEP medido x simulado.

Fonte: Elaborado pela própria autora

Especialmente para análise dos resultados deste trabalho, o Prof. Helge Simon desenvolveu ferramenta que calcula média dos resultados em determinados pontos do modelo, incluindo TEP (Figura 70). A ferramenta funciona da seguinte maneira: área do modelo onde se interessa ter resultados é escolhida, em seguida coordenadas que descrevem essa área são inseridas (i_{min} e i_{max} - corresponde ao eixo x; j_{min} e j_{max} - eixo y e k_{level} corresponde a altura em metros) e o caminho do arquivo com os resultados das simulações. Após essa especificação da área desejada e do caminho para o arquivo é preciso clicar no ícone “calc TEP”. A partir disso, o modelo irá calcular a média do TEP para aquela área e altura selecionadas e gerará arquivo em forma de tabela com valores; além disso, também irá calcular valor de TEP para todas as grades da simulação, fazendo com que seja possível a leitura dos resultados por meio dos mapas gerados pela ferramenta Leonardo.

Figura 70 - Ferramenta para análises dos resultados.

The image shows a software window titled 'Form1'. On the left side, there are five vertical input fields, each with a numeric value '0' and a small up/down arrow icon. To the right of these fields are labels: 'i_min', 'i_max', 'j_min', 'j_max', and 'k level'. To the right of the 'i_min' field is a text input box containing 'pathToSIMOUT'. To the right of this text box is a blue button labeled 'load files'. Below the text box and button is a large, empty rectangular area. At the bottom center of the window is a button labeled 'calc TEP'.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

A ferramenta gera uma pasta chamada TEP. Nela há um arquivo em forma de tabela com a média horária de TEP para região selecionada, além dos arquivos em formato .EDX com valores horários do TEP e de todas as variáveis que influenciam seu cálculo (Tar, TRM, umidade relativa do ar e velocidade do ar) para serem lidas pela ferramenta Leonardo, tornando possível a geração de mapas com resultados de TEP (Figura 71).

Figura 71 - Estrutura de arquivos da ferramenta.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

5.3 Resultados de temperatura radiante média

5.1.1 Para período de 24 horas

Os gráficos 14 a 16 foram obtidos a partir da média dos dados de TRM no nível do pedestre, dos dois lados das orientações N-S e L-O, nota-se que, para os três cenários e as duas orientações, o pico da TRM foi às 12h. O comportamento da TRM para diferentes componentes construtivos e acabamentos superficiais seguiu a mesma tendência nos 3 cenários e 2 orientações para horário das 12h, sendo que o concreto branco foi o que resultou na maior TRM no espaço externo, seguido pelo vidro laminado refletor, tijolo cerâmico preto, concreto preto e vidro laminado transmissivo; nesses dois últimos resultaram nos mesmos valores.

No período noturno os resultados de TRM para diferentes componentes construtivos e acabamentos superficiais também seguiram a mesma tendência nos 3 cenários e 2 orientações, com o concreto preto resultando na TRM mais alta, seguido

pelo tijolo cerâmico preto e pelo concreto branco, estes dois últimos muito próximos, e pelos dois tipos de vidros que resultaram nas mesmas condições.

Durante o período mais quente do dia com predomínio da radiação de ondas curtas, o que influenciou mais na TRM foi o acabamento das superfícies, sendo que o albedo de uma pintura branca pode resultar em valores até mais elevados para o ambiente externo do que um vidro refletor. Durante a noite, quando predominam trocas radiantes de ondas longas, o tipo de componente acaba influenciando mais nas condições externas, sendo que os materiais que retêm mais calor (tijolo cerâmico e bloco de concreto) aqueceram mais o entorno do que as superfícies envidraçadas. O tipo de acabamento superficial também exerce influência, porém, menor do que o componente propriamente dito, sendo que as superfícies escuras, por absorverem mais calor, resultam em ambientes externos mais aquecidos quando comparadas às superfícies mais claras.

Ao analisar cada gráfico, nota-se diferença quanto ao período com que cada orientação apresenta maior valor de TRM média para cenários com mesmo material e acabamento de superfície. No caso do cenário com edifícios a 44 m, as vias com orientação N-S apresentaram maior TRM que as L-O, entre 10h e 14h. Já as vias L-O apresentaram leve aumento na TRM em relação às N-S entre 6h e 10h e entre 15h e 18h (Gráfico 14).

Gráfico 14 - Média horária da temperatura radiante média em um ciclo de 24h para cenários com edifícios de 44m.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

No cenário com edifícios a 81m de altura, vias com orientação N-S apresentaram maior TRM se comparadas as L-O entre 8h e 17h, sendo que as diferenças mais altas são observadas entre 10h e 14h. O aumento da TRM no período da manhã, entre 8h e 10h, e também entre 14h e 17h ocorreu pelo fato do cenário 81m ter maior espaçamento entre os edifícios e, assim, permitir a passagem dos raios solares nesse período, principalmente nos horários em que os raios solares vinham da direção dos edifícios da borda do modelo, aumentando a TRM da via localizada no mesmo lado. Já as vias orientadas a L-O apresentaram maior TRM em relação às orientadas a N-S entre 6h e 7h, devido a maior incidência solar nesse eixo. No mesmo período, essa diferença já não é percebida à tarde, pois superfícies sombreadas no eixo N-S já acumularam calor nesse período, diminuindo a diferença com relação ao eixo L-O (Gráfico 15).

Gráfico 15 - Média horária da temperatura radiante média em um ciclo de 24h para cenários com edifícios de 81m.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

No cenário com edifícios a 119m as vias no eixo N-S apresentaram maior TRM em relação as L-O entre 11h e 17h. Já entre 6h e 11h as duas orientações apresentaram comportamentos muito semelhantes (Gráfico 16). Esse comportamento similar entre as duas orientações no período da manhã se deve ao fato desse cenário ter menor taxa de ocupação, com distribuição mais homogênea da radiação solar entre edifícios nas duas direções das vias; esse mesmo comportamento não se repete à tarde, pois no período entre 11h e 14h, as vias na orientação N-S estão bastante expostas à radiação solar, diferentemente das vias na orientação L-O, que ficam sombreadas devido à altura dos edifícios e a orientação solar. Assim, mesmo que após as 14h haja incidência mais uniforme da radiação solar, as vias no eixo N-S já estão com a TRM muito mais alta, o que pode ser observado no Gráfico 16.

Gráfico 16 - Média horária da temperatura radiante média em um ciclo de 24h para cenários com edifícios de 119m.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Com relação aos materiais e acabamentos de superfície, os cenários com fachadas de bloco de concreto com acabamento branco apresentaram TRM mais elevada para 2 orientações e 3 alturas, no período diurno, entre 6h e 18h. Isso ocorre, pois esse é o acabamento mais refletor, dentre os simulados, refletindo 90% da radiação de onda curta. No período noturno, o componente que resultou na TRM mais elevada, nos 3 cenários, foi o bloco de concreto preto que, ao contrário do branco, absorve 97% da radiação de onda curta, seguido pelo tijolo cerâmico preto. O bloco de concreto resultou em TRM mais elevada se comparado ao tijolo cerâmico, pois o bloco apresenta maior capacidade térmica, ou seja, absorve mais calor e tem maior condutibilidade térmica, tendo assim maior admitância térmica se comparado ao tijolo cerâmico preto.

O Quadro 18 ajuda a visualizar como a geometria influencia na quantidade de radiação direta incidente nos cenários. As vias L-O são mais sombreadas pelos edifícios do que as vias N-S, pois o eixo L-O acaba apresentando áreas sombreadas em todos os períodos do dia, enquanto o eixo N-S fica completamente exposto à

radiação solar às 12h para 3 cenários. O cenário com edifícios mais baixos apresenta áreas com incidência da radiação solar direta nos 2 eixos, ao longo do dia.

Quadro 18 - Radiação direta (W/m²) em 3 horários no nível do pedestre para 3 cenários de edifícios.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

5.1.2 Para horário com TRM mais alta

Em função dos componentes construtivos e seus acabamentos, além de fortemente influenciado pela geometria, o horário em que em todos os cenários resultaram na maior TRM foi às 12h. O Quadro 19 mostra distribuição da TRM no nível do pedestre nesse horário em todos os cenários. Observa-se considerável influência da geometria, pelo sombreamento dos edifícios, e dos materiais e acabamentos superficiais pelas manchas circulares no centro do modelo, com TRM mais elevada, principalmente nas superfícies mais refletoras, como bloco de concreto branco e vidro laminado refletor. Essa influência vai diminuindo conforme aumenta a altura dos edifícios.

Quadro 19 - Distribuição da TRM às 12h no nível do pedestre (1,50m) em todos os cenários.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Outra influência visível na TRM às 12h foi a do FVC (Quadro 20). Para os cenários de mesma altura, os locais com maior FVC apresentaram TRM menores se comparados aos locais com menor FVC. Essa influência é mais intensa nos cenários

com materiais mais refletores, pois quanto menor o FVC maior será o calor armazenado pelas reflexões entre superfícies edificadas.

Quadro 20 - FVC para 3 cenários de altura (m) a partir do nível do pedestre.

A análise estatística realizada para 12h mostrou que o vidro laminado transmissivo apresentou TRM mais baixa de forma geral (Tabela 3). O componente que resultou na TRM mais elevada foi bloco de concreto com acabamento branco que, em média, apresenta TRM 8,1°C mais do que o vidro laminado transmissivo.

Tabela 3 - Desempenho dos materiais e acabamentos em relação à média da TRM às 12h.

Materiais	Ranking	Diferença da TRM (°C)
Bloco de concreto branco	5	8,1
Vidro laminado refletor	4	3,5
Tijolo cerâmico preto	3	1,9
Bloco de concreto preto	2	0,3
Vidro laminado transmissivo	1	0,0

Fonte: Elaborado pela própria autora

Nos horários mais quentes do dia, bloco de concreto branco e vidro laminado refletor resultam nas TRM mais elevadas no meio externo, pois refletem grande parte da radiação de onda curta incidente. Tijolo cerâmico e bloco de concreto preto, apesar de apresentarem temperatura superficial mais alta do que os componentes anteriores, emitem mais radiação de onda longa com menor impacto na TRM para o meio externo. Tendo em vista a relação interior/externo, vale ressaltar que com o vidro laminado

transmissivo, a maior parte da radiação é transmitida para o interior do edifício, sendo importante buscar a compatibilidade entre o melhor desempenho térmico entre as duas escalas.

Após análise com teste de Tukey (Tabela 4), identificou-se que não há diferença estatisticamente significativa entre bloco de concreto preto e vidro laminado transmissivo para todas alturas e eixos e também entre bloco de cerâmico preto e vidro transmissivo nos edifícios com 119m no eixo N-S. Demais comparações apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

As diferenças na TRM entre cenários com diferentes materiais estão diretamente relacionadas com quantidade de radiação total (onda longa + onda curta) que chega à superfície dos edifícios, vinda diretamente do sol ou refletida e emitida pelas superfícies adjacentes. Já próximo às superfícies onde há incidência de radiação solar direta, a TRM apresentou também correlação com quantidade de radiação emitida e refletida por elas. O comportamento da TRM apresentou baixa correlação com temperatura de superfície das fachadas e com Tar na frente da fachada.

Tabela 4 - Média, desvio padrão e teste de Tukey da TRM (°C) às 12h para diferentes materiais conforme altura dos edifícios (m) e eixos.

CB	CeP	CP	VR	VT	CB x CeP	CB x CP	CB x VR	CB x VT	CeP x CP	CeP x VR	CeP x VT	CP x VR	CP x VT	VR x VT
60,6 ± 0,3	55,0 ± 0,3	53,6 ± 0,3	56,6 ± 0,3	53,4 ± 0,3	***	***	***	***	*	**	**	***	ns	***
69,9 ± 0,3	64,9 ± 0,3	63,6 ± 0,3	66,2 ± 0,3	63,4 ± 0,3	***	***	***	***	ns	*	**	***	ns	***
61,6 ± 0,3	55,3 ± 0,3	53,7 ± 0,3	56,8 ± 0,3	53,4 ± 0,3	***	***	***	***	***	**	***	***	ns	***
71,9 ± 0,3	66,2 ± 0,3	64,7 ± 0,3	67,6 ± 0,3	64,5 ± 0,3	***	***	***	***	**	*	***	***	ns	***
57,4 ± 0,2	50,7 ± 0,2	49,0 ± 0,2	52,4 ± 0,2	48,7 ± 0,2	***	***	***	***	***	***	***	***	ns	***
70,9 ± 0,2	65,0 ± 0,2	63,6 ± 0,2	66,5 ± 0,2	63,3 ± 0,2	***	***	***	***	**	**	***	***	ns	***

* p < 0,05 ** p < 0,01 *** p < 0,001 ns = diferença não significativa

CB= concreto branco; CeP=cerâmica preta; CP= concreto preto; VR= vidro refletor; VT= vidro transmissivo; N-S= eixo Norte-Sul; L-O= eixo Leste-Oeste

Para análises em função da geometria urbana, foram considerados edifícios com alturas de 44m, 81m e 119m, com diminuição na taxa de ocupação com o aumento da altura. Cenários com 81m de altura apresentaram menor TRM às 12h; em seguida vieram cenários com altura de 119m e, por último, com altura de 44m (Tabela 5). O aumento da TRM no cenário 119m foi devido ao fato dos edifícios serem mais altos e também mais esbeltos. Assim, os recuos laterais são maiores do que o de 81m, fazendo com que adentre mais radiação de onda curta direta no nível do pedestre. Já o de 44m, mesmo tendo recuos menores, é o que apresenta TRM mais alta, pois os edifícios propiciam menor sombreamento (Quadro 18).

Tabela 5 - Resultados das diferentes geometrias edificadas em relação à média da TRM às 12h.

Altura (m)	Ranking	Diferença da TRM (°C)
44	3	2,4
119	2	2,0
81	1	0,0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Ao analisar a diferença entre alturas por componente e eixo por meio do teste de Tukey (Tabela 6), observa-se que para bloco de concreto preto e vidro transmissivo na orientação N-S não há diferença significativa entre as 3 alturas; já para bloco de concreto branco, tijolo cerâmico preto e vidro refletor nos eixos N-S não há diferença significativa entre cenários 119m x 81m e 44m x 81m, mas há diferença significativa entre cenários 44m e 119m. O fato de não haver diferença significativa na TRM entre a maioria dos cenários com alturas diferentes no eixo N-S é devido a altura e azimuth solar às 12h em abril, pois o Sol está localizado no azimuth 0° e altura 55°, o que faz com que a altura dos edifícios interfira mais no comportamento no eixo L-O do que no eixo N-S.

Assim, para o eixo N-S não faz diferença se houver edifícios de 81m ou 119m ou de 44m e 81m, mas sim de 119m e 44m, em que pode ser observada diminuição estatisticamente significativa na TRM do cenário mais alto para alguns componentes construtivos, como tijolo cerâmico preto, vidro refletor e bloco de concreto branco, pois

nesses casos a quantidade de material que está mais próxima do pedestre nos cenários de 44m é maior do que a que está nos cenários com 119m, com menor taxa de ocupação. Isso ocorre em menor intensidade nos cenários bloco de concreto preto e vidro transmissivo devido a menor influência que esses componentes exercem na TRM no nível do pedestre quando localizados nas superfícies edificadas (Tabela 4).

Já no eixo L-O, altura e azimuth solar passam a ter influência significativa às 12h em abril, tendo diferença significativa entre alturas 81m x 119m e 81 x 44m, mas não entre 44m x 119m, pois nesse caso os recuos são maiores e a taxa de ocupação é menor, fazendo com que mais radiação penetre nesse cenário quando comparado ao de 44m com espaçamentos menores. Assim, a insolação recebida no nível do pedestre por conta da altura mais baixa no cenário 44m é quase a mesma recebida no cenário 119m, mas não por causa da altura, mas pelo espaçamento maior entre os edifícios.

Tabela 6 - Média, desvio padrão e teste de Tukey da TRM (°C) às 12h para diferentes alturas (m), componentes construtivos, acabamentos superficiais e eixos.

