IMPACTOS DA MORFOLOGIA DA CIDADE NAS CONDIÇÕES MICROCLIMÁTICAS DE ÁREAS URBANAS CONSOLIDADAS DE SÃO PAULO EM DIAS QUENTES

Gabriel Bonansea de Alencar Novaes (1); Leonardo Marques Monteiro (2)
(1) Mestre em Arquitetura e Urbanismo, gabrielalencarnovaes@hotmail.com, Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP), R. do Lago, 876 - Butantã, São Paulo - SP, 04280-000
(2) Professor Livre-Docente em Arquitetura e Urbanismo, leo4mm@usp.br, Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP), R. do Lago, 876 - Butantã, São Paulo - SP, 04280-000

RESUMO
Diferentes modelos de planejamento urbano manifestam como as cidades se adequam ao seu crescimento, através da expansão horizontal, do adensamento e/ou da verticalização, compondo a morfologia da cidade. Estudos mostram que a morfologia urbana pode influir no ganho e na reflexão de calor pelas massas edificadas no espaço urbano durante o período diurno e na perda de calor durante o período noturno, além de alterar as velocidades e direções dos ventos que permeiam os vazios entre edificações. Assim, a concepção da morfologia urbana pode contribuir para aumentar ou diminuir os efeitos dos fenômenos de aquecimento urbano, ajudando a impactar nas condições de conforto térmico do pedestre e de climatização dos edifícios. Esta pesquisa avaliou os impactos de cinco diferentes composições morfológicas de áreas urbanas sobre as condições microclimáticas locais em dias quentes percebidas na escala do pedestre, com base em simulações das condições térmicas de espaços urbanos abertos de trechos de bairros da cidade de São Paulo, por meio do *software ENVI-met*, calibrado a partir de medições empíricas de variáveis microclimáticas em um ambiente existente da cidade. Os resultados das avaliações de cinco diferentes modelos permitiram verificar que as condições morfológicas são capazes de contribuir para a alteração das principais variáveis térmicas do espaço urbano aberto e índices de conforto térmico dos pedestres. Nos modelos estudados, verificou-se que, quanto maior adensamento e a verticalização, mais amenas se mostraram as condições térmicas dos espaços urbanos abertos no período diurno, em função do sombreamento ocasionado pelos edifícios, e maiores os valores de temperatura do ar no período noturno, devido à maior emissão de radiação de onda longa pelo cânion urbano durante a noite.
Palavras-chave: condições térmicas em espaços urbanos abertos, microclima urbano, morfologia urbana.

ABSTRACT
Different models of urban planning show how cities adapt to their growth, through horizontal expansion, densification and/or verticalization, composing the morphology of the city. Studies show that urban morphology can influence heat gain and reflection by the built masses in the urban space during the day and heat loss during the night, in addition to changing the speeds and directions of the winds that permeate the voids between buildings. Thus, the conception of urban morphology can contribute to increase or decrease the effects of urban heating phenomena, contributing to impact the conditions of pedestrians' thermal comfort and of buildings air conditioning. This research evaluated the impacts of five different morphological compositions of urban areas on the local microclimate conditions perceived on the pedestrian scale during hot days, based on simulations of the thermal conditions of open urban spaces in areas of São Paulo neighborhoods, through *ENVI-met software*, calibrated from empirical measurements of microclimate variables in an existing city environment. The results of the five different models' evaluations made it possible to verify that the morphological conditions are capable of contributing to the alteration of the main thermal variables of the open urban space and of pedestrians' thermal comfort index. In the studied models, it was found that the higher the density and the verticalization, the milder the thermal conditions of the open urban spaces during the daytime, due to the shading caused by the buildings, and the higher the air temperature values at nighttime, due to the higher emission of long wave radiation by the urban canyon during the night.
Keywords: thermal conditions in open urban spaces, urban microclimate, urban morphology.

1. INTRODUÇÃO

Diferentes modelos de planejamento urbano manifestam como as cidades se adequam ao seu crescimento, através da expansão horizontal, do adensamento e/ou da verticalização. Esta formação da morfologia urbana é relevante, dentre outras razões, porque diferentes formações do espaço urbano impactam de formas diversas o meio ambiente e os fenômenos de aquecimento urbano (GARTLAND, 2010).

A morfologia urbana pode ser definida pela volumetria do meio urbano e da sua transformação ao longo do tempo (LAMAS, 2004), resultado dos aspectos dos edifícios, das vias, e dos espaços urbanos abertos (AMORIM e TANGARI, 2006). Pesquisas demonstraram que a morfologia urbana é determinante para as condições de insolação e ventilação dos ambientes urbanos e das edificações (MINELLA e KRÜGER, 2015), podendo influir no ganho e na reflexão de calor pelas massas edificadas durante o período diurno e na perda de calor durante o período noturno, além de alterar as velocidades e direções dos ventos que permeiam os vazios entre edificações (TALEGHANI, KLEEREKOPER, et al., 2015).

Assim, a morfologia urbana pode contribuir para aumentar ou diminuir os efeitos dos fenômenos de aquecimento urbano, ajudando a impactar nas condições de conforto térmico do pedestre e de climatização dos edifícios (KRÜGER, MINELLA e RASIA, 2011). Por exemplo, nos cânions urbanos, durante o dia, os edifícios mais altos ajudam a reduzir o ganho de calor do espaço urbano por radiação direta e ajudam a aumentar a velocidade do vento no nível do pedestre (SHARMIN, STEEMERS e MATZARAKIS, 2017), enquanto que, à noite, a radiação é refletida de forma difusa em diversas direções pelas superfícies de edificações sobre outras e, assim, cânions urbanos auxiliam o aprisionamento de radiação (OKE, 2002).

Estudos em Israel mostraram que o espaçamento amplo tem um efeito de aquecimento, enquanto o aprofundamento do cânion tem um efeito de resfriamento (SHASHUA-BAR, TZAMIR e HOFFMAN, 2004). Um estudo em Colombo, Sri Lanka, verificou que condições mais confortáveis foram encontradas em ruas estreitas com prédios altos. (JOHANSSON e EMMANUEL, 2006). De maneira similar, estudos em Delft, Países Baixos, revelaram que diferentes geometrias urbanas podem influenciar significativamente a Temperatura Radiante Média (*TRM*) e a Velocidade do Vento (*Var*) dos espaços urbanos abertos (TALEGHANI, KLEEREKOPER, et al., 2015), enquanto estudos em Daca, Bangladesh, que apontaram diferenças de até 6,2°C de Temperatura do Ar (*Tar*) e de até 10,0°C de Temperatura Radiante Média (*TRM*) entre formas urbanas irregulares e áreas regulares (SHARMIN, STEEMERS e MATZARAKIS, 2017).

