AVALIAÇÃO DA ILHA DE CALOR PARA DIFERENTES VARIAÇÕES DE TIPOLOGIA EM ÁREA DE EIXO DE TRANSFORMAÇÃO URBANA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

Carolina Girotti (1); Alessandra Rodrigues Prata Shimomura (2)
(1) Doutoranda de Arquitetura e Urbanismo, carol.girotti@gmail.com, Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT), Rua do Lago 876, São Paulo – SP, 05508-080, Tel.: (11) 97633-3611
(2) Professora Dra., arprata@usp.br, Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT), Rua do Lago 876, São Paulo – SP, 05508-080, Tel.: (11) 3091-4571

RESUMO
O ambiente construído e a tipologia urbana das edificações afetam diretamente o microclima e o conforto térmico das cidades. Sendo assim, esse estudo tem por objetivo analisar a ilha de calor urbano, através da diferença de temperatura do ar, em quatro diferentes cenários de estudo, compostos pela morfologia urbana atual da área de estudo e três diferentes tipologias urbanas: horizontal, perimetral e semiaberta, no bairro do Belenzinho, no município de São Paulo. A metodologia de pesquisa do trabalho consiste em um estudo de caso e simulação paramétrica, realizada através da ferramenta *Grasshopper*® e do *plug-in Dragonfly*®. Entre os resultados encontrados, o maior valor de temperatura do ar acontece na tipologia perimetral, pois essa permite maior adensamento construído. O menor valor de temperatura do ar acontece na tipologia semiaberta, pois, além de permitir menor adensamento construído é a que possui maior concentração de área verde.

Palavras-chave: ilha calor urbano; avaliação temperatura do ar; morfologia urbana; tipologia urbana; simulação computacional paramétrica.

ABSTRACT
The built environment and the block typology directly affect the urban microclimate and their thermal comfort. Therefore, this study aims to evaluate the effect of urban heat island, specifically the temperature difference of the air temperature, in four different study scenarios, composed of the current urban morphology of the study area and three different block typologies: horizontal, perimeter and semi-open, in the Belenzinho neighborhood, in São Paulo. The research methodology of the work consists of a case study and parametric simulation, through the Grasshopper® tool and the Dragonfly® plug-in. Among the results found, the highest air temperature values occur in the perimeter block typology, as it allows greater built density. The lowest air temperature values occur in the semi-open block typology, because, in addition to allowing less built density it is the one with the highest green area.

Keywords: urban heat island; air temperature evaluation; urban morphology; block typology; parametric computer simulation.

1. INTRODUÇÃO

Devido ao uso do solo altamente modificado e atividades intensivas, as cidades estão à frente da mais rápida mudança climática já experimentada pela humanidade. No entanto, o potencial das próprias cidades de mitigar a mudança climática e o microclima urbano estão subexplorados (SCHIANO-PHAN; WEBER; SANTAMOURIS, 2015).

Um dos fenômenos do microclima urbano mais estudado é a ilha de calor urbano (ICU), das quais existem variações do mesmo fenômeno, porém, basicamente ocorre quando há diferença de temperatura do ar entre o dossel rural e o urbano percebidas principalmente durante à noite (OKE, 1973, 1982).

A ICU é formada pelo calor diferencial do dossel urbano em função da fonte de energia na zona urbana/rural e a diferença da fonte de energia é devido ao calor liberado na combustão e à radiação absorvida pelos materiais de construção (OKE, 1973, 1982). Oke (1973) indica que nas cidades existe a relação entre a energia artificial com a densidade populacional e ambiente climático.

As características do ambiente construído afetam diretamente o microclima urbano. As mudanças no uso do solo, aumento da densidade construída e populacional estão afetando o microclima das cidades, resultado em um conforto térmico cada vez menos satisfatório para o pedestre e até mesmo para a edificação. No contexto do microclima urbano, existe a *Urban Canopy Layer* (UCL) que é a camada localizada entre o solo e o nível das coberturas das edificações. Na camada da UCL é medida a diferença da temperatura do ar entre a área urbana e aquela observada em um local próximo, fora da área urbana para análise da ICU(APREDA; REDER; MERCOGLIANO, 2020; FUTCHER; KERSHAW; MILLS, 2013).