119m	44m	81m	119 x 44	119 x 81	44 x 81	mat_eixo
60,60 ± 0,25	61,59 ± 0,25	57,41 ± 0,24	ns	***	***	CB/L-O
69,94 ± 0,25	71,9 ± 0,25	70,91 ± 0,24	***	ns	ns	CB/N-S
55,03 ± 0,25	55,31 ± 0,25	50,7 ± 0,24	ns	***	***	CeP/L-O
64,85 ± 0,25	66,21 ± 0,25	65,03 ± 0,24	*	ns	ns	CeP/N-S
53,61 ± 0,25	53,67 ± 0,25	49,02 ± 0,24	ns	***	***	CP/L-O
63,56 ± 0,25	64,73 ± 0,25	63,55 ± 0,24	ns	ns	ns	CP/N-S
56,55 ± 0,25	56,84 ± 0,25	52,4 ± 0,24	ns	***	***	VR/L-O
66,24 ± 0,25	67,59 ± 0,25	66,51 ± 0,24	*	ns	ns	VR/N-S
53,43 ± 0,25	53,35 ± 0,25	48,71 ± 0,24	ns	***	***	VT/L-O
63,40 ± 0,25	64,45 ± 0,25	63,29 ± 0,24	ns	ns	ns	VT/N-S

* p < 0,05 ** p < 0,01 *** p < 0,001 ns = diferença não significativa

CB = concreto branco; CeP =cerâmica preta; CP = concreto preto; VR = vidro refletor; VT = vidro transmissivo; alturas dos edifícios: 119m, 81m e 44m; N-S = eixo Norte-Sul; L-O = eixo Leste-Oeste

De forma geral, a TRM obtida nessa época do ano para as 12h é maior no eixo N-S do que no eixo L-O, a diferença é em média de 11,59°C para mais no eixo N-S do que no L-O (Tabela 7). Isso devido ao sombreamento do eixo N-S para essa época do ano e horário. O meio da quadra fica mais sombreado que o eixo N-S, mas menos sombreado que o eixo L-O, apresentando resultado intermediário entre os dois eixos, com 2,53 °C a mais que o eixo L-O e 9,06 °C a menos que o eixo N-S.

Tabela 7 - Resultados dos diferentes eixos e miolo da quadra em relação à média da TRM às 12h.

Eixos/miolo da quadra	Ranking	Diferença da TRM (°C)
Norte-Sul	3	11,6
Miolo da quadra	2	2,5
Leste-Oeste	1	0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Na Tabela 8 o resultado do teste de Tukey mostra que todas as diferenças para o eixo N-S são estatisticamente significativas. Quando o eixo L-O é analisado com o miolo da quadra, a diferença não é significativa nos cenários com altura de 44m m, exceto concreto branco, fazendo com que miolo da quadra e eixo L-O tenham mesmo comportamento nesses eixos. As maiores diferenças entre os eixos estão entre cenários com altura 81m, por ser esse o que propiciou maior área sombreada no eixo L-O, seguido pelos cenários com altura 44m e, depois, os de altura 119m.

Tabela 8 - Média, desvio padrão e teste de Tukey da TRM (°C) às 12h para dois eixos conforme componentes construtivos, acabamentos superficiais, eixos, miolo da quadra e alturas (m).

L-O	N-S	Meio	L-O x N-S	L-O x meio	NS x meio	mat_alt
60,60 ± 0,25	69,9 ± 0,25	63,48 ± 0,30	***	***	***	CB/119
61,59 ± 0,25	71,9 ± 0,25	64,46 ± 0,42	***	***	***	CB/44
57,41 ± 0,24	70,9 ± 0,24	62,73 ± 0,34	***	***	***	CB/81
55,03 ± 0,25	64,9 ± 0,25	57,18 ± 0,30	***	***	***	CeP/119
55,31 ± 0,25	66,2 ± 0,25	55,61 ± 0,42	***	ns	***	CeP/44
50,7 ± 0,24	65,0 ± 0,24	54,9 ± 0,34	***	***	***	CeP/81
53,61 ± 0,25	63,6 ± 0,25	55,48 ± 0,30	***	**	***	CP/119
53,67 ± 0,25	64,7 ± 0,25	53,00 ± 0,42	***	ns	***	CP/44
49,02 ± 0,24	63,6 ± 0,24	52,78 ± 0,34	***	***	***	CP/81
56,55 ± 0,25	66,2 ± 0,24	58,89 ± 0,30	***	***	***	VR/119
56,84 ± 0,25	67,6 ± 0,25	57,73 ± 0,42	***	ns	***	VR/44
52,4 ± 0,24	66,5 ± 0,24	56,86 ± 0,34	***	***	***	VR/81
53,43 ± 0,25	63,4 ± 0,25	55,28 ± 0,30	***	**	***	VT/119
53,35 ± 0,25	64,45 ± 0,25	52,54 ± 0,42	***	ns	***	VT/44
48,71 ± 0,24	63,29 ± 0,24	52,42 ± 0,34	***	***	***	VT/81

* p < 0,05 ** p < 0,01 *** p < 0,001 ns = diferença não significativa
 CB = concreto branco; CeP =cerâmica preta; CP = concreto preto; VR = vidro refletor; VT = vidro transmissivo; alturas dos edifícios: 119m, 81m e 44m; N-S = eixo Norte-Sul; L-O = eixo Leste-Oeste

A diferença na TRM ao longo dos eixos para o conforto na área externa varia conforme a época do ano. O Quadro 21 apresenta quantidade de horas de sol para 3 cenários de altura ao longo do ano. A orientação L-O apresenta menos horas de sol às 12h do que a orientação N-S no solstício de inverno. Já no solstício de verão a orientação L-O apresenta mais horas de sol às 12h, por conta da altura solar no horário (de 90° para essa época do ano), propiciando assim menos sombreamento nos 3 cenários.

Avaliando as horas de sol nos 3 cenários no período de 1 ano, observa-se que os 3 cenários apresentam aumento na área sombreada nos meses do inverno (março a setembro), se comparado aos meses de verão (setembro a março), que apesar de receberem mais radiação, se beneficiam do fato de ser o período com maior nebulosidade durante o ano.

Por esse trabalho realizar análise em uma data específica do ano, outros estudos em períodos diferentes do ano precisam ser realizados para descobrir melhores estratégias nessas outras épocas do ano e para saber o quanto o comportamento nas horas mais quentes diverge deste estudo.

Quadro 21 - Horas de sol ao longo do dia em diferentes épocas do ano para 3 cenários de alturas.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Após a elaboração de ranking com resultados de todos os componentes construtivos às 12h (Quadro 22), observa-se que todos os cenários do eixo L-O apresentaram menor TRM do que os do eixo N-S. No eixo L-O os cenários que apresentaram menor TRM foram os com altura 81m, já nos cenários do eixo N-S foram os vidros transmissivos e bloco de concreto preto, ou seja, as superfícies com maior absorvência. Assim, como o eixo N-S não está sombreado por edificações, o parâmetro que mais afetou as diferenças da TRM foi o acabamento das superfícies, já no eixo L-O, como ele apresenta áreas com sombreamento, o que mais colaborou para a variação da TRM foi a geometria dos edifícios, ou seja, arranjo de edifícios que propiciou mais sombra nesse horário resultou em menor TRM.

Quadro 22 - Ranking dos cenários com valores médios mais baixos para TRM às 12h.

[illegible]

5.1.3 Para horário com TRM mais baixa

O horário em que em todos os cenários resultaram em menor TRM foi 5h, conforme esperado, pouco antes do nascer do sol. O Quadro 23 mostra distribuição da TRM no nível do pedestre, nesse horário, em todos os cenários. Observa-se grande influência da materialidade, ou seja, do componente construtivo, com TRM mais alta nos componentes que armazenam mais calor como bloco de concreto e tijolo cerâmico, e a TRM mais baixa nos cenários com vidros.

Outra influência visível nesse período foi FVC (Quadro 20). Em cenários de mesma altura, os locais com maior FVC apresentaram TRM menor se comparados aos locais com menor FVC devido à perda radiante para o fundo de céu.

Quadro 23 - Distribuição da TRM às 5h no nível do pedestre (1,50 m) em todos os cenários.

A análise estatística realizada para esse horário mostrou que o vidro laminado transmissivo apresentou TRM mais baixa de forma geral (Tabela 9). A TRM mais alta foi em bloco de concreto com acabamento preto que, em média, apresenta 3,9°C a

mais na TRM para as 5h. Os resultados também mostram que, no período noturno, o que influencia mais a TRM no ambiente externo é o componente construtivo e, depois, o acabamento superficial, que teve mais impacto nos componentes construtivos que armazenam mais calor.

Tabela 9 - Resultados da TRM em função dos diferentes componentes construtivos e acabamentos em relação à TRM média às 5h.

Componentes construtivos/acabamentos	Ranking	Diferença da TRM (°C)
Bloco de concreto preto	5	3,9
Tijolo cerâmico preto	4	2,9
Bloco de concreto branco	3	2,6
Vidro laminado refletor	2	0,2
Vidro laminado transmissivo	1	0,0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Após análise com teste de Tukey (Tabela 10), identificou-se que há diferença estatisticamente significativa entre componentes construtivos e acabamentos superficiais em todos os cenários.

Tabela 10 - Média, desvio padrão e teste de Tukey da TRM (°C) às 5h para diferentes componentes construídos e acabamentos superficiais conforme altura dos edifícios (m) e eixos.

CB	CeP	CP	VR	VT	CB x CeP	CB x CP	CB x VR	CB x VT	CeP x CP	CeP x VR	CeP x VT	CP x VR	CP x VT	VR x VT	alt_eixo
15,6 ± 0,006	15,9 ± 0,006	16,8 ± 0,006	13,4 ± 0,006	13,1 ± 0,006	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	119/L-O
15,6 ± 0,006	15,9 ± 0,006	16,8 ± 0,006	13,4 ± 0,006	13,1 ± 0,006	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	119/N-S
15,6 ± 0,006	15,8 ± 0,006	16,7 ± 0,006	13,3 ± 0,006	13,2 ± 0,006	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	44/L-O
15,6 ± 0,006	15,8 ± 0,006	16,7 ± 0,006	13,3 ± 0,006	13,2 ± 0,006	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	44/N-S
15,7 ± 0,006	16,0 ± 0,006	16,9 ± 0,006	13,3 ± 0,006	13,2 ± 0,006	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	81/L-O
15,7 ± 0,006	16,0 ± 0,006	16,9 ± 0,006	13,3 ± 0,006	13,2 ± 0,006	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	81/N-S

* p < 0,05 ** p < 0,01 *** p < 0,001 ns = diferença não significativa

CB = concreto branco; CeP =cerâmica preta; CP = concreto preto; VR = vidro refletor; VT = vidro transmissivo;

N-S = eixo Norte-Sul; L-O = eixo Leste-Oeste

Considerando-se a geometria urbana, o cenário com 44m de altura apresentou menor TRM às 5h, seguido pelos cenários com 119m e, por último, com 81m (Tabela 11). A diferença máxima na TRM foi 0,2°C, ou seja, muito pequena. Esse ranking é alterado em cenários com vidros transmissivos, nos quais as alturas 81m e 44m apresentaram mesmos valores, mais elevados, e a altura 119m valores mais baixos; em cenários com vidros refletores a altura 119m apresentou valores mais elevados, seguida das alturas 81m e 44m.

Tabela 11 - Resultados de TRM para geometria edificada em relação à TRM média às 5h.

Altura (m)	Ranking	Diferença da TRM (°C)
81	3	0,2
119	2	0,1
44	1	0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Ao analisar a diferença entre alturas por material e eixo por meio do teste de Tukey (Tabela 12), nota-se que para cenários com bloco de concreto branco não há diferença significativa entre 119m x 44m e entre vidros refletores e transmissivos de 44m x 81m.

Tabela 12 - Média, desvio padrão e teste de Tukey da TRM (°C) às 5h para diferentes alturas (m), conforme componentes construtivos, acabamentos superficiais e eixos.

119	44	81	119 x 44	119 x 81	44 x 81	mat_eixo
15,6 ± 0,006	15,6 ± 0,006	15,7 ± 0,006	ns	***	***	CB/L-O
15,6 ± 0,006	15,6 ± 0,006	15,7 ± 0,006	ns	***	***	CB/N-S
15,9 ± 0,006	15,8 ± 0,006	16,0 ± 0,006	***	***	***	CeP/L-O
15,9 ± 0,006	15,8 ± 0,006	16,0 ± 0,006	***	***	***	CeP/N-S
16,8 ± 0,006	16,7 ± 0,006	16,9 ± 0,006	***	***	***	CP/L-O
16,8 ± 0,006	16,7 ± 0,006	16,9 ± 0,006	***	***	***	CP/N-S
13,4 ± 0,006	13,3 ± 0,006	13,3 ± 0,006	***	***	ns	VR/L-O
13,4 ± 0,006	13,3 ± 0,006	13,3 ± 0,006	***	***	ns	VR/N-S
13,1 ± 0,006	13,2 ± 0,006	13,2 ± 0,006	***	***	ns	VT/L-O
13,1 ± 0,006	13,2 ± 0,006	13,2 ± 0,006	***	***	ns	VT/N-S

* p < 0,05 ** p < 0,01 *** p < 0,001 ns = diferença não significativa

CB = concreto branco; CeP = cerâmica preta; CP = concreto preto; VR = vidro refletor; VT = vidro transmissivo; alturas dos edifícios: 119m, 81m e 44m; N-S = eixo Norte-Sul; L-O = eixo Leste-Oeste

A TRM obtida para essa época do ano no horário das 5h apresenta diferença de 0,04°C para mais no meio da quadra se comparado aos eixos N-S e L-O, sendo que esses eixos não mostraram diferença entre eles nesse horário (Tabela 13).

Tabela 13 - Resultados da TRM (°C) para eixos/miolo da quadra em relação à média da TRM às 5h.

Eixos/miolo da quadra	Ranking	Diferença da TRM (°C)
miolo da quadra	3	0,04
Norte-Sul	2	0
Leste-Oeste	1	0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

O teste de Tukey, Tabela 14, mostra que não há diferença significativa entre os eixos N-S e L-O para 5h, mas que há diferença significativa entre os eixos e o miolo da quadra para esse horário. Essa diferença é devida ao FVC que, por ser menor no miolo da quadra do que nas vias, implica em menor perda de radiação de onda longa no período noturno, ou seja, faz com que o calor acumulado durante o dia demore mais para se dissipar no miolo da quadra no período noturno.

Tabela 14 - Média, desvio padrão e teste de Tukey da TRM (°C) às 5h para eixos e miolo da quadra, conforme componentes construtivos, acabamentos superficiais e alturas (m).

L-O	N-S	meio	L-O x N-S	L-O x meio	N-S x meio	mat_alt
15,6 ± 0,006	15,6 ± 0,006	15,8 ± 0,008	ns	***	***	CB/119
15,6 ± 0,006	15,6 ± 0,006	15,8 ± 0,010	ns	***	***	CB/44
15,7 ± 0,006	15,7 ± 0,006	16,0 ± 0,009	ns	***	***	CB/81
15,9 ± 0,006	15,9 ± 0,006	16,2 ± 0,008	ns	***	***	CeP/119
15,8 ± 0,006	15,8 ± 0,006	16,2 ± 0,010	ns	***	***	CeP/44
16,0 ± 0,006	16,0 ± 0,006	16,4 ± 0,009	ns	***	***	CeP/81
16,8 ± 0,006	16,8 ± 0,006	17,3 ± 0,008	ns	***	***	CP/119
16,7 ± 0,006	16,7 ± 0,006	17,6 ± 0,010	ns	***	***	CP/44
16,9 ± 0,006	16,9 ± 0,006	17,6 ± 0,009	ns	***	***	CP/81
13,4 ± 0,006	13,4 ± 0,006	13,1 ± 0,008	ns	***	***	VR/119
13,3 ± 0,006	13,4 ± 0,006	12,2 ± 0,010	ns	***	***	VR/44
13,3 ± 0,006	13,3 ± 0,006	12,8 ± 0,009	ns	***	***	VR/81
13,1 ± 0,006	13,1 ± 0,006	12,8 ± 0,008	ns	***	***	VT/119
13,2 ± 0,006	13,2 ± 0,006	12,1 ± 0,010	ns	***	***	VT/44
13,2 ± 0,006	13,2 ± 0,006	12,8 ± 0,009	ns	***	***	VT/81

* p < 0,05

** p < 0,01

*** p < 0,001

ns = diferença não significativa

CB = concreto branco; CeP = cerâmica preta; CP = concreto preto; VR = vidro refletor; VT = vidro transmissivo; alturas dos edifícios: 119m, 81m e 44m; N-S = eixo Norte-Sul; L-O = eixo Leste-Oeste.

5.4 Resultados de Temperatura Equivalente Percebida

5.2.1 Para período de 24 horas

Os valores do índice TEP seguem a curva da TRM. Para cenários com 44m (Gráfico 17) há sensação de muito calor nos cenários N-S entre 10h15-14h15; nos cenários N-S apenas para 12h no cenário com bloco de concreto branco. A sensação de calor é percebida entre 8h45-16h nos cenários L-O e entre 9h15-11h e 13h15-16h nos cenários N-S. A sensação de pouco calor é percebida das 7h45-10h e entre 15h-17h nos cenários N-S, e entre 8h15-10h e 15h30-17h para os cenários L-O. Em ambas as orientações, entre 17h-00h e 6h-9h, a sensação é de neutralidade, e entre 00h-6h, de pouco frio. Assim, entre 9h-17h15 todos os cenários já estão com sensação de, pelo menos, pouco calor.

Gráfico 17 - Média horária do índice TEP em um ciclo de 24h para cenários de 44m.