Assim, como resultado de uma dissertação de mestrado (NOVAES, 2020), esta pesquisa avaliou os impactos de cinco diferentes composições morfológicas de áreas urbanas sobre as condições microclimáticas locais em dias quentes percebidas na escala do pedestre, com base em simulações das condições térmicas de espaços urbanos abertos de trechos de bairros da cidade de São Paulo.

2. OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa foi investigar os impactos de diferentes soluções de composições morfológicas urbanas nas condições microclimáticas de áreas urbanas consolidadas em dias quentes.

3. MÉTODO

Este trabalho se baseou na análise comparativa de cinco simulações das condições térmicas percebidas na escala do pedestre de espaços urbanos abertos de trechos de bairros de São Paulo, com uso do *software ENVI-met*, calibrado a partir de medições empíricas de variáveis microclimáticas realizadas no local de um dos modelos de simulação em um ambiente real da cidade. Os cinco modelos simulados representam trechos de bairros com formação urbana consolidada com aspectos morfológicos diversos, submetidos aos mesmos dados microclimáticos de borda. A análise foi realizada comparando as principais variáveis microclimáticas (temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa, velocidade do vento, radiações direta, refletida e de onda longa, horas diárias de insolação) nos pontos centrais de cada modelo e dispersas em sua área, e suas variações ao longo de um período de 24 horas. Ainda para análise do conforto térmico, foram estudados em cada modelo os resultados obtidos para a *TEP* – Temperatura Equivalente Percebida (MONTEIRO, 2018) – índice de conforto térmico para espaços urbanos abertos na cidade de São Paulo.

3.1. MEDIÇÕES IN LOCO DE DADOS MICROCLIMÁTICOS

As medições empíricas de dados microclimáticos foram realizadas em um sobrado no bairro Mirandópolis, na Zona Sul de São Paulo, entre os dias 06/12/2018 e 14/01/2019. Ainda que, em São Paulo, o verão seja caracterizado por frequentes precipitações, o período de medições de 40 dias, acompanhado de um registro

diário das condições meteorológicas, permitiu escolher um período de avaliação com alta temperaturas, baixa umidade, condições ensolaradas e tempo estável após 4 dias consecutivos.

Para a coleta de dados de Velocidade do Ar (*Var*), Direção do vento, Radiação Solar Global (*Ig*), Temperatura de Globo (*Tg*), Temperatura do Ar (*Tar*), Umidade Relativa (*UR*), em intervalos de 10 minutos, as medições comportaram o uso de dois *Hobos* e uma Estação Científica *Campbell*, equipados na totalidade com 3 termohigrômetros, 3 termômetros de globo, 1 anemômetro ultrassônico, e 1 piranômetro. Houve dois subpontos de medição externos totalmente descobertos.

As Figuras 1A a 1D mostra um subponto inferior, localizado na cobertura de uma edícula de 1 pavimento, enclausurado por paredes laterais, protegido do vento e com visão de céu parcialmente obstruída, contendo 2 termohigrômetros e 2 termômetros de globo a aproximadamente 4,5m do solo, pelos quais foram coletados dados de controle. As Figuras 2A a 2D mostra o subponto principal na laje de cobertura do sobrado de 2 pavimentos, acima da altura das demais casas do entorno, em local totalmente desobstruído vertical e lateralmente, praticamente sem nenhum mascaramento de céu, exposto à insolação e ao vento. No subponto da cobertura, foram colocados 1 termohigrômetro, 1 termômetro de globo, 1 piranômetro (em local desobstruído adiante ao norte verdadeiro em relação aos demais equipamentos) e 1 anemômetro digital ultrassônico (em local desobstruído acima de todos os demais equipamentos), a aproximadamente 7,5m do solo, onde foram coletados os dados utilizados para calibração do modelo de simulação.



Figuras 1A, 1B, 1C e 1D (da esquerda para a direita) – Subponto inferior (A) com o corpo da Estação Científica *Campbell* (C), incluindo painel solar fotovoltaico (B), e um *Hobo* (D) (NOVAES, 2020)



Figuras 2A, 2B, 2C e 2D (da esquerda para a direita) – Subponto da laje de cobertura com equipamentos da Estação Científica *Campbell* (B), incluindo anemômetro (C) e piranômetro (A), e um *Hobo* (D) (NOVAES, 2020)

Durante o período de medição, na laje de cobertura, a *Tar* variou entre 13,4°C e 37,6°C, com a maioria dos dias ultrapassando 30°C. A *UR* variou entre 17,0% e 96,3%, com valores acima de 70% na maior parte das noites e abaixo dos 30% em diversos dias. A *Var* variou entre 0,0m/s e 6,5m/s, sendo que, em cerca de 80% do tempo, foi de até 2,0m/s. Em concordância com o IAG/USP (2018), os ventos predominantes advêm da direção SE, representando 24% do tempo de medição.

3.2. CALIBRAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO PARA AS SIMULAÇÕES

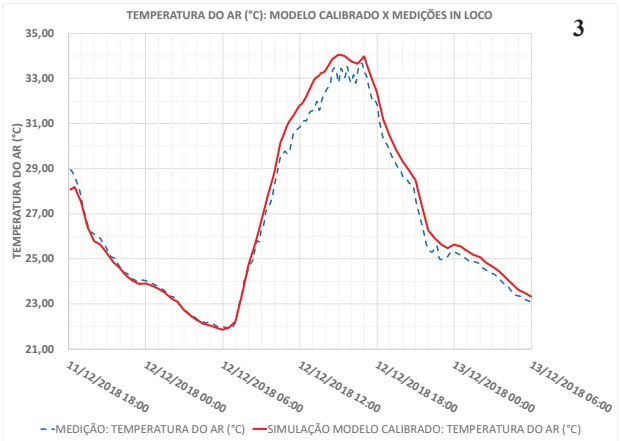
Foi escolhido o dia 12/12/2018 como objeto de avaliação, pois foi o dia que apresentou condição meteorológica mais estável, predominantemente ensolarado e com pouca incidência de nuvens, sendo o quarto dia consecutivo sem precipitação, com *Tar* de 22°C a 35°C e *UR* de 20% a 68%, caracterizando um dia seco com altas temperaturas. O vento predominante foi advindo da direção Sudeste, sendo verificada a direção 138,7° (sudeste) como predominante, e a velocidade média ponderada dos ventos foi de 1,5m/s.