O efeito ICU é percebido principalmente durante à noite. Durante o dia, a ICU é fraca e pode até mesmo ser negativa no dossel urbano, onde edifícios mais altos oferecem sombreamento e inibem o acesso solar, o que diminui o aquecimento. Assim, a influência da forma e função urbana no microclima estão ganhando espaço na literatura e destacam- se os parâmetros: altura das edificações (H), largura da rua (W), uso do solo, material das edificações e solo permeável (FUTCHER; KERSHAW; MILLS, 2013).

Além do impacto da forma urbana com o efeito ICU, também possui destaque na literatura a relação da densidade construída e densidade populacional com o efeito ICU. Os autores Ramírez-Aguilar e Lucas Souza (2019) demonstram como a densidade populacional e construída interferem na ICU em Bogotá, na Colômbia, e apontam que densidade populacional acima de 14.500 habitantes/km² resultam em um aumento de temperatura do ar de 1ºC. Isso se dá, principalmente pela diminuição de vegetação que o aumento da densidade populacional tradicionalmente ocasiona.

Sobre o impacto direto da tipologia com o efeito ICU, os autores Apreda, Reder e Mercogliano (2020) demostram que as áreas verdes são importantes para diminuir a temperatura do ar durante a noite, desta maneira, a forma das edificações afeta principalmente a direção dos ventos. O estudo dos autores Apreda, Reder e Mercogliano (2020) no mediterrâneo mostra que o aumento da temperatura noturna se deve à presença de edifícios com alta densidade construída e alta relação de H/W, o que permite que a radiação solar fique dentro do cânion urbano por mais tempo.

Sobre o impacto da área verde e o efeito ICU, os autores Santamouris e Osmond (2020) analisam 39 cidades e indicam que a vegetação possui impacto na diminuição de 1,8ºC na temperatura do ar diurna e 2,3ºC na temperatura noturna das cidades.

O estudo dos autores Futcher, Kershaw e Mills (2013) em cidades de latitude média, indica que um valor baixo de H/W é indicado para minimizar os efeitos da ICU. Os autores mostram que valores de H/W em torno de 0,6 e 1,0 são apropriados quando o objetivo é diminuir o efeito da ICU no meio urbano.

A forma urbana possui diferentes aspectos. O município de São Paulo possui uma tipologia urbana vertical, horizontal e vertical mesclada com horizontal, a qual é analisada basicamente através do coeficiente do aproveitamento (C.A.) e da taxa de ocupação (T.O.).

Outras tipologias dependem de outros fatores de análise. Como exemplo, a tipologia perimetral de Barcelona, que possui altura máxima das edificações e não C.A. como parâmetro urbanístico, além de classificação de uso para o miolo da quadra, que deve ser utilizado para uso pública e área verde e o tamanho da quadra também é estabelecido pelo *Plano Cerdà* (URBANO, 2016).

Já a tipologia semiaberta, observada em Berlim, também não possui C.A. como parâmetro urbanístico, possui a altura máxima das edificações, além da T.O. e área verde mínima como parâmetros urbanísticos (SANCHES, 2020).

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é analisar a ICU, através da diferença de temperatura do ar, em quatro diferentes cenários de estudo, compostos pela morfologia urbana atual da área de estudo e três diferentes tipologias

urbanas: horizontal, perimetral e semiaberta, no bairro do Belenzinho, que se encontra em processo de verticalização e adensamento no município de São Paulo avaliando, assim, como a tipologia urbana interfere na ICU.

3. MÉTODO

O trabalho utilizou a abordagem quantitativa como metodologia de pesquisa, através de um estudo de caso e simulação paramétrica.

3.1. Estudo de caso: Bairro Belenzinho

Para o estudo de caso, foi escolhido o bairro do Belenzinho no município de São Paulo, por compor os Eixos de Estruturação da Transformação Urbana (EETU) propostos no Plano Diretor Estratégico (PDE) do município de São Paulo, e por isso, pertencer em área estratégica em processo de adensamento e verticalização (PMSP, 2014).

A Figura 1 indica a localização do perímetro de estudo, seu parcelamento de acordo com a Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo do Município de São Paulo (PMSP, 2016) e o levantamento do uso e ocupação do solo, o qual possui predominantemente pequenos comércios e serviços.