Nos cenários com 81m (Gráfico 18) há sensação de muito calor apenas no eixo N-S entre 11h-13h15. A sensação de calor é percebida entre 10h-15h no eixo L-O e entre 10h-16h no eixo N-S. Já a sensação de pouco calor é percebida das 7h15-11h e 14h-17h no eixo N-S; entre 7h15-11h15 e 13h15-17h no eixo L-O. Em ambas as orientações, entre 17h-00h e 6h-10h a sensação é de neutralidade, e entre 00h-6h de

pouco frio. Assim, entre 09h30-17h15 todos os cenários já estão com sensação de pouco calor. Nos cenários com 81m de altura percebe-se que os cenários com concreto pintado de branco já apresentam pouco calor às 7h15 da manhã, 1 hora antes dos demais cenários; à tarde entre 14h-16h esses mesmos cenários saem da sensação de calor 1 hora depois dos demais cenários.

Gráfico 18 - Média horária do índice TEP em um ciclo de 24h para cenários de 81m.

Nos cenários com 119m (Gráfico 19) há sensação de muito calor apenas no eixo N-S entre 11h30-13h. A sensação de calor é percebida entre 10h15-16h nos eixos L-O e N-S. A sensação de pouco calor é percebida das 7h15-11h e entre 14h-17h15 no eixo N-S; e entre 8h-11h e 14h-17h no eixo L-O. Em ambas as orientações, entre 17h-00h e 6h-9h, a sensação é de neutralidade, e entre 00h-6h, de pouco frio. Assim, entre 11h-17h15 todos os cenários já estão com sensação de pouco calor. Ao comparar edifícios com 119m de altura, percebe-se que os cenários com concreto pintado de branco, entre 8h-10h da manhã, atingem mesma temperatura dos demais 1 hora antes; à tarde entre 13h-16h esses mesmos cenários saem da sensação de calor 1 hora depois dos demais cenários.

Gráfico 19 - Média horária do índice TEP em um ciclo de 24h para cenários de 119m.

5.2.2 Para horário com TEP mais alta (12h)

Sob a influência do sombreamento o horário em que em todos os cenários resultaram em maior TEP foi 12h. O Quadro 24 apresenta a distribuição de TEP no nível do pedestre, nesse horário, em todos os cenários. Observa-se grande influência da geometria, pelo sombreamento dos edifícios, e a influência dos componentes construtivos, pelas manchas laranjas nas áreas sombreadas em amarelo, principalmente nos componentes com superfícies refletoras como bloco de concreto branco e vidro laminado refletor. Essas manchas vão diminuindo conforme as superfícies apresentam maior absorvência.

Em vermelho estão áreas com sensação de muito calor, em laranja de calor, e em amarelo de pouco calor. Nesse horário não há espaços com sensação de neutralidade e muito menos frio. Cenários com superfícies mais refletoras fazem com que os espaços, mesmo na sombra, se tornem mais desconfortáveis do que esses mesmos espaços nos cenários com superfícies menos refletoras.

Quadro 24 - Distribuição do TEP às 12h no nível do pedestre (1,50 m) em todos os cenários.

A análise estatística realizada para esse horário mostrou que o vidro laminado transmissivo apresentou no meio externo TEP mais baixa de forma geral (Tabela 15). O componente que resultou na TEP mais alta foi bloco de concreto com acabamento branco que, em média, apresentou 4,3°C a mais no TEP para 12h em relação ao vidro laminado transmissivo.

Tabela 15 - Desempenho dos componentes construtivos e acabamentos superficiais em relação à média do TEP às 12h.

Componentes construtivos e acabamentos superficiais	Ranking	Diferença do TEP (°C)
Bloco de concreto branco	5	4,3
Vidro laminado refletor	4	1,9
Tijolo cerâmico preto	3	1,0
Bloco de concreto preto	2	0,1
Vidro laminado transmissivo	1	0,0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Com relação à geometria urbana, a análise considerou edifícios com altura de 44m, 81m e 119m, com diminuição na taxa de ocupação ao aumentar a altura. Os cenários com 81m de altura resultaram em menor TEP às 12h, seguido por cenários com altura de 119m e, por último, com altura de 44m (Tabela 16). O aumento do TEP no cenário 119m acontece porque os edifícios são mais altos, mas também mais esbeltos, assim, os recuos laterais são maiores do que o de 81m, fazendo com que adentre mais radiação de onda curta direta no nível do pedestre. Já o de 44m, mesmo tendo os recuos menores, é o que apresenta TEP mais alta, pois os edifícios propiciam menos sombra devido à sua altura ser a menor de todas (Quadro 18).

Tabela 16 - Resultados da geometria edificada em relação à média do TEP às 12h.

Altura (m)	Ranking	Diferença do TEP (°C)
44	3	1,5
119	2	0,9
81	1	0,0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

No geral, os valores de TEP resultantes para essa época do ano e horário das 12h são maiores no eixo N-S do que no eixo L-O. A diferença é em média de 6,1°C para mais no eixo N-S do que no L-O (Tabela 17). Isso acontece devido ao sombreamento do eixo N-S para essa época do ano e para o horário. O miolo da quadra fica em uma posição intermediária, resultando em TEP 1,8°C mais alta do que o eixo L-O e 4,29 °C mais baixa do que o eixo N-S.

Tabela 17 - Resultado dos eixos em relação à média da TRM às 12h.

Eixos	Ranking	Diferença do TEP (°C)
Norte-Sul	3	6,1
Meio	2	1,8
Leste-Oeste	1	0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

5.2.3 Para horário com TEP mais baixa (6h)

O horário em que em todos os cenários resultaram em menor TEP foi 6h. O Quadro 25 mostra distribuição de TEP no nível do pedestre, nesse horário, em todos os cenários. Observa-se maior influência dos componentes construtivos no resultado, sendo que cenários com vidros, tanto laminado quanto refletor, apresentaram em toda a área sensação de um pouco frio; já os cenários com bloco de concreto e tijolo cerâmico, por armazenar mais calor, apresentaram alguns pontos com sensação de conforto, além dos espaços com sensação de pouco frio. O FVC também influenciou o resultado nesses cenários, sendo maior FVC com sensação de mais frio do que com menor FVC, que demonstrou conforto.

Quadro 25 - Distribuição do TEP às 6h, no nível do pedestre (1,50 m), em todos os cenários.

A análise estatística para esse horário mostrou que o vidro laminado transmissivo resultou na TEP mais baixa no meio externo (Tabela 18). A TEP mais elevada foi no cenário bloco de concreto com acabamento preto que, em média,

apresentou 2°C a mais na TEP para as 6h. O resultado para o TEP às 6h foi similar ao da TRM às 5h, sendo que, assim como na TRM, no período noturno o que influencia mais a TEP é o componente construtivo e depois o acabamento superficial, que apresentaram maior impacto nos cenários com componentes construtivos que armazenam mais calor.

Tabela 18 - Resultados dos componentes construtivos e acabamentos superficiais em relação à média do TEP às 6h.

Componentes construtivos / acabamentos superficiais	Ranking	Diferença do TEP (°C)
Bloco de concreto preto	5	2
Tijolo cerâmico preto	4	1,5
Bloco de concreto branco	3	1,4
Vidro laminado refletor	2	0,0
Vidro laminado transmissivo	1	0,0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

A geometria urbana considerando cenários com 44m e 81m de altura apresentou menor TEP às 5h, seguida pelo cenário com altura de 119m (Tabela 19). A diferença entre o cenário com maior temperatura e o de menor temperatura foi 0,15°C na TEP, ou seja, muito pequena.

Tabela 19 - Resultados da geometria edificada em relação à média de TEP às 6h.

Altura (m)	Ranking	Diferença do TEP (°C)
44	2	0,15
81	2	0,15
119	1	0,00

Fonte: Elaborado pela própria autora

No geral, os valores de TEP resultantes para essa época do ano no horário das 6h são maiores no miolo da quadra; a diferença é, em média, de 0,6°C para mais que o eixo L-O e de 0,5°C para mais que o eixo N-S (Tabela 20). O resultado é compatível

com o resultado para TRM, sendo que o miolo da quadra apresentou aumento com relação aos eixos mais altos no TEP do que na TRM.

Tabela 20 - Resultado dos eixos em relação à média da TRM às 6h.

Eixos	Ranking	Diferença do TEP (°C)
Meio	3	0,6
Norte-Sul	2	0,1
Leste-Oeste	1	0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

5.5 Efeitos do Desenho Urbano e das Superfícies

5.3.1 Efeito da geometria

Para essa época do ano no período diurno, o eixo das vias é responsável pela redução da TRM em até 11,6 °C, do TEP em até 6,11°C e da Tar em até 0,44°C (APÊNDICE), como consequência do sombreamento dos edifícios. Houve interação entre o efeito dos eixos, da altura dos edifícios e do coeficiente de aproveitamento (Gráfico 20). A diferença entre os eixos no cenário de 81m foi a mais expressiva, em média de 14,21°C, seguido pelo cenário com 44m (10,82°C), e o de 119m com 9,75°C de diferença entre os eixos. Como o efeito dos eixos é muito? impactado pelo sombreamento dos edifícios, percebeu-se que cenários de 81m apresentaram maior diferença entre os eixos N-S e L-O por serem os que proporcionam mais sombreamento nas vias, devido à combinação da altura com a taxa de ocupação (Tabela 8).

O miolo da quadra ficou em posição intermediária entre os dois eixos, com valores mais próximos ao eixo L-O (mais sombreado) (Gráfico 20).

Gráfico 20 - Interação entre os eixos às 12h.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Já no período noturno o efeito dos eixos não foi significativo (Gráfico 21). O pequeno efeito apresentado é relacionado com o fator de visão de céu, que é menor no miolo da quadra, fazendo com que esse espaço fique, na maioria dos casos mais quente do que as vias, com no mínimo 0,56°C a mais na TEP, em média, e 0,04 °C na TRM.

Gráfico 21 - Interação entre os eixos às 5h.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

O efeito dos eixos em um ciclo de 24h foi analisado a partir do Gráfico 22. Observa-se que o eixo N-S apresenta um pouco mais de horas em neutralidade (32%) do que o eixo L-O (30%), porém apresenta também mais horas (6%) de sensação de muito calor do que o eixo L-O (1%) que, por ter menos horas sob muito calor, tem mais

horas na sensação de calor (19%) contra 12% do eixo N-S. Mesmo assim o eixo L-S apresenta melhor resultado no TEP do que o eixo N-S para período de 24h, fazendo com que os pedestres sintam menos a sensação de muito calor.

Gráfico 22 - Sensação térmica (TEP) nos eixos em porcentagem média de horas para período de 24h.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Para essa época do ano e no período diurno, a altura e coeficiente de aproveitamento são responsáveis pela redução média da TRM em até 2,4°C (Tabela 5), da TEP em até 1,5°C (Tabela 16) e da Tar em até 0,8°C (APÊNDICE), sendo que altura e taxa de ocupação foram fatores que apresentaram maior impacto na Tar. O Gráfico 23 mostra interação das alturas com componentes construtivos, acabamentos superficiais e eixos às 12h; observa-se que, como nem todos os segmentos de reta em cada partição do eixo horizontal são paralelos, isso significa que há interações significativas entre altura e demais fatores.

Gráfico 23 - Interação entre alturas às 12h.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Dentre as 15 comparações dos cenários no eixo N-S, apenas 3 apresentaram diferença significativa: bloco de concreto branco, vidro laminado refletor e bloco de cerâmica pintado de preto, quando comparadas às alturas 119m e 44m.

Já dentre as 15 comparações de cenários no eixo L-O, 10 apresentaram significância estatística para diferença de altura e taxa de ocupação, sendo que entre as 10 sempre estava presente a comparação com o cenário de 81m. Todos os cenários de 119m e 44m não apresentaram diferença significativa quando comparados entre si no eixo L-O. Isso ocorreu pelo fato do cenário de 119m, mesmo sendo o mais alto, ter o maior espaçamento entre os edifícios devido ao baixo coeficiente de aproveitamento e, assim, permitir maior penetração de sol entre os edifícios. Já os cenários de 44m, apesar de apresentar maior taxa de ocupação, isto é, com pouco espaçamento entre os edifícios, não propiciam sombreamento suficiente pela altura, principalmente no eixo L-O.

Já com relação aos componentes construtivos e acabamentos superficiais, vidro laminado transmissivo e bloco de concreto pintado de preto no eixo N-S não apresentaram diferença significativa quando comparados às alturas e coeficientes de aproveitamento (Tabela 6). Assim, os únicos com significância estatística para diferenças de altura e coeficiente de aproveitamento nesse eixo foram bloco de concreto pintado de branco, vidro laminado refletor e tijolo cerâmico pintado de preto, sendo estes os componentes construtivos e acabamentos superficiais que mais impactam o conforto do pedestre. Já para os que armazenam ou absorvem mais calor,

quando localizados no eixo N-S, a diferença entre alturas e taxa de ocupação não influenciam o conforto do pedestre nessa época do ano.

Assim, altura e coeficiente de aproveitamento impactam mais no conforto do pedestre no eixo L-O do que no N-S para essa época do ano, no período diurno, sendo que o efeito da altura e taxa de ocupação são percebidos nos dois eixos no período diurno, quando se tem os materiais: bloco de concreto pintado de branco, vidro laminado refletor e tijolo cerâmico pintado de preto.

Já no período mais frio o efeito da altura e do coeficiente de aproveitamento apresentaram alguns valores estatisticamente significativos (Tabela 12), mas muito baixos, podendo chegar a 0,2°C na TRM e 0,15°C na TEP. O Gráfico 24 mostra interação das alturas com materiais e eixos às 5h; nota-se que, como nem todos os segmentos de reta em cada partição do eixo horizontal são paralelos, isso significa que há interações significativas entre altura e demais fatores.

Gráfico 24 - Interação entre as alturas às 5h.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Na análise do efeito da altura em um ciclo de 24h (Gráfico 25) verifica-se que cenários com altura de 119m apresentam menor tempo em sensação de neutralidade do que os demais cenários. O cenário de 44m, apesar de mostrar quase o mesmo tempo em neutralidade que o de 81m, apresenta mais horas de muito calor (6%) do que os demais cenários (3%). Assim, pode se concluir que para às 12h o cenário de 44m é o pior cenário dentre os 3.

Gráfico 25 - Sensação térmica (TEP) por alturas em porcentagem média de horas para período de 24h.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

5.3.2 Efeito da materialidade

Para essa época do ano, no período diurno, os componentes construtivos e seus acabamentos são responsáveis pela diminuição da TRM em até 8,1°C (Tabela 3) e da TEP em até 4,3°C (Tabela 15). Todos os cenários se comportaram da mesma forma com relação ao material, apresentando TRM mais alta com bloco de concreto pintado de branco, seguido pelo vidro refletor, tijolo cerâmico pintado de preto, bloco de concreto pintado de preto e vidro transmissivo (Tabela 3). Esses dois últimos não apresentaram diferença significativa entre si (Tabela 4), podendo ser considerados como efeitos de mesma magnitude. O tijolo cerâmico pintado de preto e bloco de concreto pintado de preto no cenário de 119m no eixo N-S também apresentaram diferença não significativa (Tabela 4).

Analisando o Gráfico 26, observa-se que como todos os segmentos de reta em cada partição do eixo horizontal são aproximadamente paralelos, não há interações significativas entre material e demais fatores para 12h.

Gráfico 26 - Interação entre materiais às 12h.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Nota-se que às 12h, o que influenciou mais nas temperaturas no nível do pedestre foi acabamento dos componentes construtivos, sendo que os refletores apresentaram os piores resultados no nível do pedestre.

Já no período mais frio (5h para a TRM e 6h para o TEP) o efeito dos materiais resultou em diferença significativa (Tabela 10), podendo chegar a 3,91°C na TRM (Tabela 9) e 1,98°C na TEP (Tabela 18). Diferenças nos componentes construtivos e acabamentos superficiais foram as que mais impactaram na TRM e no TEP no período mais frio do dia, sendo que o bloco de concreto pintado de preto foi o que proporcionou as maiores valores de TRM e TEP no período, seguido do tijolo cerâmico pintado de preto, bloco de concreto pintado de branco e vidro laminado refletor e transmissivo (Tabela 18).

Observou-se que, nesse período, o que mais impactou a TRM e o TEP foram os componentes construtivos, ao contrário do período diurno em que o acabamento superficial foi determinante para o aumento na TRM e no TEP. Componentes que armazenam mais calor foram os que propiciaram TRM e TEP mais altas no nível do pedestre no período mãos frio (5h e 6h). Tijolo cerâmico e bloco de concreto resultaram em mais altas TRM e TEP no ambiente externo do que os vidros (refletor e transmissivo), que tiveram comportamento muito semelhante (Tabela 18).

O Gráfico 27 mostra que como todos os segmentos de reta em cada partição do eixo horizontal são aproximadamente paralelos, não há interações significativas entre material e demais fatores para as 5h.

Gráfico 27 - Interação entre materiais às 5h.

Fonte: Elaborado pela própria autora.