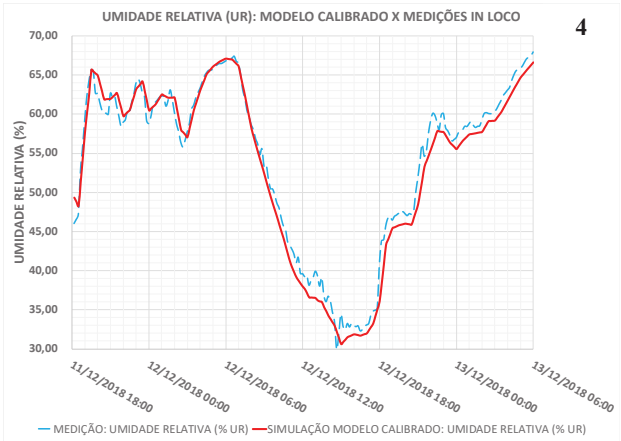
As medições aferidas pelos equipamentos na laje de cobertura foram utilizadas para a calibração do modelo climático do *ENVI-met*, enquanto que as medições da laje inferior foram utilizadas para análise comparativa. Foram também obtidos os dados de medições climáticas para este período das estações meteorológicas do IAG/USP na Cidade Universitária (Zona Oeste de São Paulo) e Água Funda no Parque do Estado (Zona Sul de São Paulo). A calibração do *software ENVI-met* foi realizada através de sucessivas simulações de um recorte do bairro Mirandópolis, com características volumétricas e espaciais modeladas como no local real onde foram realizadas as medições, com o ajuste dos dados do *software*, comparando os resultados obtidos nos modelos com os dados medidos para o mesmo ponto onde se realizaram as medições.

O modelo climático calibrado utiliza o arquivo climático do Aeroporto de Congonhas como base para o clima anual de São Paulo, substituindo os dados entre 09/12 às 00h00 e 14/12 às 06h00 pelos dados: *Tar* e *UR* em intervalos de 30 minutos conforme medições empíricas; direção do vento 138,7° (Sudeste) e *Var* de 2,2m/s na borda para obter 1,5m/s no ponto de medições, conforme medições empíricas; e nebulosidade registrada com intervalos de 60 minutos pela Estação Meteorológica da Água Funda (Parque do Estado).

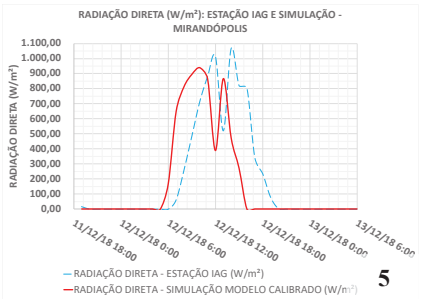
O período de análise de resultados é um ciclo de 24 horas entre às 6h do dia 12/12 e às 6h do dia 13/12 e, para a adequada estabilização dos modelos e para não haver influências da inicialização do modelo, adotou-se período de simulação de 36 horas com início às 18h00 do dia 11/12, isto é, com 12 horas de antecedência da inicialização da simulação com relação ao início do período estudado.

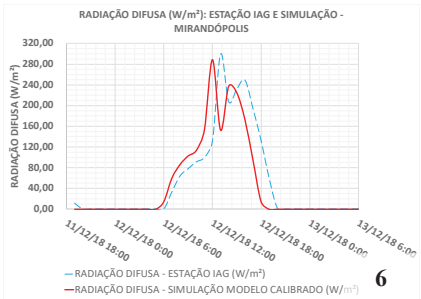
O modelo final calibrado apresentou aderência às medições, com diferenças máximas de 1,5°C (4,9%) para a *Tar* (Figura 3), de 5,4% (12,4%) para a *UR* (Figura 4), de 0,1m/s (7,7%) para a *Var*, e de 0,4° (0,3%), para a direção do vento. Como pode ser visto nos Figuras 5, 6 e 7, foi realizada uma comparação entre os registros de radiação (direta, difusa e de onda longa) entre o ponto de calibração no modelo de simulação e os dados registrados pela Estação Meteorológica do IAG para o mesmo período, tendo sido aprovado em função da apresentação de curvas de mesmo aspecto e pequenas diferenças de valores máximos e mínimos registrados. Assim, o modelo foi considerado adequado para a realização das simulações. Verificou-se uma leve tendência de supervalorizar o efeito de aquecimento diurno e queda de *UR*.

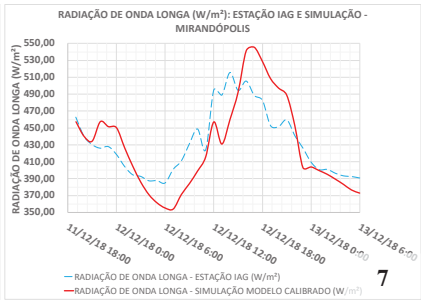




Figuras 3 e 4 (da esquerda para a direita) – *Tar* (3) e *UR* (4) no modelo calibrado (vermelho) e medições (azul) (NOVAES, 2020)







Figuras 5, 6 e7 da esquerda para a direita) – Radiação direta (5), radiação difusa (6) e radiação de onda longa (7) no modelo calibrado (vermelho) e na Estação do IAG (azul) (NOVAES, 2020)

3.3. MODELOS URBANOS SIMULADOS

Foram executadas as simulações de 5 modelos representativos de bairros de São Paulo, adotando o mesmo arquivo climático, isto é, submetidos às mesmas condições microclimáticas em seus limites externos. Para assegurar a comparabilidade entre os modelos e que as diferenças de resultados decorressem exclusivamente

das diferenças morfológicas, todos os modelos possuem as mesmas características, variando somente os aspectos morfológicos, adotando as premissas: mesmos materiais para as superfícies de calçadas, de vias e de solo e para as fachadas de edifícios e coberturas; sem topografia, e, para manter maior verossimilhança, foram selecionadas áreas aproximadamente planas; georreferenciados à cidade de São Paulo; sem vegetação, evitando assim impactos microclimáticos ligados à permeabilidade do solo ou à vegetação; com condições mínimas de nebulosidade, conforme dia escolhido para análise, que apresentou céu limpo.