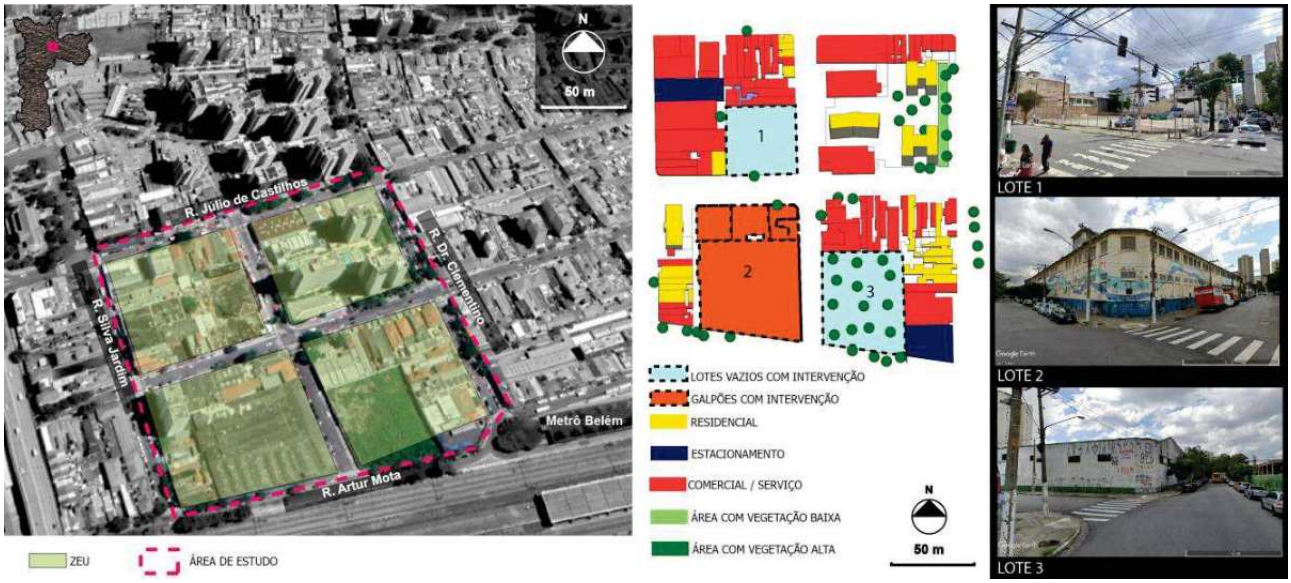


Figura 1 – Indicação do perímetro de estudo, parcelamento, uso e ocupação do solo e lotes de intervenção (Autoras).

A Figura 1 mostra os lotes com intervenção cujo critério de escolha dos lotes foi definido através de um levantamento do potencial de transformação da morfologia urbana em curto prazo. Desta forma, foram escolhidos os lotes vazios e com galpões, para modelagem da tipologia urbana, simulação e análise da ICU.

O processo metodológico ocorreu em quatro cenários, nos quais foram realizadas modelagem dos parâmetros urbanísticos e simulação da ICU. Os cenários foram definidos através de variações de tipologias urbanas existentes: (1) configuração urbana atual da área de estudo; (2) tipologia horizontal, existente em São Paulo; (3) tipologia perimetral, existente em Barcelona; (4) tipologia semiaberta, existente em Berlim. A Figura 2 ilustra os quatro cenários de estudo.