O efeito provocado por componentes construtivos e acabamentos superficiais em um ciclo de 24h (Gráfico 28) mostra que no período noturno, onde ocorre a sensação de pouco frio, o vidro resultou em mais horas com essa sensação no meio externo, isso devido ao fato do material absorver menos calor que o bloco de concreto e o tijolo cerâmico. Às 12h os 5 cenários apresentaram a mesma quantidade de horas em desconforto, exceto o bloco de concreto pintado de branco que resultou em mais que o dobro de horas de muito calor (7%) se comparado aos outros cenários (3%). A sensação de neutralidade ocorreu em menos horas nos cenários com acabamentos mais refletivos, chegando a 29% e 33% naqueles com acabamentos que resultam em maior absorção de radiação. O bloco de concreto branco apresenta menor tempo na sensação de pouco calor, mas maior tempo nas sensações de calor e muito calor. Os demais cenários resultaram maior tempo na sensação de pouco calor e menor tempo nas sensações de calor e muito calor, sendo que os cenários com vidro laminado transmissivo e o concreto pintado de preto apresentaram menor tempo na sensação de muito calor, pelo fato desses componentes absorverem mais calor.

Gráfico 28 - Sensação térmica (TEP) pelos componentes construtivos e acabamentos superficiais em porcentagem média de horas para período de 24h.

5.3.3 Efeito na temperatura interna dos edifícios

O modelo ENVI-met estima a Tar interna do edifício considerando o edifício fechado, sem efeito da ventilação, mas não estima a TRM interna. Assim, o Gráfico 29 mostra comparação da TRM externa média nos diferentes cenários com a Tar interna média nos edifícios, obtidas em três alturas diferentes (próximo ao térreo, no meio e próximo ao topo dos edifícios). Nota-se que as duas curvas estão invertidas; enquanto a Tar diminui internamente a TRM aumenta no meio externo. A Tar interna dos edifícios apresenta valor máximo de 46,3°C para cenários com edifícios de vidro transmissivo enquanto a TRM externa no nível do pedestre, apresenta o mínimo de 56°C. A Tar média no interior dos edifícios apresenta seu valor mínimo, de 22,4°C, no cenário com edifícios em bloco de concreto branco onde a TRM externa média no nível do pedestre atinge seu máximo, de 66,7°C.

Gráfico 29 - Relação entre Tar interna média e a TRM externa média às 12h (°C).

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Depois do efeito dos eixos, o acabamento superficial foi o que colaborou mais para o aumento da TRM no período diurno, no meio externo. Porém, ao contrário do eixo, o acabamento superficial, ao mesmo tempo em que aumenta a TRM externa pode melhorar as condições internas dos edifícios e, quando diminui a TRM externa, piora as condições internas. Ou seja, o acabamento superficial tem influência muito grande também na temperatura interna e essa influência é oposta ao que ocorre na área externa, no nível do pedestre.

O Quadro 26 resume os principais resultados obtidos neste trabalho para TEP e TRM na altura do pedestre, em espaços externos, e os fatores que mais influenciaram os resultados.

Quadro 26 - Principais resultados nos espaços externos na altura do pedestre (1,5m) para o mês de abril.

Cenários			TRM / TEP 12h	TRM/TEP 05/06h	Principais fatores de influência
Geometria	Eixos	N-S	Mais alta	Neutro	12h: <u>sombreamento</u> 05/06h: <u>FVC</u>
		L-O	Mais baixa	Neutro	
		Miolo da quadra	Mais baixa	Mais alta	
	Altura e T.O.	44m e 0,5	Mais alta	Neutro	
		81m e 0,32	Mais baixa	Neutro	
		119m e 0,18	Mais alta	Neutro	
Materialidade	Componentes	bloco de concreto	Neutro	Mais alta	12h e 05/6h: <u>armazenamento de calor</u>
		tijolo cerâmico	Neutro	Mais alta	
		vidro	Neutro*	Mais baixa*	
	Acabamentos	branco / refletor	Mais alta	Neutro	12h: <u>reflexão e absorção da radiação solar de onda curta</u>
		preto / transmissivo	Mais baixa*	Neutro	

*Verificar as temperaturas internas da edificação.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A urbanização sem precedentes e o aquecimento urbano decorrente disso são preocupações atuais, devido ao aumento da densidade nas grandes cidades ser considerado como forma de vida mais sustentável, por uma série de razões, apresentadas na introdução a este trabalho.

Tendo em vista o inequívoco histórico de aquecimento urbano registrado em São Paulo, conforme apresentado no capítulo 3, e o incentivo ao adensamento urbano, em particular à verticalização, colocado pelo atual PDE (2014), este trabalho contribui com algumas respostas sobre o impacto da verticalização, dos componentes construtivos e acabamentos das superfícies no aquecimento urbano diurno e noturno na microescala, assim como para o conforto térmico do pedestre, no contexto urbano e climático de São Paulo.

Nesta pesquisa foram realizadas medições microclimáticas em duas áreas densamente construídas no município de São Paulo, Bela Vista e Paulista, com CA médio de 7¹⁵, depois comparadas com dados de estações fixas de referência em outras áreas da cidade, com menor densidade construída, sendo estas estações mencionadas no capítulo 4. No período medido, em abril de 2016, sob condições de bloqueio atmosférico, foram encontradas diferenças de até 4°C, no período entre 16h e 7h da manhã do dia seguinte, para mais na a área mais densa se comparada a menos densa. No período entre às 8h e às 15h houve redução na Tar da área mais densa ao se comparar com as áreas menos densas, chegando a 2°C a menos.

Como a proposta era trabalhar com cenários adensados, a calibração do modelo microclimático utilizado foi feita com base nas medições na Bela Vista e Paulista, mais adensadas, e os cenários foram construídos com base no volume construído das áreas reais onde foram feitas medições. Para estudos microclimáticos foi utilizado modelo ENVI-met 4.4.3 com a ferramenta *full forcing*. Na análise estatística a calibração apresentou valores de 0,99 no r^2 para Tar e entre 0,91 e 0,95 para TRM. Assim, o modelo foi considerado confiável para as simulações dos cenários paramétricos.

Dentre todas as variáveis microclimáticas consideradas, apenas nos dados de TRM o modelo subestimou valores para o período noturno, fazendo com que a

¹⁵ Baseado nos dados do Mapa Digital da cidade - MDC (SÃO PAULO, 2008), considerando toda a área construída como área computada, inclusive as destinadas a varandas.

sensação térmica calculada pelo TEP para esse período fosse, em alguns momentos da madrugada, de pouco frio, sendo que os dados medidos resultaram na sensação de neutralidade. Assim, os resultados gerados pelo modelo para os cenários no período da madrugada precisam ser considerados como valores de TRM subestimados. Não foi possível identificar com certeza a causa para essa diferença no período noturno; uma hipótese é a de que o modelo não acumularia tanto calor como o cenário real, já que não considera o calor antropogênico, nem as paredes internas e lajes das edificações. Já para o período diurno o modelo apresentou resultados bastante confiáveis, mesmo porque o ganho de calor durante o dia sofre uma influência muito grande da radiação solar, e para isso o modelo sempre apresentou bons resultados desde as versões anteriores.

A densidade construída considerada no trabalho foi baseada no volume construído, que apresenta resultados equivalentes a um CA entre 7 e 9 (Quadro 8). As outras métricas como A/L e FVC não foram tão eficientes como descritores da malha urbana estudada, de edifícios isolados no lote, uma vez que com essa configuração o mesmo cenário pode apresentar diversos valores para FVC, dependendo do local onde é medido (Quadro 20).

Inicialmente, a análise dos resultados continha, além da TRM e TEP, a Tar. Mas ao verificar que diferenças para Tar foram muito baixas, optou-se por manter as análises para TRM e TEP, mesmo porque a TRM é mais significativa para a sensação térmica de conforto.

Para o mês de abril, na latitude de São Paulo, os resultados das simulações paramétricas mostraram que a **geometria** interfere muito no microclima na escala do pedestre, no período diurno; a orientação dos eixos, o miolo da quadra, as diferenças de altura e a TO têm impactos que, somados, podem aumentar ou diminuir a TRM em até 14°C e o TEP em até 7,7°C, às 12h, resultados semelhantes foram encontrados por Johansson (2006), Ali-Toudert e Mayer (2007), Emmanuel e Fernando (2007), Emmanuel, Rosenlund e Johansson (2007), (LIN; MATZARAKIS; HWANG, 2010), Erell et al (2014) e Yang, Wong e Lin (2015) . No período noturno o impacto da geometria é menor e mais percebido quando associado aos valores de FVC, dada a perda de radiação de onda longa para o fundo de céu. Menores valores de FVC podem reduzir a TRM em no mínimo 0,2°C e o TEP em no mínimo 0,7°C.

Com relação aos **componentes construtivos e acabamentos superficiais**, eles interferem não só no período diurno como também no noturno, pela sua

capacidade de armazenar mais ou menos calor. Acabamentos superficiais contribuem para aumento da TRM durante o dia, no meio externo, ao refletir mais calor, quando claros, e ao aumentar a temperatura de superfície, quando escuros, esses resultados também foram encontrados nos trabalhos de Emmanuel e Fernando (2007), Emmanuel, Rosenlund e Johansson (2007), Erell et al (2014), Lee, Mayer e Schindler (2014), Taleghani et al. (2014) e Ghaffarianhoseini, Berardi e Ghaffarianhoseini (2015). Durante a noite eles interferem menos na perda de calor. O efeito na TRM e TEP resulta do efeito combinado entre componentes construtivos e acabamentos superficiais, podendo chegar a 8,1°C na TRM e 4,3°C no TEP, durante o dia, e no período noturno a no mínimo 3,9°C na TRM e 2°C no TEP.

Assim, o efeito combinado da **geometria, componentes construtivos e acabamentos superficiais** pode ter impacto diurno de até 22,1°C na TRM e 11,9°C no TEP, e noturno de no mínimo 4,1°C na TRM e 2,7°C no TEP para o pedestre, nos espaços abertos. Esses efeitos são possíveis partindo-se de cenários já densamente construídos. Desse modo, se cenários de baixa densidade construída fossem considerados, com CA menores, esses impactos, principalmente geométricos, poderiam ser diferentes.

O coeficiente de aproveitamento interfere mais na Tar no período noturno, causando aumento de temperatura, ressaltando aqui o período das medições microclimáticas realizadas, em abril de 2016, durante um bloqueio atmosférico. Ainda assim, dadas as condições climáticas, os cenários estudados apresentaram, nos espaços abertos à noite, sensação térmica de neutralidade de acordo com escala TEP. A taxa de ocupação pode ser um problema microclimático, pois, se muito baixa, propicia a entrada de mais radiação direta no nível do pedestre no período diurno, por entre os edifícios; se muito alta, propicia menos permeabilidade para circulação de ar e perda de calor por convecção, nos períodos diurno e noturno.

Com isso, a maior preocupação microclimática com relação à geometria de áreas adensadas no período diurno mostrou ser a taxa de ocupação e a altura, pois elas determinam parâmetros que podem influenciar o microclima na escala do pedestre, propiciando sombreamento e melhor ventilação, melhorando consideravelmente a sensação térmica no nível do pedestre.

Quanto à materialidade, seu efeito é considerável tanto no período diurno como noturno. O efeito dos componentes construtivos é inverso no período diurno e noturno, bem como o efeito do acabamento superficial, dentro e fora do edifício, necessitando

ponderação nas análises. Com relação ao acabamento superficial, ele interfere no período diurno dentro e fora da edificação, mas tem menor interferência no período noturno; o acabamento refletor, que provoca mais desconforto para o pedestre nos espaços abertos, pode melhorar as condições nos espaços internos, a depender de vários outros requisitos do projeto dos edifícios, que são objeto deste trabalho; já o acabamento mais escuro melhora as condições nos espaços abertos, mas pode contribuir substancialmente para o aumento da Tar internamente ao edifício, resultando na necessidade de mais condicionamento artificial que, por sua vez, aumenta ainda mais o calor antropogênico nos espaços urbanos abertos, em um ciclo vicioso que precisa ser considerado, conforme Sachar, Campbell e Kalanki (2018) e The Economist Intelligence Unit (2019).

Assim, acabamentos mais refletores têm que ser cuidadosamente utilizados para não prejudicar o pedestre no ambiente externo causando desconforto térmico e ofuscamento urbano, que é outra decorrência relacionado geometria e acabamento refletor, provocando desconforto visual e impactos na segurança de motoristas e pedestres. Conforme abordado no capítulo 2 em locais onde sejam extremamente necessários deve haver cuidado e propiciar amenidades ao pedestre, como sombreamento das superfícies muito claras e refletoras, com elementos arquitetônicos e/ou paisagísticos. Esses cuidados têm que ser tomados principalmente em áreas adensadas das cidades onde há grande fluxo de pedestres e circulação de veículos. Acabamentos muito escuros também não devem ser utilizadas para não comprometer o conforto do usuário do edifício e a eficiência energética; assim, nas faces externas, é preferível usar acabamentos com valores intermediários de reflexão, buscando minimizar efeitos indesejados para o conforto interno no edifício e externo no meio urbano.

Os componentes construtivos são os que impactam mais o microclima e o conforto térmico noturno no ambiente urbano, mas interferem menos no período diurno. Alvenarias de bloco de concreto e tijolo cerâmico, por exemplo, por terem a capacidade de armazenar mais calor, também perdem calor lentamente. Dessa forma, no período noturno, mesmo que o ambiente externo já esteja a temperaturas mais baixas, as envoltórias dos edifícios ainda estão perdendo calor, contribuindo para o aumento da TRM e do TEP nos espaços abertos e na Tar interna do edifício. Já os vidros, quando não refletores, impactam menos no ganho de calor diurno do ambiente externo; como acumulam menos calor durante o dia, em relação às alvenarias,

acabam contribuindo menos para o aumento da TRM externa noturna. Porém, para o interior dos edifícios, transmitem muito calor por serem transparentes ou translúcidos, contribuindo largamente para o ganho de calor.

Nas envoltórias das edificações, os vidros são termicamente mais adequados se adequadamente sombreados, equilibrando as demandas por iluminação natural e conforto térmico. Já as alvenarias e demais fechamentos opacos e com maior massa térmica são melhor empregados, sombreados ou não, com valores intermediários de reflexão. Como o seu impacto é maior durante a noite, as condições microclimáticas noturnas precisam ser cuidadosamente consideradas, tendo em vista a ocorrência de outros fenômenos de aquecimento urbano como a ilha de calor noturna e as ondas de calor com temperaturas mínimas elevadas, e os prejuízos decorrentes disso ao conforto térmico interno e externo aos edifícios e à saúde da população. Neste trabalho, no período medido em abril de 2016, sob bloqueio atmosférico, à noite a sensação térmica externa foi de neutralidade/pouco frio nos cenários simulados para São Paulo; porém, isso não significa que essa condição se repete nos outros meses do ano e que a escolha dos componentes construtivos seja menos importante para as condições de conforto no ambiente externo, como regra geral; de qualquer forma, deve-se levar em conta também o acabamento superficial empregado nas alvenarias.

Tendo em vista os resultados obtidos, o objetivo de quantificar o impacto da verticalização no microclima e no conforto térmico, na escala do pedestre, em função da geometria, do comportamento térmico dos componentes construtivos e dos acabamentos superficiais, para São Paulo, foi atingido; da mesma forma a hipótese de que o arranjo geométrico da verticalização, os componentes construtivos e os acabamentos superficiais da envoltória dos edifícios fazem parte da estratégia de adaptação ao aquecimento urbano, foi comprovada; juntos, esses três elementos têm potencial para a mitigação do aquecimento urbano na microescala e para a melhoria das condições de conforto térmico do pedestre.

São Paulo atualmente discute ajustes na Lei de Uso e Ocupação do Solo (Lei nº 16.402/16), também conhecida como Lei de Zoneamento. Um dos pontos discutidos é a flexibilização do limite de altura nas zonas mistas, para 48 m de altura, e de centralidade, para 60 m de altura, nas vias com largura mínima de 12 m¹⁶. A partir dos resultados obtidos neste trabalho, verifica-se que a alteração apenas no parâmetro

¹⁶ Disponível em: <http://www.capital.sp.gov.br/noticia/prefeitura-de-sao-paulo-apresenta-nova-minuta-que-propoe-ajustes-na-lei-de-zoneamento> (Acesso em 28/02/2020).

altura não é suficiente para se determinar a condição microclimática e de conforto resultante no nível do pedestre. Da forma como está apresentada a proposta, o aumento na altura teria que vir acompanhado de uma diminuição na TO para se tornar viável em uma zona com CA máximo de 2; essa diminuição na TO resultaria em maior espaçamento entre os edifícios, implicando em maior acesso da radiação solar que penetraria por esse espaçamento.