As geometrias dos modelos, com áreas de edificações de 400x400m, envoltas em superfícies de 500x500m, com altura total superior ao dobro do edifício mais alto, reproduzem os traçados viários e massas edificadas reais conforme Mapa Digital da Cidade (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2019). Adotaram asfalto comum como superfície do leito carroçável das vias e o pavimento de concreto "sujo" para as calçadas e interior de quadras (GUSSON, 2014) e o solo argiloso-arenoso, representativo da cidade de São Paulo (SHINZATO, 2014). Para todas as edificações, foram adotadas paredes de fachadas de alvenaria de blocos de concreto e coberturas de laje de concreto impermeabilizada.

As áreas escolhidas são regiões no centro expandido de São Paulo (Ipiranga, Itaim Bibi, Mirandópolis, Moema e República), conforme Figuras 8 a 12, selecionadas entre áreas urbanas consolidadas de ocupação regular densamente construídas, com uso misto, topografia aproximadamente plana, variando de baixa verticalização a grande verticalização e entre edifícios espaçados entre si e edifícios geminados, distantes de corpos d'água, sem significativas áreas vegetadas, e com relações similares de superfícies de piso.



Figuras 8, 9, 10, 11 e 12 - Da esquerda para a direita e de cima para baixo, fotos aéreas das regiões dos modelos de Mirandópolis (8), Ipiranga (9), Moema (10), Itaim Bibi (11) e República (12) (NOVAES, 2020). Fotos extraídas pelo Google Earth.

Foram utilizados para caracterizar as geometrias dos modelos: a altura média das edificações, a distribuição estatística da área edificada por faixas de altura e área de projeção, o desvio padrão das alturas dos edifícios, a Taxa de Ocupação (*TO*), a volumetria construída, o Coeficiente de Aproveitamento (CA) estimado, o fator *H/W* (razão entre altura das edificações e largura das vias do cânion urbano), o Fator de Visão de Céu (*FVC*), e o índice *H/Aproj* (razão entre altura e área de projeção da edificação) para caracterizar a ocupação em termos de edificações mais verticalizadas ou mais horizontais, além da orientação das vias, impactante na condução dos ventos, e o acesso à luz do sol nas vias à altura do pedestre.

O modelo de menor adensamento foi a área no Mirandópolis, sem verticalização significativa, com poucas torres residenciais em meio às casas e sobrados, formando um bairro com muitas edificações baixas e de pequenas dimensões. Trata-se de um trecho razoavelmente plano, com quadras retangulares, trapezoidais e triangulares e vias orientadas aproximadamente nas direções Sudoeste-Nordeste e Sudeste-Noroeste. Com *TO* de 56,7% e *FVC* entre 0,5 e 0,9 nas vias, os edifícios, na maior parte casas, sobrados e pequenos estabelecimentos comerciais têm, em sua maioria, área de projeção entre 100m² e 200m² e baixa variabilidade de alturas, com média de 5,2m e desvio padrão de 4,3m.

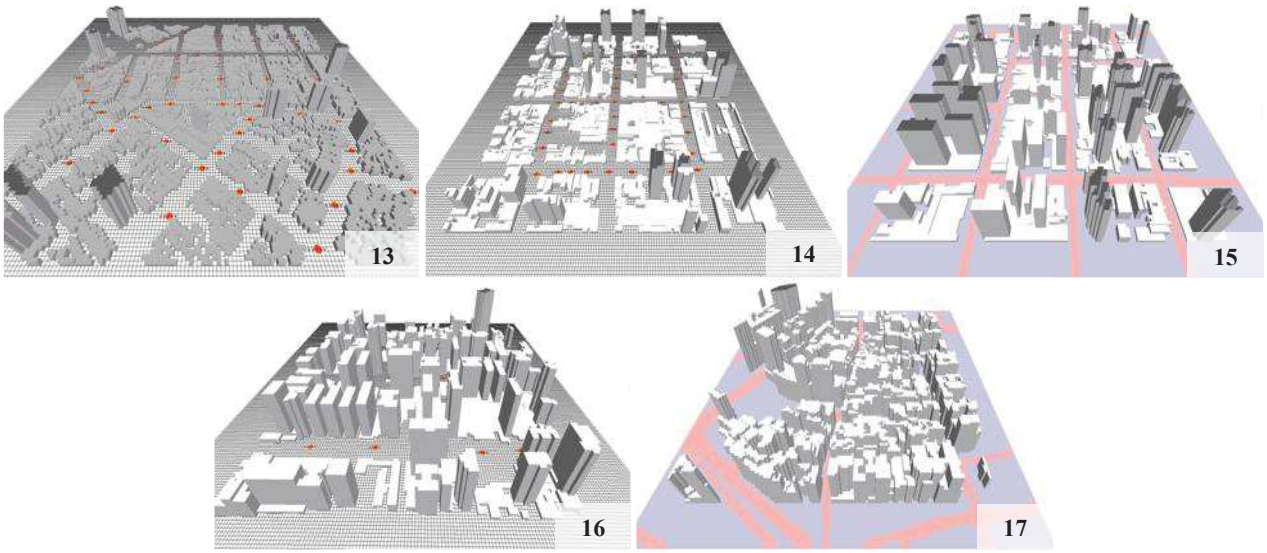
O segundo modelo, com adensamento leve e razoável verticalização, é uma área do Ipiranga, com muitas edificações baixas, como casas e sobrados geminados, permeados por várias novas torres residenciais médias e altas com recuos laterais e frontais e vários pequenos estabelecimentos de comércio de bairro, com alguns poucos galpões de indústrias, mercados de atacado e lojas de fábrica. Trata-se de uma região plana, com traçado viário quadrangular e vias orientadas nas direções Norte-Sul e Leste-Oeste. Com *TO* de 64,1% e *FVC* entre 0,3 e 0,8 nas vias, as alturas das edificações chegam a 76m, mas com uma altura média de 10m e desvio padrão de 13,7m, isto é, com mediana variabilidade das alturas das edificações. Há muitas edificações com alturas de até 10m e áreas de projeção de até 200m² (casas e sobrados), mas também diversas edificações com 30m a 70m de altura e área de projeção de até 300m² (torres residenciais).