Por outro lado, além das questões relativas à incidência da radiação solar, outro ponto que precisa ser considerado do ponto de vista microclimático seria a influência na ventilação natural, tanto para o conforto térmico do pedestre quanto para a qualidade do ar. Estudos realizados para Hong Kong mostram que o que é mais significativo para a melhora da ventilação na altura do pedestre é o tratamento da base do edifício, a uma altura de até 15 m do solo, e que a diminuição da taxa de ocupação nessa camada, com mais porosidade entre os edifícios, faz com que se tenha benefícios para o pedestre, até certo ponto independente da altura que edifício venha a ter no total (LAU et al., 2018; NG, 2009; NG et al., 2011). Resultados semelhantes também foram obtidos em estudos para cidades brasileiras, como Maceió (BITTENCOURT; CRUZ; LOBO, 1997; LIMA; BITTENCOURT, 2017) e Santos (PRATA, 2005).

Além das questões microclimáticas, a revisão nas alturas máximas permitidas pela lei de zoneamento deve também considerar as questões relacionadas ao impacto na vizinhança do adensamento, como disponibilidade de luz natural e acesso ao sol e ventos nos edifícios vizinhos, não só os habitacionais, mas também em escolas, creches, serviços de saúde, etc., e em espaços abertos institucionais como praças, parques, escolas, hortas comunitárias, além das implicações na mobilidade, com os possíveis impactos no tráfego gerado na vizinhança.

Outro ponto a ser considerado nos resultados desta pesquisa é a sua limitação por ter sido feita a partir de cenários paramétricos para uma determinada época do ano, e não como um ensaio projetual, considerando todas as épocas do ano e, principalmente, a complexidade e a heterogeneidade do desenho e do ecossistema urbano. Em um cenário real, tem-se também as questões relacionadas à vizinhança, ao tamanho dos lotes, das vias, a infraestrutura de transporte, saneamento e energia, que também precisam ser consideradas em um possível adensamento e aumento na altura dos edifícios.

Outra limitação importante da pesquisa foi a capacidade computacional para realização das simulações. Não foi possível fazer simulações para várias épocas do ano, nem com maior diversidade de cenários, pois o modelo demanda muita capacidade computacional e tempo de simulação. A simulação de calibração do modelo entre dados medidos e simulados levou 12 dias para ser concluída, e as simulações dos cenários, 3 dias cada uma. Como foram feitas mais de uma simulação para calibrar o modelo, então só para isso foram necessários mais de 12 dias e o uso de mais de 1 computador.

Outro ponto foi a calibração da TRM para o período noturno. Em todas as simulações ela foi mais baixa do que a TRM calculada por meio da medição da temperatura de globo e demais variáveis microclimáticas. Não foi possível descobrir com certeza a causa para essa diferença nos resultados até o final da pesquisa, nem mesmo os desenvolvedores conseguiram dar uma resposta definitiva sobre essa diferença, o que faz com que a TRM noturna simulada seja considerada subestimada.

Uma outra limitação também foi com relação à representação dos componentes construtivos no modelo. Pelo fato do ENVI-met disponibilizar até 3 camadas paralelas verticalmente, isso não possibilita a representação mais fiel do tijolo cerâmico e do bloco de concreto com argamassa comumente utilizados no Brasil, sendo necessária uma aproximação para a representação destes no modelo.

Ao final, a pesquisa também levantou questões para serem abordadas em trabalhos futuros, tais como:

- A simulação dos cenários em outras épocas do ano com diferentes alturas solares e azimutes para investigar se os resultados obtidos em outras épocas do ano serão diversos do realizado nesta pesquisa e quão diversos; para tanto, o monitoramento climático permanente em áreas densamente construídas é fundamental, em paralelo com as estações de referência situadas em áreas menos urbanizadas, dentro da região metropolitana de São Paulo;
- A solução da calibração da TRM para o período noturno em áreas adensadas, por meio de dados de radiação do local da medição feito com instrumentos adequados para obtenção de radiação de onda longa e curta, essenciais para a simulação no modo *full forcing*;
- Variação nos cenários simulados, considerando-se aberturas no térreo dos edifícios, fachadas com diferentes componentes construtivos e variação da

porcentagem e da localização de cada componente construtivo nas fachadas, bem como variação na tipologia dos edifícios;

- Simulação de cenários considerando-se outros recursos projetuais para contrabalançar os efeitos negativos da geometria e da materialidade, tais como a arborização das vias e miolos de quadra, ou a inclusão de elementos naturais ou construídos que propiciem sombreamento, para saber o quanto é possível amenizar o aquecimento urbano provocado pelo ambiente construído na microescala.

São Paulo apresenta em seu território arranjos de edifícios com diferentes tipologias e arranjos urbanos, com variados coeficientes de aproveitamento e taxas de ocupação, resultantes de diversas legislações que foram aplicadas ao longo dos anos no município. A legislação urbanística é um dos principais responsáveis pela forma urbana e, consequentemente, pelo microclima urbano, com impactos no conforto pedestre na saúde das pessoas. Se for empregada considerando estas e várias outras questões ambientais em pauta, pode ser uma grande aliada na melhoria da qualidade ambiental das cidades e na adaptação à mudança do clima já tão necessária atualmente, e que vai se tornar ainda mais, nas próximas décadas.

REFERÊNCIAS

AGRESTI, A. **Foundations of linear and generalized linear models**. New York: John Wiley & Sons, 2015.

AHMAD, K.; KHARE, M.; CHAUDHRY, K. K. Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections: a review. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 93, p. 697–717, 2005.

AIDA, M.; GOTOH, K. Urban albedo as a function of the urban structure: a two-dimensional numerical simulation (Part II). **Boundary-Layer Meteorology**, v. 23, p. 415-424, 1982.

AKBARI, H.; KOLOKOTSA, D. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. **Energy & Buildings**, v. 133, p. 834-842, 2016.

ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. **Solar Energy**, v. 81, p. 742-754, 2007.

_____. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. **Building and Environment**, v. 41, n. 2, p. 94-108, 2006.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE fundamentals handbook**. Atlanta: SI Edition, 2001.

AMORIM, R. P. L.; PEDROSA, M. L.; CARVALHO, H. J. M. Máscara de obstrução: uso de novas tecnologias que facilitam a verificação da obstrução do céu visível. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENTAC), 2014, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2014. p. 370-378.

ANDREOU, E.; AXARLI, K. Investigation of urban canyon microclimate in traditional and contemporary environment: experimental investigation and parametric analysis. **Renewable Energy**, v. 43, p. 354-363, 2012.

ARNFIELD, A. J. Street design and urban canyon solar access. **Energy and Buildings**, v. 14, n. 2, p. 117-131, 1990.

_____. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 1, p. 1-26, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-1: desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **ABNT NBR 15220-3: desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BARBIRATO, G.; TORRES, S.; BARBOSA, R. Espaços livres e morfologia urbana : discussões sobre influências na qualidade climática e sustentabilidade urbana a partir de estudos em cidades. **Paisagem e ambiente: Ensaios**, v. 36, p. 49-68, 2015.

BERGMAN, T. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BERNABÉ, A. et al. Radiative properties of the urban fabric derived from surface form analysis: a simplified solar balance model. **Solar Energy**, v. 122, p. 156-168, 2015.

BITTENCOURT, L. S.; CRUZ, J. M.; LOBO, D. G. F. **A influência da relação entre taxa de ocupação X nº de pavimentos no potencial de ventilação natural dos ambientes internos e externos**. IV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...**Salvador: 1997

LAU, K. K. L. et al. Defining the environmental performance of neighbourhoods in high-density cities. **Building Research and Information**, v. 46, n. 5, p. 540–551, 2018.

LIMA, R. G. DE; BITTENCOURT, L. S. A influência de diferentes arranjos construtivos no comportamento da ventilação natural. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 9, n. suppl 1, p. 425–441, 2017.

NG, E. Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities - air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. **Building and Environment**, v. 44, n. 7, p. 1478–1488, 2009.

NG, E. et al. Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. **Landscape and Urban Planning**, v. 101, n. 1, p. 59–74, maio 2011.

BOURBIA, F.; AWBI, H.B. Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate. Part 1: Air and surface temperature measurements. **Renewable Energy**, v. 29, n. 2, p. 249-262, 2004.

BOURBIA, F.; BOUCHERIBA, F. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). **Renewable Energy**, v. 35, n. 2, p. 343-347, 2010.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). **Portaria nº 50, de 01 de fevereiro de 2013**, Anexo Geral V - Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros. Brasília: INMETRO, 2013.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DCEA). **Portaria 957/CG3, de 9 de julho de 2015**. Brasília: DCEA, 2015.

BRUSE, M. Simulating the effects of urban environmental on microclimate with a three-dimensional numerical model. In: CLIMATE AND ENVIRONMENTAL CHANGE - PRE-REGIONAL CONFERENCE MEETING OF THE COMMISSION ON CLIMATOLOGY, 1998, Évora. **Proceedings.....** Lisboa: Colibri, 1998.

_____. **ENVI-met website**. Disponível em: <https://www.envi-met.com/>. Acesso em 01/03/2017.

BUSSAB, W. de O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. 9ª ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

CAMPOS, C. M. Anhaia Mello e o controle da expansão urbana. In: XVIII ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL (ENANPUR), 2019, Natal. **Anais...** Natal: ANPUR, 2019. p. 1-21.

CHARALAMPOPOULOS, I. et al. Analysis of thermal bioclimate in various urban configurations in Athens, Greece. **Urban Ecosystems**, v. 16, p. 217-233, 2013.

CHATZIPOULKA, C.; NIKOLOPOULOU, M. Urban geometry, SVF and insolation of open spaces: London and Paris. **Building Research and Information**, v. 3218, p. 1-18, 2018.

CHEN, L. et al. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 1, p. 121-136, 2012.

_____. Intra-urban differences of mean radiant temperature in different urban settings in Shanghai and implications for heat stress under heat waves: A GIS-based approach. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 829-842, 2016.

CHENG, V. et al. Urban form, density and solar potential. In: PLEA2006 - The 23rd CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 2006, Geneva. **Proceedings...** Geneva, 2006. p. 1-6.

_____. Outdoor thermal comfort study in a sub-tropical climate: a longitudinal study based in Hong Kong. **International Journal of Biometeorology**, v. 56, n. 1, p. 43-56, 2012.

CHRISTEN, A.; VOGT, R. Energy and radiation balance of a central European city. **International Journal of Climatology**, v. 24, p. 1395-1421, 2004.

DE OLIVEIRA, A. P. et al. Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 71, n. 3-4, p. 231-249, 2002.

DEVECCHI, A. M. **Reformar não é construir. A reabilitação de edifícios verticais: novas formas de morar em São Paulo no século XXI**. 2010. 547 f. Tese (Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

DOULOS, L.; SANTAMOURIS, M.; LIVADA, I. Passive cooling of outdoor urban spaces: the role of materials. **Solar Energy**, v. 77, p. 231-249, 2004.

DUARTE, D. et al. The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. **Urban Climate**, v. 14, p. 224-239, 2015.

_____. The impact of vegetation on urban microclimates to counterbalance built density in a subtropical changing climate. In: 30th INTERNATIONAL PLEA CONFERENCE, 2014, Ahmedabad. **Proceedings...** Ahmedabad: CEPT University, 2014. p. 1-8.

ELIASSON, I. Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 3, p. 379-392, 1996.

ELIASSON, I.; HOLMER, B. Theoretical and applied climatology urban heat island circulation in Goteborg, Sweden. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 42, p. 187-196, 1990.

EMMANUEL, R. A hypothetical 'shadow umbrella' for thermal comfort enhancement in the equatorial urban outdoors. **Architectural Science Review**, v. 36, n. 4, p. 173-184, 1993.

_____. Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. **Building and Environment**, v. 40, p. 1591-1601, 2005.

EMMANUEL, R.; FERNANDO, H. J. S. Urban heat islands in humid and arid climates: role of urban form and thermal properties in Colombo, Sri Lanka and Phoenix, USA. **Climate Research**, v. 34, n. 3, p. 241-251, 2007.

EMMANUEL, R.; ROSENLUND, H.; JOHANSSON, E. Urban shading: a design option for the tropics ? A study in Colombo, Sri Lanka. **International Journal of Climatology**, v. 2004, n. 14, p. 1995-2004, 2007.

EMMANUEL, R.; STEEMERS, K. Connecting the realms of urban form, density and microclimate. **Building Research & Information**, v. 3218, p. 1-5, 2018.

ERELL, E. et al. Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. **Urban Climate**, v. 10, n. 2, p. 367-386, 2014.

ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban microclimate: designing the spaces between buildings**. London: Earthscan, 2011.

ERELL, E.; WILLIAMSON, T. Simulating air temperature in an urban street canyon in all weather conditions using measured data at a reference meteorological station. **International Journal of Climatology**, v. 26, p. 1671-1694, 2006.

_____. Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 1243-1255, 2007.

FERREIRA, M. J. et al. Radiation balance at the surface in the city of São Paulo, Brazil: diurnal and seasonal variations. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 107, n. 1-2, p. 229-246, 2012.

FRANCISCO, R. C. A. **Clima urbano: um estudo aplicado a Belo Horizonte, MG.** 2012. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) - Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

FORTUNIAK, K. Numerical estimation of the effective albedo of an urban canyon. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 91, p. 245-258, 2008.

FUTCHER, J. et al. Creating sustainable cities one building at a time: towards an integrated urban design framework. **Cities**, v. 66, p. 63-71, 2017.

FUTCHER, J.; KERSHAW, T.; MILLS, G. Urban form and function as building performance parameters. **Building and Environment**, v. 62, p. 112-123, 2013.

FUTCHER, J.; MILLS, G. No building is an 'energy' island: the cautionary tale of the skyscraper. **Urban Climate News**, n. 49, p. 15-17, 2013.

GAGLIOTTI, G. **A verticalização em São Paulo, de 1980 a 2011: concentração e dispersão.** 2013. 139 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2013.

GÁL, T.; LINDBERG, F.; UNGER, J. Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 95, n. 1-2, p. 111-123, 2009.

GHAFFARIANHOSEINI, A.; BERARDI, U.; GHAFFARIANHOSEINI, A. Thermal performance characteristics of unshaded courtyards in hot and humid climates. **Building and Environment**, v. 87, p. 154-168, 2015.

GIRIDHARAN, R. et al. Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. **Building and Environment**, v. 42, n. 10, p. 3669-3684, out. 2007.

GIRIDHARAN, R.; GANESAN, S.; LAU, S. S. Y. Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 6, p. 525-534, 2004.

GIRIDHARAN, R.; LAU, S. S. Y.; GANESAN, S. Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. **Energy and Buildings**, v. 37, p. 964-971, 2005.

GIVONI, B. **Urban design in different climates.** Geneva: WMO, TD 336. 1989

GRACE, J. **Plant-atmosphere relationships.** London: Chapman and Hall, 1983.

GROLEAU, D.; MESTAYER, P. G. Urban morphology influence on urban albedo : a revisit with the S OLENE model. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 147, p. 301-327, 2013.

GUSSON, C. S. **Efeito da densidade construída sobre o microclima urbano: construção de diferentes cenários possíveis e seus efeitos no microclima para a cidade de São Paulo, SP**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.

GUSSON, C. S.; DUARTE, D. H. S. Effects of built density and urban morphology on urban microclimate - calibration of the model ENVI-met V4 for the subtropical São Paulo, Brazil. In: 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON COUNTERMEASURES TO URBAN HEAT ISLAND, 4, 2016, Singapore. **Proceedings...** Singapore: National University of Singapore, 2016a. p. 2-10.

GUSSON, C. S.; DUARTE, D. H. S. Effects of built density and urban morphology on urban microclimate -calibration of the model ENVI-met V4 for the subtropical São Paulo, Brazil. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 2-10, 2016b.

_____. The effect of density on urban microclimate: Simulation of different building typologies for the subtropical São Paulo, Brazil. In: PLEA 2016 - 32nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE. CITIES, BUILDINGS, PEOPLE: TOWARDS REGENERATIVE ENVIRONMENTS. 2016, Los Angeles. **Proceedings...** Los Angeles: 2016c, p. 1239-1247.

HÄMMERLE, M. et al. Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 105, p. 521-527, 2011.

HARMAN, I. N.; BEST, M. J.; BELCHER, S. E. Radiative exchange in an urban street canyon. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 110, n. 2, p. 301-316, 2004.

HE, X. et al. Influence of sky view factor on outdoor thermal environment and physiological equivalent temperature. **International Journal of Biometeorology**, v. 59, n. 3, p. 285-297, 2015.

HERRMANN, J.; MATZARAKIS, A. Mean radiant temperature in idealised urban canyons: examples from Freiburg, Germany. **International Journal of Biometeorology**, v. 56, p. 199-203, 2012.

HOLST, J.; MAYER, H. Urban human-biometeorology: investigations in Freiburg (Germany) on human thermal comfort. **Urban Climate News**, n. 38, p. 5-10, 2010.

HUTTNER, S. **Further development and application of 3D microclimate simulation ENVI-met**. 2012. 147 p. Ph.D. Thesis (Natural Sciences) - Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften, Johannes Gutenberg Universität, Mainz, 2012.

HUTTNER, S.; BRUSE, M. Numerical modeling of the urban climate: a preview on ENVI-met 4.0. In: THE SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 2009, Yokohama. **Proceedings...** Yokohama: International Association for Urban Climate, 2009. p. 1-4.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Estação Meteorológica do IAG-USP: Resumo Mensal - Abril/2016**. 46° ed., São Paulo: IAG-USP, 2016.

_____. **Boletim Climatológico Anual da Estação Meteorológica do IAG/USP**, v. 20, São Paulo: IAG/USP, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO (7726): Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities**. Genebra, 1998.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014**. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genebra: IPCC, 2014.

IPCC CITIES: Cities & Climate Change Science Conference, 2018, Edmonton. Disponível em: <https://citiesipcc.org/>. Acesso em: 21 jan. 2020.

ITOH, D.; ASHIE, Y. Study on the spectral albedo in the geometrically complex urban spaces. In: THE SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 2009, Yokohama. **Proceedings...** Yokohama: International Association for Urban Climate, 2009. p. 1-4.

JAMEI, E. et al. Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1002-1017, 2016.

JOHANSSON, E. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: a study in Fez, Morocco. **Building and Environment**, v. 41, n. 10, p. 1326-1338, 2006.

JOHANSSON, E.; EMMANUEL, R. The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. **International Journal of Biometeorology**, v. 51, n. 2, p. 119-133, 2006.

JOHNSON, G. T.; WATSON, I. D. The determination of view-factors in urban canyons. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 23, n. 2, p. 329-335, 1984.

KONDO, A. et al. The influence of urban canopy configuration on urban. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 100, n. 2, p. 225-242, 2001.

KATZSCHNER, L. Urban Climate in dense cities. In: NG, E. (Ed.) Designing high-density cities for social and environmental sustainability. London: Earthscan, 2010. p.71-78.

KRAYENHOFF, E. S.; VOOGT, J. A. A microscale three-dimensional urban energy balance model for studying surface temperatures. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 123, n. 3, p. 433-461, 2007.

KRÜGER, E.; DRACH, P.; BROEDE, P. Outdoor comfort study in Rio de Janeiro: site-related context effects on reported thermal sensation. **International Journal of Biometeorology**, v. 61, n. 3, p. 463-475, 2017.

KRÜGER, E.; PEARLMUTTER, D.; RASIA, F. Evaluating the impact of canyon geometry and orientation on cooling loads in a high-mass building in a hot dry environment. **Applied Energy**, v. 87, n. 6, p. 2068-2078, 2010.

LAI, A.; MAING, M.; NG, E. Observational studies of mean radiant temperature across different outdoor spaces under shaded conditions in densely built environment. **Building and Environment**, v. 114, p. 397-409, 2017.

LAU, K. K. L. et al. Defining the environmental performance of neighbourhoods in high-density cities. **Building Research and Information**, v. 46, n. 5, p. 540–551, 2018.

LEE, H.; HOLST, J.; MAYER, H. Modification of human-biometeorologically significant radiant flux densities by shading as local method to mitigate heat stress in summer within urban street canyons. **Advances in Meteorology**, v. 2013, p. 1-13, 2013.

LEE, H.; MAYER, H.; SCHINDLER, D. Importance of 3-D radiant flux densities for outdoor human thermal comfort on clear-sky summer days in Freiburg, Southwest Germany. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 23, n. 3, p. 315-330, 2014.

LIMA, R. G. DE; BITTENCOURT, L. S. A influência de diferentes arranjos construtivos no comportamento da ventilação natural. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 9, n. suppl 1, p. 425–441, 2017.

LIN, T.; HO, Y.; HUANG, Y. Seasonal effect of pavement on outdoor thermal environments in subtropical Taiwan. **Building and Environment**, v. 42, p. 4124-4131, 2007.

LIN, T.; MATZARAKIS, A.; HWANG, R. Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. **Building and Environment**, v. 45, n. 1, p. 213-221, 2010.

LINDBERG, F. Modelling the urban climate using a local governmental geo-database. **Meteorological Applications**, v. 14, p. 263-273, 2007.

LINDBERG, F.; GRIMMOND, C. S. B. Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city: influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London. **Urban Ecosystems**, v. 14, n. 4, p. 617-634, 2011.

LINDBERG, F.; HOLMER, B.; THORSSON, S. SOLWEIG 1.0 - Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. **International Journal of Biometeorology**, v. 52, n. 7, p. 697-713, 2008.

LINDBERG, F.; ONOMURA, S.; GRIMMOND, C. S. B. Influence of ground surface

characteristics on the mean radiant temperature in urban areas. **International Journal of Biometeorology**, v. 60, n. 9, p. 1439-1452, 2016.

LONGARINE, A. **Efeito da densidade construída sobre o microclima urbano**. São Paulo: FAPESP, 2018. Relatório de Bolsa de Treinamento Técnico (TT-1) FAPESP (Processo Nº 17/12816-6).

MARCIOTTO, E. R.; OLIVEIRA, A. P.; HANNA, S. R. Modeling study of the aspect ratio influence on urban canopy energy fluxes with a modified wall-canyon energy budget scheme. **Building and Environment**, v. 45, n. 11, p. 2497-2505, 2010.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: application of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology**, v. 51, n. 4, p. 323-334, 2007.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology**, v. 54, n. 2, p. 131-139, 2010.

MAYER, H.; HOPPE, P. Theoretical and applied climatology thermal comfort of man in different urban environments. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 38, n. 1, p. 43-49, 1987.

MINELLA, F. C. O.; ROSSI, F. A.; KRUGER, E. L. Análise do efeito diurno do fator de visão do céu no microclima e nos níveis de conforto térmico em ruas de pedestres em Curitiba. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 1, p. 123-143, 2011.

MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. Modelo adaptativo de conforto para avaliação *in loco* de espaços urbanos abertos. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 1, p. 61-79, 2012.

MONTEITH, J., UNSWORTH, M. **Principles of environmental physics**. 4th ed. Oxford: Academic Press, 2013.

NG, E. Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities - air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. **Building and Environment**, v. 44, n. 7, p. 1478-1488, 2009.

NG, E. et al. Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. **Landscape and Urban Planning**, v. 101, n. 1, p. 59-74, maio 2011.

NG, E. Urban air ventilation in high-density cities in the tropics. In: EMMANUEL R. (Ed.). **Urban climate challenges in the tropics: rethinking planning and design opportunities**. New Jersey: Imperial College Press, 2016. p. 79-110.

NG, E.; REN, C.; KATZSCHNER, L. Urban climatic mapping in Hong Kong. **Journal of Heat Island Institute International**, v. 7, n. 2, p. 1-15, 2012.

NIACHOU, K. Ã.; LIVADA, I.; SANTAMOURIS, M. Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather

conditions. Part II: Airflow analysis. **Building and Environment**, v. 43, p. 1393-1403, 2008.

NOTO, FS. **O quarteirão como suporte da transformação urbana de São Paulo**. 2017. 363 f. Tese (Doutorado em Projeto de Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

NUNEZ, M.; OKE, T. R. The energy balance of an urban canyon. **Journal of Applied Meteorology**, v. 16, n. 1, p. 11-19, 1977.

OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment Pergamon Press**, v. 7, p. 769-779, 1973.

_____. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. **Atmosphere**, v. 14, n. 4, p. 268-277, 1976.

_____. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1-24, 1982.

OKE, T. R. Methods in urban climatology. **Applied Climatology**, v. 14, n. 18, p. 19-29, 1984.

_____. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, v. 11, n. 1-3, p. 103-113, 1988.

_____. The micrometeorology of the urban forest. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences**, v. 324, n. 1223, p. 335-349, 1989.

OKE, T. R. et al. Simulation of surface urban heat islands under “ideal” conditions at night Part 2: Diagnosis of causation. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 56, n. 4, p. 339-358, 1991.

_____. **Urban climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

OLIVEIRA, A. P.; BORNSTEIN, R. D.; SOARES, J. Annual and diurnal wind patterns in the city of São Paulo. **Water, Air, and Soil Pollution: Focus**, v. 3, n. 5-6, p. 3-15, 2003.

PBMC, 2016: Mudanças climáticas e cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [Ribeiro, S.K., Santos, A.S. (Eds.)]. PBMC, COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 116p.

PEARLMUTTER, D.; BERLINER, P.; SHAVIV, E. Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy. **Building and Environment**, v. 41, p. 783-795, 2006.

PEARLMUTTER, D.; BITAN, A.; BERLINER, P. Microclimatic analysis of “compact” urban canyons in an arid zone. **Atmospheric Environment**, v. 33, p. 4143-4150, 1999.

POLLI, G. **Efeito da densidade construída sobre o microclima urbano**. São Paulo: FAPESP, 2017. Relatório de Bolsa de Treinamento Técnico (TT-1) FAPESP (Processo 16/21884-2).

PRATA, Alessandra Rodrigues. **Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano**. 2005. Tese (Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, University of São Paulo, São Paulo, 2005. doi:10.11606/T.16.2005.tde-20012010-113103. Acesso em: 2020-02-27.

QAID, A. et al. Urban heat island and thermal comfort conditions at micro-climate scale in a tropical planned city. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 577-595, 2016.

QAID, A.; OSSEN, D. R. Effect of asymmetrical street aspect ratios on microclimates in hot, humid regions. **International Journal of Biometeorology**, v. 59, n. 6, p. 657-677, 2015.

RATTI, C.; RICHENS, P. Raster analysis of urban form. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 31, n. 1, p. 297-309, 2004.

RATTI, C.; RAYDAN, D.; STEEMERS, K. Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 1, p. 49-59, 2003.

REN, C.; NG, E. Y.; KATZSCHNER, L. Urban climatic map studies: a review. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 15, p. 2213-2233, 2011.

REVI, A. et al. Urban areas. In: INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2014. Impacts, adaptation, and vulnerability. Part a: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 535-612.

RIBEIRO, F. N. D. et al. Effect of sea breeze propagation on the urban boundary layer of the metropolitan region of Sao Paulo, Brazil. **Atmospheric Research**, v. 214, p. 174-188, 2018.

_____. Urban heat island in the metropolitan area of São Paulo and the influence of warm and dry air masses during summer. In: ICUC9 - 9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 2015, Toulouse. **Proceedings...** Toulouse: IAUC, 2015. p. 1-6.

RIBEIRO, S. K.; SANTOS, A. S. **Mudanças climáticas e cidades**. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 2016. 116 p. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.

ROUSE, W. R.; BELLO, R. L. Short-wave radiation balance in an urban aerosol layer. **Atmosphere-Ocean**, v. 17, n. 2, p. 157-168, 1979.

SACHAR, S.; CAMPBELL, I.; KALANKI, A. **Solving the Global Cooling Challenge:**

How to Counter the Climate Threat from Room Air Conditioners. [s.l: 2018. Disponível em: <www.rmi.org/insight/solving_the_global_cooling_challenge>.

SALATA, F. et al. Urban microclimate and outdoor thermal comfort: a proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. **Sustainable Cities and Society**, v. 26, p. 318-343, 2016.

SANTAMOURIS, M. et al. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. **Solar Energy**, v. 70, n. 3, p. 201-216, 2001.

SANTAMOURIS, M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island: a review of the actual developments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 224-240, 2013.

SANTAMOURIS, M. Mitigation countermeasures to face urban warming. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 10, n. 1, p. 1-2, 2015.

SÃO PAULO (Município). Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente. **GEO cidade de São Paulo: panorama do meio ambiente urbano**. São Paulo: SVMA, IPT; Brasília: PNUMA, 2004.

_____. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano - SMDU. **Parcelamento, uso e ocupação do solo do município de São Paulo: lei municipal nº 16.402, de 22 de março de 2016, zoneamento ilustrado**. São Paulo: SMDU, 2016. Disponível em: https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/wp-content/uploads/2016/03/GEST%C3%83O2-smdu-zoneamento_ilustrado.pdf. Acesso em: 19 ago. 2019.

SÃO PAULO (Município). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano - SMDU. **Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo (PDE): lei municipal nº 16.050, de 31 de julho de 2014, estratégias ilustradas**. São Paulo: SMDU, 2016. Disponível em: <https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/wp-content/uploads/2015/01/Plano-Diretor-Estrat%C3%A9gico-Lei-n%C2%BA-16.050-de-31-de-julho-de-2014-Texto-da-lei-ilustrado.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2019.

_____. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano (SMDU). Departamento de Produção e Análise de Informações (DEINFO). **Mapa Digital da Cidade – MDC**. São Paulo: SMDU, 2008.

_____. Secretaria Municipal de Urbanismo e Licenciamento (SMUL). **Código de obras e edificações: lei nº 16.642, de 9 de maio de 2017; decreto nº 57.776 de 7 de julho de 2017; COE ilustrado**. São Paulo: SMUL, 2017. Disponível em: https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/wp-content/uploads/2018/04/codigo_de_obras_ilustrado.pdf. Acesso em: 19 ago. 2019.

_____. Secretaria Municipal de Urbanismo e Licenciamento - SMUL. **Esclarecimentos sobre proposta de ajuste da lei de zoneamento**. Publicado no site da prefeitura em 27/02/2018, 2018. Disponível em: <https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/noticias/esclarecimentos-sobre-proposta-de-ajuste-da-lei-de-zoneamento/>. Acesso em: 19 ago. 2019.

SCHILER, M. **Examples of glare remediation techniques four buildings**. In: PLEA2009 - 26th CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 2009, Quebec. **Proceedings...** Quebec, 2009. p. 1-6.

SETO, K.C. et al. Human settlements, infrastructure and spatial planning. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2014. Climate Change 2014. Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 927-1000.

SHARMIN, T.; STEEMERS, K.; MATZARAKIS, A. Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment. **Sustainable Cities and Society**, v. 34, p. 293-308, 2017.

SHASHUA-BAR, L.; HOFFMAN, M. E. Quantitative evaluation of passive cooling of the UCL microclimate in hot regions in summer, case study: Urban streets and courtyards with trees. **Building and Environment**, v. 39, n. 9, p. 1087-1099, 2004.

SHINZATO, P. **3D Parametrization of tropical vegetation and simulation of microclimatic effects for green infrastructure in the city of São Paulo**. São Paulo: FAPESP, 2016. Relatório da Bolsa de Estágio de Pesquisa no Exterior (Processo nº 2016/01204-07).

SHINZATO, P. et al. Calibration process and parametrization of tropical plants using ENVI-met V4—Sao Paulo case study. **Architectural Science Review**, v. 62, n. 2, p. 112–125, 2019.

SILVA DIAS, M. A. F.; MACHADO, A. J. The role of local circulations in summertime convective development and nocturnal fog in São Paulo, Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 82, p. 135-157, 1997.

SIMON, H. **Modeling urban microclimate: development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met**. 2016. 218 f. Tese (Doktor der Naturwissenschaften) – Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Mainz, 2016.

SIRQUEIRA, C. A. **Estudo microclimático de recortes urbanos vegetados em Belo Horizonte-MG, através de modelagem micrometeorológica**. 2014. 274 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) - Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SOBRINO, J. A. et al. Emissivity mapping over urban areas using a classification-based approach: application to the Dual-use European Security IR Experiment (DESIREX). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 18, p. 141-147, 2012.

SOMEKH, N. **A cidade vertical e o urbanismo modernizador**. São Paulo: Romano Guerra/Editora Mackenzie, 2014.

SOUZA, L. C. L. DE et al. Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p. 155-167, 2010.

STONE JR., B.; RODGERS, M. O. Urban form and thermal efficiency: how the design of cities influences the urban heat island effect. **Journal of the American Planning Association**, v. 67, n. 2, p. 186-198, 2001.

SVENSSON, M. K. Sky view factor analysis: implications for urban air temperature differences. **Meteorological Applications**, v. 11, n. 3, p. 201-211, 2004.

SYNNEFA, A., SANTAMOURIS, M. Mitigating the urban heat with cool materials for the buildings' fabric. In: SANTAMOURIS, M., KOLOKOTSA, D. (Eds.). **Urban climate mitigation techniques**. London: Routledge, 2016. p. 67-91.

SWAID, H.; HOFFMAN, M. E. Climatic impacts of urban design features for high- and mid-latitude cities. **Energy and Buildings**, v. 14, p. 325-336, 1990.

TALEGHANI, M. et al. Heat in courtyards: a validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands. **Solar Energy**, v. 103, p. 108-124, 2014.

THE ECONOMIST INTELLIGENT UNION. **The Cooling Imperative Forecasting the size and source of future cooling demand**. London: 2019.

THORSSON, S. et al. Mean radiant temperature: a predictor of heat related mortality. **Urban Climate**, v. 10, p. 332-345, 2014.

THORSSON, S.; LINDBERG, F. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 1983-1993, 2007.

TSITOURA, M.; MICHAILIDOU, M.; TSOUTSOS, T. Achieving sustainability through the management of microclimate parameters in Mediterranean urban environments during summer. **Sustainable Cities and Society**, v. 26, p. 48-64, 2016.

UNGER, J. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. **Climate Research**, v. 27, p. 253-264, 2004.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs. Population Division. **World urbanization prospects: the 2018 revision**. Press Release, 2018.

_____. Department of Economic and Social Affairs. Population Division. **The world's cities in 2016: data booklet** (ST/ESA/ SER.A/392), 2016.