O terceiro modelo se trata de área em Moema, mesclando intensa verticalização com a presença ainda marcante de edificações mais baixas como casas, sobrados e estabelecimentos comerciais. Trata-se de uma região muito plana, com quadras, em sua maioria, retangulares e algumas quadras trapezoidais e triangulares. Neste trecho do bairro, as vias estão, em sua maioria, orientadas aproximadamente nas direções Sudoeste-Nordeste e Sudeste-Noroeste. Com *TO* de 66,7% e *FVC* variando entre 0,3 e 0,8 nas vias, as áreas de projeções dos edifícios têm uma média de 356,7m² e as alturas chegam a 74m, com uma média de 17m e desvio padrão de 21m, isto é, com grande variabilidade das alturas. Há muitos edifícios de alturas de até 10m com diversas áreas de projeção, como casas, sobrados, estabelecimentos comerciais, etc., e de edifícios entre 30 e 60m de altura com áreas de projeção entre 200 e 500m², como torres de médio porte.

Como o segundo modelo mais adensado, o Itaim Bibi se trata de uma área verticalizada quase em sua totalidade, com torres marcadas por grande proximidade lateral e alinhamento frontal, formando cânions urbanos. Com muitas torres residenciais e comerciais altas, permeadas por algumas edificações mais baixas remanescentes e pelos embasamentos baixos e mais largos das torres. Trata-se de região com quadras em sua maioria retangulares e vias orientadas na direção Sudoeste-Nordeste. Com *TO* de 54,3% e *FVC* entre 0,2 e 0,6 nas vias, as áreas de projeções dos edifícios têm uma média de 313,5m² (torre), e as edificações têm altura que chegam a 89m, com uma altura média de 19m e desvio padrão de 20,4m, isto é, há uma relativa variabilidade das alturas marcada pelas diferenças entre as torres e seus embasamentos. Há diversos edifícios com até 10m de alturas e até 500m² de área de projeção (estabelecimentos comerciais, embasamentos das torres, etc.) e muitas edificações com 30m a 70m de altura com área de projeção de 200m² a 800m² (torres).

O modelo mais adensado se trata de área no bairro República, região muito verticalizada, com diversos edifícios altos geminados e sem recuos frontais ou laterais, criando cânions urbanos, com algumas torres residenciais e comerciais de grande altura, como o Edifício Copan e o Edifício Itália. Trata-se de uma região plana, com traçado viário irregular, com vias de diversos portes, orientadas aproximadamente nas direções Sudoeste-Nordeste e Sudeste-Noroeste. Com *TO* de 59,8% e *FVC* variando entre 0,1 e 0,6, sendo entre 0,1 e 0,3, na maior parte das vias, as áreas de projeção dos edifícios têm uma média de 213,7m² e alturas que chegam a 125m, com uma média de 37m e desvio padrão de 18,4m, isto é, há razoável variabilidade das alturas. Há muitos edifícios com alturas de até 20m e áreas de projeção de até 200m² e vários entre 30 e 60m de altura com áreas de projeção de até 200m², correspondendo ao perfil típico da região de edifícios de média altura com pequenas dimensões em planta.

As Figuras 13 a 17 apresenta os modelos geométricos construídos para as simulações.



Figuras 13, 14, 15, 16 e 17 - Da esquerda para a direita e de cima para baixo, modelos de Mirandópolis (13), Ipiranga (14), Moema (15), Itaim Bibi (16) e República (17) (NOVAES, 2020)

A Taxa de Ocupação (*TO*) é similar entre os modelos, variando de 54% (Itaim Bibi) a 67% (Moema), assim como a área ocupada por vias de asfalto nas superfícies dos modelos, de aproximadamente 15% em todos os modelos. A altura média das edificações expôs a gradação de volumetria construída: República > Itaim Bibi > Moema > Ipiranga > Mirandópolis, e o desvio padrão das alturas expressou a variabilidade das alturas dos edifícios: quanto maior o desvio padrão, maior a variabilidade de alturas, com a seguinte gradação: Moema > Itaim Bibi > República > Ipiranga > Mirandópolis. Apesar de os modelos se assemelharem em termos de *TO* e área de vias, diferem em volumetria construída, quantidades, tipologias, dimensões e distribuições de edifícios. Neste sentido, o estudo dos fatores *H/W*, *H/Aproj* e do *FVC* permite caracterizar os modelos de forma qualitativa e quanto à exposição ao céu e acesso à luz solar. O *H/W* marcou de forma muito evidente o modelo de Mirandópolis por sua baixa verticalização, enquanto o *FVC* denotou como os modelos de Mirandópolis e Ipiranga oferecem muito maior exposição ao céu em seus diversos pontos, enquanto que o modelo da República oferece grande obstrução e mascaramento de céu e, de forma mediana, Itaim Bibi e Moema apresentam grande variabilidade entre trechos expostos e trechos mascarados nas vias.

4. RESULTADOS

Foram extraídos mapas com a distribuição a 1,50m de altura (escala do pedestre) de dados de Temperatura do Ar (*Tar*), Umidade Relativa (*UR*), Velocidade do Vento (*Var*), direção do vento, radiação (direta, difusa e de onda longa) e Temperatura Radiante Média (*TRM*). Também foram extraídos gráficos de resultados no ponto do cruzamento mais central de vias de cada modelo, também a 1,50m de altura, para as mesmas variáveis e também para a Temperatura Equivalente Percebida (*TEP*). Em sinergia com os estudos apresentados, as simulações permitiram verificar que a morfologia urbana é capaz de alterar o balanço térmico dos espaços urbanos abertos e a quantidade de radiação recebida pelos diferentes pontos, inclusive no período noturno, alterando também a velocidade de passagem dos ventos, as variáveis térmicas e os índices de conforto térmico.

Conforme Figura 18, durante o dia, houve uma diferença máxima de *Tar* de aproximadamente 1,5°C entre os pontos centrais dos modelos menos e mais adensados. Os modelos com menor verticalização, menor volume construído e maiores valores de *FVC* (Mirandópolis e Ipiranga) foram os que apresentaram os maiores valores de *Tar* do período diurno, pois os espaços abertos são mais expostos à insolação direta, permitindo o maior aquecimento de superfícies, enquanto o modelo mais adensado (República) apresentou a menor *Tar* durante o dia, por sua configuração de cânion urbano, ocasionando maior sombreamento dos espaços urbanos abertos. À noite, os modelos mais verticalizados e com maior volumetria construtiva (Itaim Bibi e República) apresentaram os maiores valores de *Tar*, o que se deve principalmente ao maior acúmulo de calor nas massas construídas, à emissão de radiação de onda longa pelas massas construídas, liberando o calor acumulado durante o dia, e ao aprisionamento de calor pela reflexão de radiação no cânion urbano.