_____. Department of Economic and Social Affairs. Population Division. **World urbanization prospects: the 2014 revision**. CD-ROM edition, 2014.

UPMANIS, H.; CHEN, D. Influence of geographical factors and meteorological variables on nocturnal urban-park temperature differences-a case study of summer 1995 in Goteborg, Sweden. **Climate Research**, v. 13, n. 2, p. 125-139, 1999.

VARDOULAKIS, S. et al. Modelling air quality in street canyons: a review. **Atmospheric Environment**, v. 37, p. 155-182, 2003.

VILELA, J. A.; ASSIS, E. S.; PAIVA, J. E. M. DE. Variáveis do clima urbano: análise da situação atual e prognósticos para a região do Bairro Belvedere III, Belo Horizonte, MG. In: X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2009, Natal. **Anais...** Natal: ANTAC, 2009. p. 295-304.

WANG, Y.; AKBARI, H. Effect of sky view factor on outdoor temperature and comfort in Montreal. **Environmental Engineering Science**, v. 31, n. 6, p. 272-287, 2014.

WANG, Y.; AKBARI, H.; CHEN, B. Urban geometry and environmental urban policy development. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 308-315, 2016.

WARD, H. C.; GRIMMOND, C. S. B. Assessing the impact of changes in surface cover, human behaviour and climate on energy partitioning across greater London. **Landscape and Urban Planning**, v. 165, p. 142-161, 2017.

WEBER, F. S. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. 2018. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

WHITE, J. M.; EATON, F. D.; AUER, A. H. The net radiation budget of the St. Louis metropolitan area. **Journal of Applied Meteorology**, n. 17, p. 593-599, 1978.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**, No. 8. **Guide**. Geneva: WMO, 2014 (updated 2017).

WONG, N. H; CHEN, Y. Tropical urban heat islands: climate, buildings and greenery. Abingdon: Taylor and Francis, 2009.

XI, T. et al. Study on the outdoor thermal environment and thermal comfort around campus clusters in subtropical urban areas. **Building and Environment**, v. 52, p. 162-170, 2012.

XU, Y. et al. Urban morphology detection and computation for urban climate research. **Landscape and Urban Planning**, v. 167, p. 212-224, 2017.

YAGHOUBIAN, N.; KLEISSL, J. Urban climate effect of reflective pavements on building energy use. **Urban Climate**, v. 2, p. 25-42, 2012.

YAN, H. et al. Assessing the effects of landscape design parameters on intra-urban air temperature variability: the case of Beijing, China. **Building and Environment**, v. 76, p. 44-53, 2014.

YANG, F. et al. Thermal comfort effects of urban design strategies in high-rise urban environments in a sub-tropical climate. **Architectural Science Review**, v. 54, n. 4, p. 285-304, 2011.

YANG, F.; QIAN, F.; LAU, S. S. Y. Urban form and density as indicators for summertime outdoor ventilation potential: a case study on high-rise housing in Shanghai. **Building and Environment**, v. 70, p. 122-137, 2013a.

YANG, L.; LI, Y. City ventilation of Hong Kong at no-wind conditions. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 19, p. 3111-3121, 2009.

YANG, W.; WONG, N. H.; LIN, Y. Thermal comfort in high-rise urban environments in Singapore. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 2125-2131, 2015.

YANG, X. et al. The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 2, p. 890-904, 2017.

_____. Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. **Building and Environment**, v. 60, p. 93-104, 2013.

YANG, X.; LI, Y. The impact of building density and building height heterogeneity on average urban albedo and street surface temperature. **Building and Environment**, v. 90, p. 146-156, 2015.

YIN, Y.; MIZOKAMI, S.; MARUYAMA, T. An analysis of the influence of urban form on energy consumption by individual consumption behaviors from a microeconomic viewpoint. **Energy Policy**, v. 61, p. 909-919, 2013.

ZHANG, J. et al. Evaluating environmental implications of density: a comparative case study on the relationship between density, urban block typology and sky exposure. **Automation in Construction**, v. 22, p. 90-101, 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Dados de saída da pasta atmosfera.

Variável	Unidade	Descrição
Objects	-	IDs de objeto único para visualizar o domínio do modelo.
Flow u (u)	m/s	Velocidade do vento. Componente vetorial ao longo do eixo Oeste-Leste (+: Leste, -: Oeste)
Flow v (v)	m/s	Velocidade do vento. Componente vetorial ao longo do eixo Norte-Sul (+: Sul, -: Norte)
Flow w (w)	m/s	Velocidade do vento. Componente de vetor ao longo do eixo vertical (+: cima, -: para baixo)
Wind Speed (wSpeed)	m/s	Velocidade do vento. Soma vetorial em todos os 3 eixos
Wind Speed Change	%	Variação da velocidade do vento em percentagem referente ao perfil de vazão não perturbado no mesmo nível de altura.
Wind Direction (wDir)	deg	Direção do vento da componente horizontal na referência geográfica (0: N..90: E..180: S, etc.)
Pressure Perturbation (Press.p)	Pa	Valores de pressão irão aumentar ao longo do tempo, usar valores de diferença espacial somente se necessário
Air Temperature (T)	°C	Tar potencial na pressão de referência (e padrão do modelo). Para o modelo 3D, pode ser tratado como temperatura absoluta do ar
Air Temperature difference to Inflow	K	Diferença entre a Tar local e a Tar de referência na entrada no mesmo nível de altura
Air Temperature Change (dT/dt)	K/h	Alterações da Tar em relação ao último arquivo de saída _AT_
Specific Humidity (q)	g/kg	Umidade específica do ar
Relative Humidity (q.rel)	%	Umidade relativa do ar (Atenção: depende tanto da umidade específica do ar quanto da Tar)
TKE (E)	m ² /m ³	Energia cinética turbulenta local
TKE Dissipation (Eps)	m ³ /m ³	Taxa de dissipação local de energia cinética turbulenta
Mean Radiant Temperature (Tmrt)	°C	A composição de fluxos radiativos e Tar para uma pessoa em pé.
CO ₂ Concentration (CO ₂)	mg/m ³	Concentração de CO ₂ no domínio do modelo (unidades de peso)
CO ₂ Concentration (CO ₂)	ppm	Concentração de CO ₂ no domínio do modelo (unidades em partes por milhão)
Vertical Exchange Coefficient Impulse (km)	m ² /s	Coefficiente de troca vertical calculado para impulso.

APÊNDICE A - (cont.)

Variável	Unidade	Descrição
Horizontal Exchange Coefficient Impulse (km)	m ² /s	Coeficiente de câmbio horizontal calculado para o impulso (No momento para microescala assumiu ser igual ao coeficiente de troca vertical)
Direct Shortwave Radiation (SW.dir)	W/m ²	Radiação solar direta disponível referente a uma superfície de referência perpendicular aos raios solares (valor máximo antes da aplicação da lei de Lamberts)
Diffuse Shortwave Radiation (SW.dif)	W/m ²	Radiação solar difusa disponível referente a uma superfície de referência horizontal
Reflected Shortwave Radiation	W/m ²	Radiação solar refletida disponível a partir do ambiente referindo-se a uma superfície horizontal de referência.
Air Temperature Change through LW Warming (Rlw.warming)	K/h	Efeito da divergência de radiação de onda longa na Tar por tempo
Vegetation LAD (LAD)	m ² /m ³	
Leaf Temperature (Tleaf)	°C	
Temperature Flux at Leaf	K*m/s	
Stomata Resistance (Rs)	s/m	
Vapour Flux at Leaf	g/kg*m/s	
Water on Leaf	g/ m ²	
CO2 Flux at Leaf (CO2.flx)	mg/kg*m/s	
Local Mixing Length	m	
TKE Mechanical Turbulence Production (E.mech)		

APÊNDICE B - Dados de saída da pasta edifícios.

Subpasta Dynamic:

Variável .dat	Unidade	Descrição
Simtime	-	-
Date	-	-
time	-	-
IndoorTemp	-	-
Av_Tair_at_facade	-	-
Energyflux.toIndoor	-	-
Energyflux.Conduction	-	-
Energyflux.SW.transmission	-	-
Shortwave.availabe	-	-
Shortwave.absorbed	-	-
Longwave.available	-	-
Longwave.emittedFacade	-	-
Sensible.outside	-	-

Variável .edx (Leonardo)	Unidade	Descrição
Temperature of facade - node 1 (outside)	K	-
Temperature of facade - node 2	K	-
Temperature of facade - node 3	K	-
Temperature of facade - node 4	K	-
Temperature of facade - node 5	K	-
Temperature of facade - node 6	K	-
Temperature of facade - node 7 (inside)	K	-
LW-Radiation emitted by facade	W/m ²	-

APÊNDICE B - (cont.)

Variável .edx (Leonardo)	Unidade	Descrição
uvw in front of facade	m/s	-
Absorbed direct SW radiation	W/m ²	-
Incoming LW radiation	W/m ²	-
Air Temperature in front of facade	K	-
Sensible Heat transmission coefficient outside	W/m ² K	-
Long Wave Energy Balance	W/m ²	-
Heat Flux through facade	W	-
Temperature of building (inside)	K	-
Energy needed for keeping T const	kWh	-

Subpasta Static:

Variável .edx (Leonardo)	Unidade	Descrição
Albedo of facade	-	-
Transmission of facade	-	-
Emissivity of facade	-	-
Sky View factor sky	-	-
Sky View factor soil	-	-
Sky View factor bldg	-	-
Sky View factor veg	-	-

APÊNDICE C - Dados de saída da pasta *inflow*.

Variável	Unidade	Descrição
Z	m	Altura do modelo
U	m/s	Velocidade do vento na componente u
V	m/s	Velocidade do vento na componente v
T	K	Tar
Q	g/kg	Umidade específica do ar
Ri		Richardson Number
Km. vert	m ² /s	Coeficiente de troca vertical de impulso
E	m ² /s ²	Energia Cinética Turbulenta
Eps	m ³ /s ²	Dissipação de TKE
E_prod	-	Produção de E
E_therm	-	Produção Termal de E
E_trans	-	Transporte de E
Rlw.warming	K/h	Efeito da divergência de radiação de onda longa na Tar por tempo
Km_limit	m ² /s	Limite de km se utilizado o modelo E-eps
L_diag	m	Comprimento de Mistura calculado utilizando a abordagem diagnóstica
L_prog	m	Comprimento de Mistura calculado a partir dos dados E/eps

APÊNDICE D - Dados de saída da pasta poluentes.

Variável .edx (Leonardo)	Unidade	Descrição
Flow u	m/s	-
Flow v	m/s	-
Flow w	m/s	-
Wind Speed	m/s	-
Wind Speed Change	%	-
Wind Direction	graus	-
Pot. Temperature	K	-
Spec. Humidity	g/Kg	-
Relative Humidity	%	-
Vertical Exchange Coef. Impuls	m ² /s	-
Horizontal Exchange Coef. Impuls	m ² /s	-
PM2.5 Concentration	µg/m ³	-
PM2.5 Source	µg/m ³	-
PM2.5 Deposition velocity	mm/s	-
PM2.5 Total Deposited Mass	µg/m ²	-
PM2.5 Reaction Term	-	-

APÊNDICE E - Dados de saída da pasta receptors.

Receptor Atmosférico:

Variável .edx (Leonardo)	Unidade	Descrição
Data	-	Data do modelo
Time	-	Horário do modelo para os dados de saída
modtime	min	Tempo do modelo em minutos
Wind Speed	m/s	-
Z	m	Altura do modelo
U	m/s	Velocidade do vento na componente u
V	m/s	Velocidade do vento na componente v
W	m/s	Velocidade do vento na componente w
wSpeed	m/s	Velocidade do vento total
wDir	°	Direção do vento, 0=Norte
T	K	Tar
dT/dt	K/h	Mudança da temperature do ar com o tempo
Q	g/kg	Umidade específica
q.rel	%	Umidade relativa
Km. vert	m ² /s	Coeficiente de troca vertical de impulso
Km.vert.nrm	-	Km vertical normalizado com lei logarítima
Km.hor	m ² /s	Coeficiente de troca horizontal de impulso
E	m ² /s ²	Energia Cinética Turbulenta
e (eps)	m ³ /s ²	Dissipação de TKE
TMRT	K	Temperatura radiante média
LAD	m ² /m ³	Índice de área Foliar
Tleaf	K	Temperatura foliar (0 se não tiver folhas)
Hleaf	W/m ²	Fluxo de calor sensível das folhas para o ar
LEleaf	W/m ²	Fluxo de calor latente das folhas para o ar
Rs	m/s	Resistência dos estomas (0 se não tiver folhas)
CO2	mg/m ³	Concentração de CO2
CO2.flx	mg/(kg*s)	Fluxo de CO2 nas plantas (se o modelo A-gs for utilizado)
SW.dir	W/m ²	Radiação de ondas curtas direta
SW.dif	W/m ²	Radiação de ondas curtas difusa
Press.p	Pa	Perturbação de pressão
Mass	mg/m ³	Concentração de massa
Rlw.warming	K/h	Efeito da divergência de radiação de onda longa na Tar por tempo
SVF.bldg	-	Fator de visão de céu (só considerando edifícios)

APÊNDICE E - (cont.)

Receptor de Superfície/Fluxo:

Variável .edx (Leonardo)	Unidade	Descrição
Data	-	Data do modelo
Time	-	Horário do modelo para os dados de saída
modtime	min	Tempo do modelo em minutos
Wind Speed	m/s	-
Z	m	Sempre 0
T0	K	Temperatura de superfície
dT0/dt	K/h	Mudança na temperatura de superfície
q0	g/kg	Umididade na superfície
uv1	m/s	Velocidade do vento horizontal sobre a superfície
w1	m/s	Componente de temperatura do vento vertical sobre a superfície (+:para cima)
T1	K	Tar no ponto de grade sobre a superfície
H	W/m ²	Fluxo de Calor Sensível
LE	W/m ²	Fluxo de Calor Latente
G	W/m ²	Fluxo de calor do solo, +: direcionado para o solo
Km	m ² /s	Coeficiente de troca de massa na superfície
Kh	m ² /s	Coeficiente de trocas turbulentas de calor na superfície
Qkw.dir	W/m ²	Máxima Radiação de onda curta direta
Qkw.dif	W/m ²	Máxima radiação de onda curta difusa
Qlw.Budg	W/m ²	Balanço de Radiação de onda longa na superfície
Qlw.surf	W/m ²	Emissão de radiação de onda longa na superfície
Qlw.sky	W/m ²	Radiação de onda longa absorvida do céu
Qlw.leafs	W/m ²	Radiação de onda longa absorvida da vegetação
Qlw.envir	W/m ²	Radiação de onda longa absorvida dos edifícios

APÊNDICE E - (cont.)

Receptor de Solo:

Variável .edx (Leonardo)	Unidade	Descrição
Data	-	Data do modelo
Time	-	Horário do modelo para os dados de saída
modtime	min	Tempo do modelo em minutos
Wind Speed	m/s	-
Z	cm	Profundidade em cm (+)
T	K	Temperatura do solo
Eta	m ³ /m ²	Conteúdo volumétrico de água

APÊNDICE F - Dados de saída da pasta solos.

Variável	Unidade	Descrição
T	K	Temperatura do solo
Eta	m ³ /m ²	Conteúdo volumétrico de água no solo
Relative soil wetness	%	Umidade relativa do solo em relação ao seu valor de saturação

APÊNDICE G - Variáveis de saída da pasta surface.