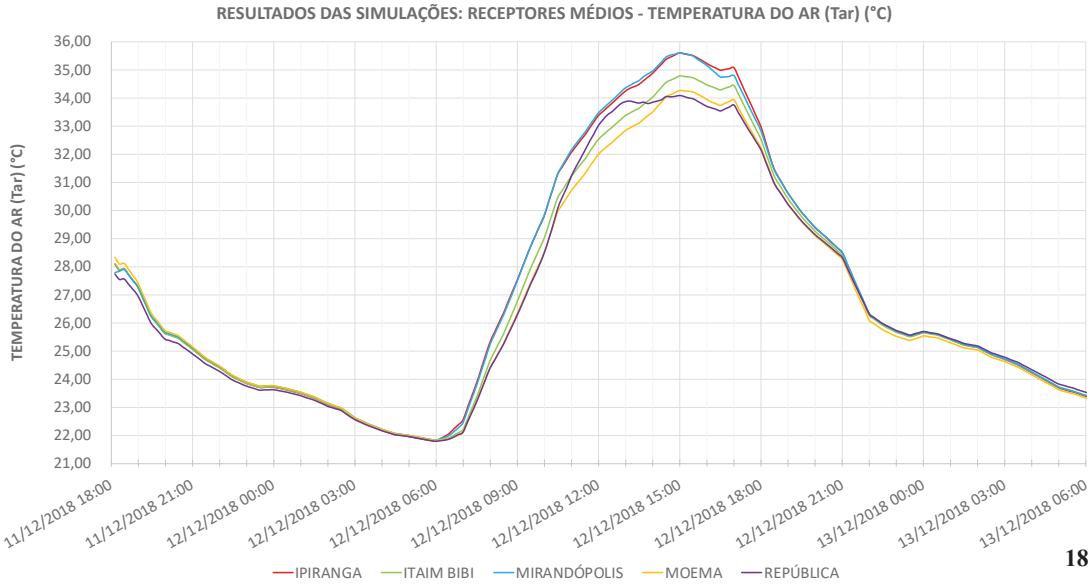


Figura 18 – Resultados de *Tar* nos pontos médios dos modelos de simulação para cada modelo: Ipiranga (vermelho), Itaim Bibi (verde), Mirandópolis (azul), Moema (amarelo) e República (roxo) (NOVAES, 2020)

Quanto menos adensados os modelos (Mirandópolis e Ipiranga), maior e mais rápido o aumento de *Tar* durante o dia, devido à maior exposição à radiação direta, e, maior e mais rápida perda de *Tar* durante a noite,

devido à menor emissão de radiação de onda longa pela menor quantidade de calor acumulado pelas massas construídas. Com isso, as diferenças de resposta entre os modelos também dizem respeito às diferentes condições de exposição à insolação, do sombreamento e da radiação emitida pelas edificações, analisadas sob a ótica da *TRM*, cuja diferença máxima chega a 2,2°C entre os modelos. Mesmo dentro dos modelos houve grandes diferenças entre os diferentes espaços, pois a maior variabilidade de alturas (Moema e Itaim Bibi) também ocasionou condições diferenciais de sombreamento e exposição ao sol em diferentes horários nos diferentes espaços. No modelo de Moema, com maior variabilidade de alturas, em alguns horários, a diferença de *Tar* entre diferentes trechos chegou a 3,3°C (Moema), conforme Figura 19.

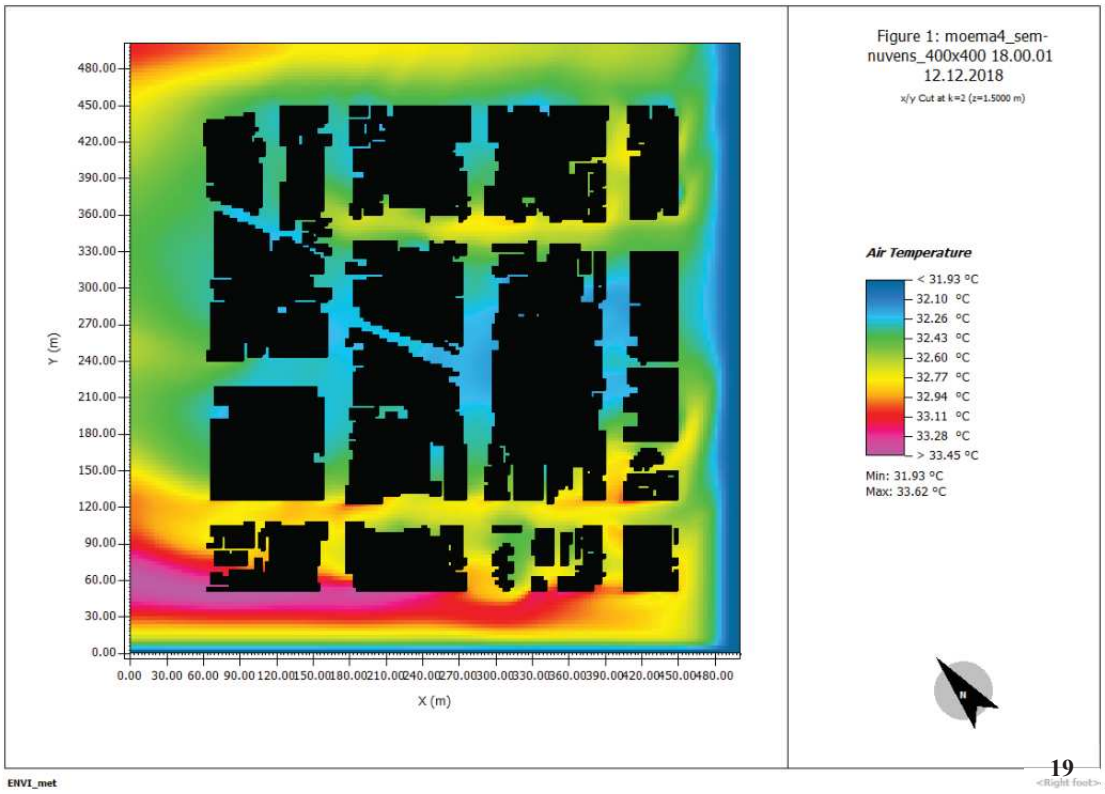


Figura 19 – Resultado de *Tar* da simulação de Moema no dia 12/12/2018 às 18h (NOVAES, 2020)

É natural ainda que o posicionamento e a geometria das edificações alterem as direções e as velocidades de circulação dos ventos, e, neste caso, os modelos com maiores espaçamentos entre edificações e maiores variabilidades de alturas foram os mais suscetíveis e permissivos à circulação dos ventos, sendo que a orientação de vias nos sentidos norte-sul e leste-oeste formando quadras quadrangulares (Ipiranga) foi a que apresentou melhor desempenho do ponto de vista de permeabilidade à circulação dos ventos advindos de sudeste, permitindo melhor distribuição e maior velocidade dos ventos nas vias. A variabilidade de alturas também cria condições diferenciais de ventos entre os edifícios dentro dos modelos, portanto, os modelos com maiores espaçamentos entre edificações e com maiores variabilidades de alturas (Ipiranga e Moema) foram os mais permissivos à circulação dos ventos entre os espaços, as vias e as edificações.

A boa circulação dos ventos tornou o ambiente mais suscetível às variações térmicas, o que auxilia na retirada de calor e, por consequência, no período noturno, traz condições mais amenas. Além disso, quando há valores amenos de *Tar*, a circulação do vento impacta de forma positiva na *TEP*, reduzindo os seus valores. A variabilidade de alturas e a formação de cânions urbanos também mostrou uma tendência de impacto benéfico de redução da *TEP* no período diurno, o que se associa aos sombreamentos ocasionados pelos edifícios.

Há uma diferença de até 2,5°C nos valores de *TEP* entre os pontos centrais dos modelos, sendo que, com exceção da República (na maior parte do tempo com as vias sombreadas), o Ipiranga foi o modelo que apresentou melhor desempenho quanto à *TEP*, o que entende-se que se associa principalmente à distribuição das edificações e razoável variabilidade de alturas, que permitiram uma alternância nas condições de insolação e sombreamento, e ao traçado regular de vias norte-sul e leste-oeste permitindo melhor circulação dos ventos advindos de sudeste para a retirada de calor.

O Quadro 1 resume de forma qualitativa os resultados encontrados, com uma síntese de aspectos morfológicos urbanos estudados e seus efeitos microclimáticos evidenciados pelas simulações.

ASPECTO MORGOLÓFICO	AUMENTO OU REDUÇÃO	PARÂMETROS URBANÍSTICOS ASSOCIADOS	EFEITOS IDENTIFICADOS
VOLUMETRIA E DENSIDADE CONSTRUÍDA	↑	Área Construída (↑) CA (↑) TO (↑) Volume Construído (↑) FVC (↓) Fator H/W (↓)	Menor suscetibilidade às variações térmicas diárias, menor amplitude térmica
			Maior quantidade de espaços sombreados, menor quantidade de radiação solar direta nos espaços
			Maior quantidade de radiação emitida pelas superfícies e edificações (onda longa) no período noturno, maior acúmulo de calor pelas massas construídas.
			Menor permeabilidade à passagem dos ventos, menores velocidades
			Menores valores de Tar, TRM, radiação e TEP no período diurno
			Maiores valores Tar, TRM, radiação e TEP no período noturno
	↓	FVC (↑) Fator H/W (↑) Área Construída (↓) CA (↓) TO (↓) Volume Construído (↓)	Maior suscetibilidade às variações térmicas diárias, com maior amplitude térmica
			Maior quantidade de espaços expostos ao céu e ao sol, com maior quantidade de radiação solar direta nos espaços
			Menor quantidade de radiação emitida pelas superfícies e edificações (onda longa) no período noturno
			Maior permeabilidade à passagem dos ventos, com maiores velocidades
			Maiores valores de Tar, TRM, radiação e TEP no período diurno
			Menores valores de Tar, TRM, radiação e TEP no período noturno
VERTICALIZAÇÃO	↑	Altura máxima dos edifícios (↑) Altura média dos edifícios (↑) Fator H/Aproj (↑) Fator H/W (↑) Perfil de áreas de projeção (↓)	Aumento do sombreamento sobre os espaços urbanos abertos
			Maior heterogeneidade de condições de Tar, insolação e radiação
			Maior efeito de cânion urbano, com efeitos de canalização de ventos, aprisionamento de calor, etc.
			Criação de zonas de alta e baixa pressão que beneficiam a circulação diferencial de ventos entre os espaços, que auxilia a retirada de calor
			Sombreamento dos edifícios uns sobre os outros
	↓	Perfil de áreas de projeção (↑) Altura máxima dos edifícios (↓) Altura média dos edifícios (↓) Fator H/Aproj (↓) Fator H/W (↓)	Aumento das áreas com acesso desobstruído ao sol e ao céu
			Maior homogeneidade de condições de Tar, insolação e radiação
			Maiores velocidades de ventos a menores alturas
			Menos obstáculos à passagem dos ventos e ao acesso ao sol
			Maior insolação generalizada dos espaços abertos, das coberturas e fachadas das edificações
VARIABILIDADE DE ALTURAS DAS EDIFICAÇÕES	↑	Desvio padrão das alturas (↑) Perfil de alturas dos edifícios (-)	Criação de áreas de insolação e áreas de sombreamento nos diferentes espaços urbanos
			Maior heterogeneidade de condições de Tar, insolação e radiação
			Redução dos efeitos de cânion urbano, reduzindo efeitos de canalização de ventos, aprisionamento de calor, etc.
			Criação de zonas de alta e baixa pressão que beneficiam a circulação diferencial de ventos entre os espaços, que auxilia a retirada de calor
	↓	Perfil de alturas dos edifícios (-) Desvio padrão das alturas (↓)	Padronização da condição de insolação e sombreamento dos espaços, seja para a insolação, seja para o sombreamento
			Maior homogeneidade de condições de Tar, insolação e radiação
			Em caso de edificações altas, maximização dos efeitos de cânions urbanos
			Circulação mais rápida dos ventos, que pouco variam de direção, altura e velocidade, passando sobre as edificações ou entre as mesmas, reduzindo a capacidade de retirada de carga térmica
LARGURAS DAS VIAS E AFASTAMENTO DAS EDIFICAÇÕES	↑	FVC (↑) Recuos (↑) Fator H/W (↓) Alinhamento frontal (↓)	Criação de áreas de insolação e áreas de sombreamento nos diferentes espaços urbanos
			Maior heterogeneidade de condições de Tar, insolação e radiação, majoritariamente maiores no período diurno e menores no período noturno
			Redução dos efeitos de cânion urbano, reduzindo efeitos de canalização de ventos, aprisionamento de calor, etc.
			Maior permissividade à circulação dos ventos advindos de quaisquer direções, maximizando a retirada de carga térmica
			Criação de zonas de alta e baixa pressão que beneficiam a circulação diferencial de ventos entre os espaços, que auxilia a retirada de calor
	↓	Fator H/W (↑) Alinhamento frontal (↑) FVC (↓) Recuos (↓)	Maior sombreamento dos espaços urbanos abertos
			Maior homogeneidade de condições de Tar, insolação e radiação, majoritariamente mais baixas no período diurno e mais altas no período noturno
			Em caso de edificações altas, maximização dos efeitos de cânions urbanos
			Circulação mais rápida dos ventos, que pouco variam de direção, canalizados nos cânions urbanos, com maior probabilidade de gerar velocidades de ventos que causem desconforto