Variável .edx (Leonardo)	Unidade	Descrição
z_topo	m	Altura absoluta da superfície do solo no modelo (sempre 0 na versão recente)
T Surface	K	Temperatura de superfície do solo
T Surface Diff	K	Diferença da temperatura de superfície do solo com a superfície de referência
T Surface Change	K/h	Mudança da temperatura da superfície do solo
q Surface	g/Kg	Umidade específica na superfície
uv above surface	m/s	Velocidade do vento no primeiro nível da grade acima da superfície do solo
Sensible heat flux	W/m ²	Fluxo de calor sensível para o ar (+: para o ar)
Coef. De troca de calor	W/m ²	Coeficiente de troca de calor entre a superfície e o ar
Latent heat flux	W/m ²	Fluxo de calor latente para o ar (+: para o ar)
Fluxo de calor do solo	W/m ²	Fluxo de calor no solo (+: direcionado para camadas mais profundas)
Sw direct radiation	W/m ²	Radiação direta de onda curta que atinge a superfície do solo
Sw diffuse radiation	W/m ²	Radiação difusa de onda curta que atinge a superfície do solo
Lambert factor	0-1	Valor da lei de Lambert para o ângulo solar
Longwave radiation bud.	W/m ²	Balanco de radiação de ondas longas na superfície do solo
Longwave rad. from vegetation	W/m ²	Radiação de onda longa recebida das camadas acima de vegetação
Longwave rad. from Buildings only	W/m ²	Radiação de onda longa recebida dos edifícios
Water flux	g/(m ² *s)	Fluxo de água de/para a superfície do solo
Sky-View Factor	0-1	Fator de visão de céu para z = 0 (edifícios somente)
Building height	m	Altura do topo do edifício (0 se não houver edifício)
Surface albedo	0-1	Albedo da superfície do solo
Deposition speed	mm/s	Fluxo de deposição do poluente analisado
Mass deposited	µg/m ²	Massa depositada na superfície do solo em µg

APÊNDICE H - Código que gerou os cálculos estatísticos.

```
#####
# Limpeza dos dados

library(tidyverse)
library(magrittr)

raw_path = "./raw_data"
clean_path = "./clean_data"
simuls = list.files(raw_path)

full_data = NULL
for(file in simuls)
{
  vars = str_split(file, fixed("."))[[1]][1]
  vars = str_split(vars, fixed("_"))[[1]]
  fname = paste(raw_path, file, sep = "/")
  arq = read_csv(fname)
  arq = arq[-1,]
  colnames(arq) = c("X,Y", "X_g", "Y_g", "X_m", "Y_m", "Data")
  arq = arq[,-1]
  arq %<>%
    mutate(
      X_g = as.numeric(X_g),
      Y_g = as.numeric(Y_g),
      X_m = as.numeric(str_replace(X_m, fixed(","), ".")),
      Y_m = as.numeric(str_replace(Y_m, fixed(","), ".")),
      Data = as.numeric(str_replace(Data, fixed(","), ".")),
      resposta = vars[1],
      horario = ifelse(vars[2] == "05h" | vars[2] == "06h", "05-06h", "12-13h"),
      altura = as.factor(vars[3]),
      material = paste(vars[4], vars[5], sep="_")
    )
  full_data = rbind(full_data, arq)
}
```

```

}
full_data %<>%
  spread(resposta, Data)
full_data %>%
  write_rds(paste(clean_path, "data.rds", sep = "/"))

#####
# Análises

library(tidyverse)
library(magrittr)

# Densconsiderar dados do tipo -999
clean_path = "./clean_data"
fname = paste(clean_path, "data.rds", sep = "/")
full_data = read_rds(fname) %>%
  mutate(eixo_ns_e = X_g >= 29 & Y_g >= 45 & X_g <= 48 & Y_g <= 88,
         eixo_ns_d = X_g >= 85 & Y_g >= 45 & X_g <= 103 & Y_g <= 88,
         eixo_lo_c = X_g >= 45 & Y_g >= 85 & X_g <= 88 & Y_g <= 103,
         eixo_lo_b = X_g >= 45 & Y_g >= 29 & X_g <= 88 & Y_g <= 48,
         eixo_meio = X_g >= 49 & Y_g >= 49 & X_g <= 84 & Y_g <= 84
  ) %>%
  filter(eixo_ns_e | eixo_ns_d | eixo_lo_c | eixo_lo_b | eixo_meio,
         Tar >= 0 & TEP >= 0 & TRM >= 0)

n_sens = full_data %>%
  filter(material=="concreto_00", horario == "05-06h", altura == 119) %>%
  nrow()
n_sens

full_data %<>% group_by(material, horario, altura,
  eixo_ns_e, eixo_ns_d, eixo_lo_c, eixo_lo_b, eixo_meio) %>%
  summarise(Tar_m = mean(Tar), TEP_m = mean(TEP), TRM_m = mean(TRM)) %>%
  ungroup()

```

```
full_data %>% nrow()
```

```
fm = cbind(Tar_m, TEP_m, TRM_m) ~ .
```

```
order_coef = function(res, time)
```

```
{
  coef = res$coefficients
  colnames(coef) = paste(colnames(coef), time, sep="")
```

```
  coef_mat = coef[2:5,]
  new_names = rownames(coef_mat) %>%
    append("materialceramica_00") %>%
    str_replace_all("material", "")
  coef_mat = rbind(coef_mat, c(0,0,0))
  rownames(coef_mat) = new_names
  order_mat = apply(coef_mat, 2, rank)
```

```
  coef_alt = coef[6:7,]
  new_names = rownames(coef_alt) %>%
    append("altura119") %>%
    str_replace_all("altura", "")
  coef_alt = rbind(coef_alt, c(0,0,0))
  rownames(coef_alt) = new_names
  order_alt = apply(coef_alt, 2, rank)
```

```
  coef_loc = coef[8:12,]
  new_names = rownames(coef_loc) %>%
    str_replace_all("TRUE", "") %>%
    str_replace_all("eixo_", "")
  rownames(coef_loc) = new_names
  order_loc = apply(coef_loc, 2, rank)
```

```
  new_coef = rbind(coef_mat,coef_alt,coef_loc)
  complete_coef = new_coef %>%
    as_tibble() %>%
```



```

mutate(fator = rownames(new_coef))

list(list(mat=coef_mat, alt=coef_alt, loc=coef_loc), complete_coef)
}

res_5h = full_data %>%
  filter(horario == "05-06h") %>%
  select(-horario) %>%
  lm(fm, data = .)
coef_5h = order_coef(res_5h, "_05h")
complete_coef_5h = coef_5h[[2]]
coef_5h = coef_5h[[1]]

res_12h = full_data %>%
  filter(horario == "12-13h") %>%
  select(-horario) %>%
  lm(fm, data = .)
coef_12h = order_coef(res_12h, "_12h")
complete_coef_12h = coef_12h[[2]]
coef_12h = coef_12h[[1]]

coef_table = inner_join(complete_coef_5h, complete_coef_12h)
coef_table %>% write_csv("coef_table.csv")
complete_coef_5h

final_coef = list()
for(ii in names(coef_5h))
{
  final_coef[[ii]] = cbind(coef_5h[[ii]], coef_12h[[ii]])
}
final_coef %>% capture.output(file = "ordenacao.txt")

sum_file = file("analise05h.txt")
res_5h %>% summary() %>% capture.output(file = sum_file)

```

```
sum_file = file("analise12h.txt")
res_12h %>% summary() %>% capture.output(file = sum_file)
```

```
# Tukey's
fm = TRM_m ~ .
res_12h_tar = full_data %>%
  filter(horario == "12-13h") %>%
  select(-Tar_m, -horario, -TEP_m) %>%
  aov(fm, data = .) %>%
  TukeyHSD(conf.level = 0.95)
res_12h_tar
```

```
fm = TRM_m ~ .
res_12h_tar = full_data %>%
  mutate(eixo_lo_b = as.factor(full_data$eixo_lo_b),
         eixo_lo_c = as.factor(full_data$eixo_lo_c),
         eixo_ns_d = as.factor(full_data$eixo_ns_d),
         eixo_ns_e = as.factor(full_data$eixo_ns_e),
         eixo_meio = as.factor(full_data$eixo_meio)
  ) %>%
  filter(horario == "05-06h") %>%
  select(-Tar_m, -horario, -TEP_m) %>%
  aov(fm, data = .) %>%
  TukeyHSD(conf.level = 0.95)
res_12h_tar
```

```
library(tidyverse)
library(magrittr)
data = read_csv("./raw_data/regressao.csv")
colnames(data) = c("tar_paulista", "tar_paulista_sim",
                  "tar_bela", "tar_bela_sim",
                  "trm_paulista", "trm_paulista_sim",
                  "trm_bela_black", "trm_bela_sim", "trm_bela_grey")
data %>%
  lm(tar_paulista~tar_paulista_sim, data = .) %>%
```

```
summary()
```

```
data %>%
```

```
  lm(tar_bela~tar_bela_sim, data = .) %>%
```

```
  summary()
```

```
data %>%
```

```
  lm(trm_paulista~trm_paulista_sim, data = .) %>%
```

```
  summary()
```

```
data %>%
```

```
  lm(trm_paulista~trm_paulista_sim, data = .) %>%
```

```
  summary()
```

```
data %>%
```

```
  lm(trm_bela_black~trm_bela_sim, data = .) %>%
```

```
  summary()
```

```
data %>%
```

```
  lm(trm_bela_grey~trm_bela_sim, data = .) %>%
```

```
  summary()
```

Horário mais quente (13h)

Distribuição da Tar às 13h no nível do pedestre (1,50 m) em todos cenários.

Desempenho dos materiais em relação à média da Tar obtido às 13h.

Materiais	Ranking	Diferença da Tar (°C)
tijolo cerâmico preto	5	0,2
vidro laminado refletor	4	0,2
bloco de concreto branco	3	0,2
vidro laminado transmissivo	2	0,0
bloco de concreto preto	1	0,0

Fonte: Elaborado pela própria autora

Desempenho da geometria edificada em relação à média da Tar obtida às 13h

Altura (m)	Ranking	Diferença da Tar (°C)
44	3	0,8
81	2	0,0
119	1	0,0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Desempenho dos eixos em relação à média da Tar obtida às 13h

Eixos	Ranking	Diferença do Tar (°C)
Norte-Sul	3	0,4
Leste-Oeste	2	0,2
Meio	1	0,0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Horário mais frio (6h)

Distribuição da Tar às 6h no nível do pedestre (1,50 m) em todos os cenários.

Desempenho dos materiais em relação à média da Tar obtido às 6h.

Materiais	Ranking	Diferença da Tar (°C)
bloco de concreto preto	5	0,4
tijolo cerâmico preto	4	0,3
bloco de concreto branco	3	0,3
vidro laminado refletor	2	0,0
vidro laminado transmissivo	1	0,0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Desempenho da geometria edificada em relação à média da Tar obtida às 6h.

Altura (m)	Ranking	Diferença da Tar (°C)
119	3	0,0
81	2	0,0
44	1	0,0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Desempenho dos eixos em relação à média da Tar obtida às 6h.

Eixos	Ranking	Diferença do Tar (°C)
Meio	1	0,0
Norte-Sul	1	0,0
Leste-Oeste	1	0,0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

TMCx-HD Water/Soil Temperature Sensor

For use with HOBO® U12 and UX120-006M data loggers and ZW data nodes

Specifications

Measurement Range	-40° to 50°C (-40° to 122°F) in water; -40° to 100°C (-40° to 212°F) in air
Accuracy with U12	±0.25°C from 0° to 50°C (±0.45°F from 32° to 122°F), insert probe 2.3 cm (0.9 inches) minimum; see Plot A
Accuracy with ZW	±0.21°C from 0° to 50°C (±0.38°F from 32° to 122°F), insert probe 2.3 cm (0.9 inches) minimum; see Plot B
Accuracy with UX120-006M	±0.15°C from 0° to 50°C (±0.27°F from 32° to 122°F), insert probe 2.3 cm (0.9 inches) minimum; see Plot C
Resolution with U12	0.03° at 20°C (0.05° at 68°F)
Resolution with ZW	0.02°C at 25°C (0.04°F at 77°F)
Resolution with UX120-006M	0.002° at 25°C (0.003° at 77°F)
Drift	<0.1°C (<0.2°F) per year
Response time in air	2 min. typical to 90% in air moving 1 m/sec (2.2 mph)
Response time in stirred water	30 sec. typical to 90%.
Operating range	Sensor tip and cable immersion in fresh water up to +50°C (122°F) for 1 year
Housing	Copper-plated sensor tip
Dimensions	5.1 x 33 mm (0.2 x 1.3 inches)
Weight	34 g (1.1 oz)

Plot A: U12 Accuracy*

Plot B: ZW Accuracy*

Plot C: UX120-006M Accuracy*

*Accuracy shown in plots outside the 0 to 50°C range is typical.

Mounting Considerations:

- Mount the sensor where there is good air circulation for measuring air temperature.
- Mount the sensor off the mounting surface so temperature measurements are not affected by the surface itself.

onset
HOBO® Data Loggers

1-800-LOGGERS (564-4377) • 508-759-9500
www.onsetcomp.com • loggerhelp@onsetcomp.com

© 2013-2015 Onset Computer Corporation. All rights reserved. Onset and HOBO are trademarks or registered trademarks of Onset Computer Corporation. All other trademarks are the property of their respective companies.

6679-K

ANEXO C - Especificações da lente Sigma 8mm F3.5 EX DG Circular Fisheye.

SPECIFICATIONS		
Lens Construction	11 Elements in 6 Groups	
Angle of View	180°	
Number of Diaphragm Blades	6	
Minimum Aperture	f22	
Minimum Focusing Distance	13.5 cm / 5.3 in	
Filter Size (mm)	Insertion-type gelatin filter into rear of the lens	
Maximum Magnifications	1:4.6	
Dimensions (Diameter x Length)	73.5mm x 68.6 mm/2.9in x 2.7 in	
Weight	400g / 14.1 oz.	
Corresponding Mounts	Sigma	EX DG
	Nikon	EX DG
	Canon	EX DG
HSM -Hyper-Sonic Motor EX - EX Lens DC - DC for Digital		
* Nikon Mount: Does not have aperture ring		
* Nikon Mount: NO built in motor lens: NOT compatible with D40, D40x, D60, D3000, D5000		
* The appearance, specifications, and the like of the product are subject to change for improvement without notice.

ANEXO D - Coeficiente de aproveitamento por quadra no município de São Paulo.

ANEXO E - Vidros mais utilizados em edifícios não residenciais.

ESTUDO DE VIDROS				SOLICITADO:		CAROLINA GUSSON		REFERENCIA: VIDROS MAIS UTILIZADOS EM EDIFÍCIOS NÃO RESIDENCIAIS										12/jul/19	
Código do Produto	Descrição	Cor Refletida na Face	Espessura	ÍNDICES DE LUZ / APARÊNCIA			ÍNDICES DE CALOR										Preços	Seletividade	
				TL	Rle	Rli	TE	Rfe	AE	FS	CS	U	Tipo	Do menor valor ao maior valor	Raporo entre Transmissão de Luz e Fator Solar				
GL 1000	Laminado	Externa Incolor	Total 8,38mm Detalhe 44.1	Transmissão Luminosa %	Reflexão Luminosa Externa %	Reflexão Luminosa Interna %	Transmissão Energia %	Reflexão de Energia %	Absorção %	Fator Solar %	Coefficiente de Sombria	Valor U	Revestimento						
				89%	8%	8%	76%	7%	17%	80%	0,92	5,60	Sem				1,11		
GA 156	Laminado Controle Solar	Prata	8,38mm 44.1	21%	30%	22%	17%	26%	57%	30%	0,35	5,60	Refletivo			0,70			
GA 015	Laminado Controle Solar	Prata	8,38mm 44.1	19%	32%	25%	15%	31%	54%	28%	0,32	5,60	Refletivo			0,68			
GA 016	Laminado Controle Solar	Prata	8,38mm 44.1	33%	23%	17%	27%	20%	52%	40%	0,46	5,60	Refletivo			0,83			
GA 164	Laminado Controle Solar	Prata	8,38mm 44.1	38%	19%	12%	30%	17%	54%	42%	0,49	5,60	Refletivo			0,90			
GA 154	Laminado Controle Solar	Azul	8,38mm 44.1	55%	14%	10%	48%	12%	40%	57%	0,66	5,60	Refletivo			0,96			
GA 255	Laminado Controle Solar	Prata	8,38mm 44.1	32%	31%	9%	21%	27%	52%	33%	0,38	5,60	Refletivo			0,97			
GA 217	Laminado Controle Solar	Neutro	8,38mm 44.1	41%	24%	9%	33%	20%	48%	44%	0,50	5,60	Refletivo			0,93			
GA 258	Laminado Controle Solar	Neutro	8,38mm 44.1	48%	12%	12%	32%	14%	54%	45%	0,52	5,60	Refletivo			1,07			
GA 137	Laminado Controle Solar	Neutro	8,38mm 44.1	71%	9%	8%	50%	16%	35%	58%	0,67	5,52	Lowe			1,22			
GA 128	Laminado Controle Solar	Prata	8,38mm 44.1	39%	31%	19%	26%	36%	38%	35%	0,40	5,60	Lowe			1,11			
GA 129	Laminado Controle Solar	Neutro	8,38mm 44.1	47%	25%	19%	31%	34%	35%	39%	0,45	5,60	Lowe			1,21			
GA 120	Laminado Controle Solar	Azul	8,38mm 44.1	50%	24%	26%	24%	38%	38%	33%	0,38	5,60	Lowe 2*			1,52			
Quanto maior, melhor																			
Notas:																			
Os valores apresentados são orientativos, fornecidos pelos fabricantes de matéria prima, através de simulação em software																			
Estes valores calculados são baseados nas normas EN410 (valores de energia luminosa e energética) e a EN673 (coeficiente de transmissão térmica - Valor U).																			
Os valores de desempenho representam valores nominais para o centro do vidro, pequenas variações podem ocorrer devido ao processamento, ponto de tolerâncias dos produtos e tipo de instrumento de medição das propriedades óticas.																			
A tolerância é de +/- 3 pontos percentuais para os valores de energia luminosa e energética e de +/- 0,1 w/m2K para o Valor U.																			
ABNT NBR 16023 2011 Vidros revestidos para controle solar — Requisitos, classificação e métodos de ensaio - Esta Norma estabelece as características e propriedades e especifica os requisitos gerais e métodos de ensaio, para garantir a qualidade e o desempenho dos vidros revestidos para controle solar.																			
* Dupla camada de prata																			