Quadro 1- Resumo de aspectos morfológicos urbanos e seus efeitos microclimáticos (NOVAES, 2020)

5. CONCLUSÕES

Os estudos deste trabalho corroboram resultados encontrados em pesquisas da área, visto que, assim como identificado por TALEGHANI, KLEEREKOPER, et al. (2015), KRÜGER e MINELLA (2015) e SHARMIN, STEEMERS e MATZARAKIS (2017), verificou-se que diferentes modelos morfológicos da cidade podem impactar de formas diversas nas condições térmicas dos espaços urbanos abertos. As condições morfológicas

do espaço urbano podem alterar as quantidades de radiação direta, difusa e refletida recebidas pelos espaços, a velocidade de passagem dos ventos nos espaços e, por consequência, a Temperatura do Ar (*Tar*), a Temperatura Radiante Média (*TRM*), a Umidade Relativa (*UR*) e consequentemente os índices de conforto térmico e a demanda sobre os sistemas de climatização artificial dos edifícios.

Os modelos com menor verticalização, menor volume construído e maiores valores de Fator de Visão de Céu (*FVC*) apresentaram maiores valores de Temperatura do Ar no período diurno, com um aquecimento que ocorre de forma mais rápida pois os espaços abertos são mais expostos à insolação e, no período noturno, os modelos mais verticalizados e adensados apresentaram as maiores temperaturas, devido ao maior acúmulo de calor nas massas construídas e ao aprisionamento de calor pela reflexão de radiação no cânion urbano.

As conclusões encontradas podem auxiliar na composição de diretrizes de planejamento urbano (parâmetros urbanísticos, códigos de edificações e regulamentações), embasando medidas que possam contribuir para cidades com melhores condições térmicas para os espaços abertos e edifícios, e mais resilientes aos cenários de agravamento dos fenômenos de aquecimento urbano e mudança climática global.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, F. P.; TANGARI, V. *Estudo Tipológico sobre a Forma Urbana - Conceitos e Aplicações*. Paisagem Ambiente - Ensaios, São Paulo, n. 22, 2006. 61-73.

GARTLAND, L. *Ilhas de Calor - Como mitigar zonas de calor em áreas urbanas*. Tradução de Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. ISBN ISBN 978-85-86238-99-4.

GUSSON, C. D. 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*. São Paulo: Dissertação de Mestrado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP), 2014.

IAG/USP. *Boletim Climatológico Anual da Estação Meteorológica do IAG/USP - 2017*. São Paulo: Seção Técnica de Serviços Meteorológicos do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, 2018.

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, Colombo, 51, 2006. 119-133.

LAMAS, J. *Morfologia Urbana e Desenho da Cidade*. Porto: Fundação Calouste Gulbenkian e Fundação para a Ciência e a Tecnologia, 2004.

MINELLA, F. O.; KRÜGER, E. L. *Impactos na Geometria Urbana no Microclima*. ReserchGate, Curitiba, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/265750178_IMPAC*TO*S_DA_GEOMETRIA_*UR*BANA_NO_MICROCLIMA>. Acesso em: 24 agosto 2019.

MONTEIRO, L. M. *Conforto Térmico em Espaços Urbanos Abertos - Verificações Modelares como Aportes à Exploração de Abordagens*. São Paulo: Tese de Livre-Docência. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP), 2018.

NOVAES, G. B. A. *Impactos da Morfologia da Cidade nas Condições Microclimáticas de Áreas Urbanas Consolidads de São Paulo em Dias Quentes*. São Paulo: Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP), 2020.

OKE, T. *Urban heat islands - an overview of the research and its implications*. North American Heat Islands Summit. [S.l.]: North American Heat Islands Summit. 2002.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. *GeoSampa Mapa - Sistema de Consulta do Mapa Digital da Cidade de São Paulo, 2019*. Disponível em: <http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx>. Acesso em: 19 agosto 2019.

SHARMIN, T.; STEEMERS, K.; MATZARAKIS, A. *Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment*. Elsevier - Sustainable Cities and Society, 34, 2017. 293-308.

SHASHUA-BAR, L.; TZAMIR, Y.; HOFFMAN, M. E. *Thermal Effects of Building Geometry and Spacing on the Urban Canopy Layer Microclimate in a Hot-Humid Climate in Summer*. International Journal of Climatology, 24, 2004. 1729–1742.

SHINZATO, P. *Impacto da Vegetação nos Microclimas Urbanos em Função das Interações Solo-Vegetação-Atmosfera*. São Paulo: Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP), 2014. 204 p.

TALEGHANI, M. et al. *Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands*. Elsevier - Building and Environment, Delft, 83, 2015. 65-78.

AGRADECIMEN*TO*S

Agradeço à Seção Técnica de Serviços Meteorológicos do IAG/USP e ao Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG/USP, pelo fornecimento de dados das medições meteorológicas das estações Água Funda, no Parque do Estado, e IAG USP, na Cidade Universitária. Também agradeço ao LABAUT FAU USP, pelo empréstimo e manuseio dos equipamentos de medição utilizados.