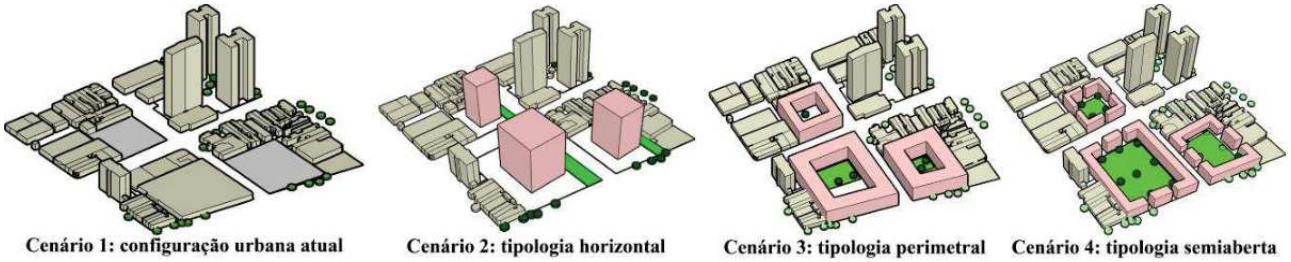


Figura 2 – Quatro cenários de estudo: configuração urbana atual, tipologia horizontal, tipologia perimetral e tipologia semiaberta (Autoras).

Os quatro cenários foram escolhidos pois é esperado comparar o efeito de diferentes tipologias na mudança de temperatura do ar e seu impacto na ICU, em uma situação próxima da realidade, por isso foram escolhidas tipologias já existentes em locais distintos.

Dessa forma, as tipologias possuem configurações distintas, tendo algumas, maiores valores de densidade construída e outras maior porcentagem de área verde. Os valores adotados na tipologia horizontal estão de acordo com o adotado no município de São Paulo (PMSP, 2014), os valores adotados na tipologia perimetral estão de acordo com o adotado no *Plano Cerdà* de Barcelona (URBANO, 2016) e os valores adotados na tipologia semiaberta estão de acordo com o adotado em Berlim (SANCHES, 2020).

Os parâmetros urbanísticos e climáticos adotados no trabalho são indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros urbanísticos e climáticos

Parâmetros urbanísticos	
Tipologia Horizontal	
T.O. máxima	0,70[1]
C.A. máxima	4[1]
Área verde	0,20[1]
Uso das edificações	térreo comercial - demais residencial
Tipologia Perimetral	
Altura máxima das edificações	21 m.
Área verde	1/2 do pátio interno
Uso das edificações	térreo comercial - demais residencial
Tipologia Semiaberta	
Altura máxima das edificações	18 m.
Área verde	0,45[1]
Uso das edificações	térreo comercial - demais residencial
Parâmetros climáticos	
Dado de entrada climático no *Dragonfly*®	São Paulo 837800 (IWEC).epw
Meses de simulação:	Anual e jan/fev
Materiais e uso das edificações atual: comercial	
Altura média das edificações	6 m.
Área construída	17.878 m^2
Área de fachada	21.530 m^2
Área de vidro	65%
Materiais e uso das edificações atual: residencial	
Altura média das edificações	20 m.
Área construída	45.778 m^2
Área de fachada	42.342 m^2
Área de vidro	18%
Materiais e uso das edificações atual: estacionamentos	
Altura média das edificações	6 m.
Área construída	23 m^2
Área de fachada	128 m^2
Área de vidro	0%
Albedo	
Áreas com vegetação	0,3
Áreas pavimentadas	0,2

O dado de saída da simulação é a temperatura do ar, especificamente, com base em temperatura de bulbo seco, obtido em graus Celsius (ºC).

3.2. Simulação paramétrica: *Grasshopper*® e *Dragonfly*®

A avaliação da ICU em conjunto com a tipologia urbana foi realizada através do programa de modelagem tridimensional *Rhinoceros*® 6 (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2021), junto com os *plug-ins Grasshopper*® (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2019) e *Dragonfly*® (SONG et al., 2020) seguindo as premissas:

- *Grasshopper*®: principal *plug-in* do *Rhinoceros*® é um editor algoritmo que permite uma programação com representação dinâmica de seus elementos (ANTON; TĂNASE, 2016).
- *Dragonfly*®: permite a simulação de fenômenos climáticos em larga escala, como a ICU, o que torna muitas variáveis climáticas acessíveis às interfaces CAD. O *Dragonfly*® usa os *solvers* do

[1] Os parâmetros urbanísticos, C.A., T.O. e porcentagem de área verde, foram aplicados em relação ao lote.

Urban Weather Generator (uwg), do *Ladybug*® (versão herdada) e do ENVI_MET® 4.4.4 (SONG *et al.*, 2020).

A visão esquematizada das etapas de programação desenvolvida no Grasshopper® é apresentada pelo fluxograma da Figura 3.

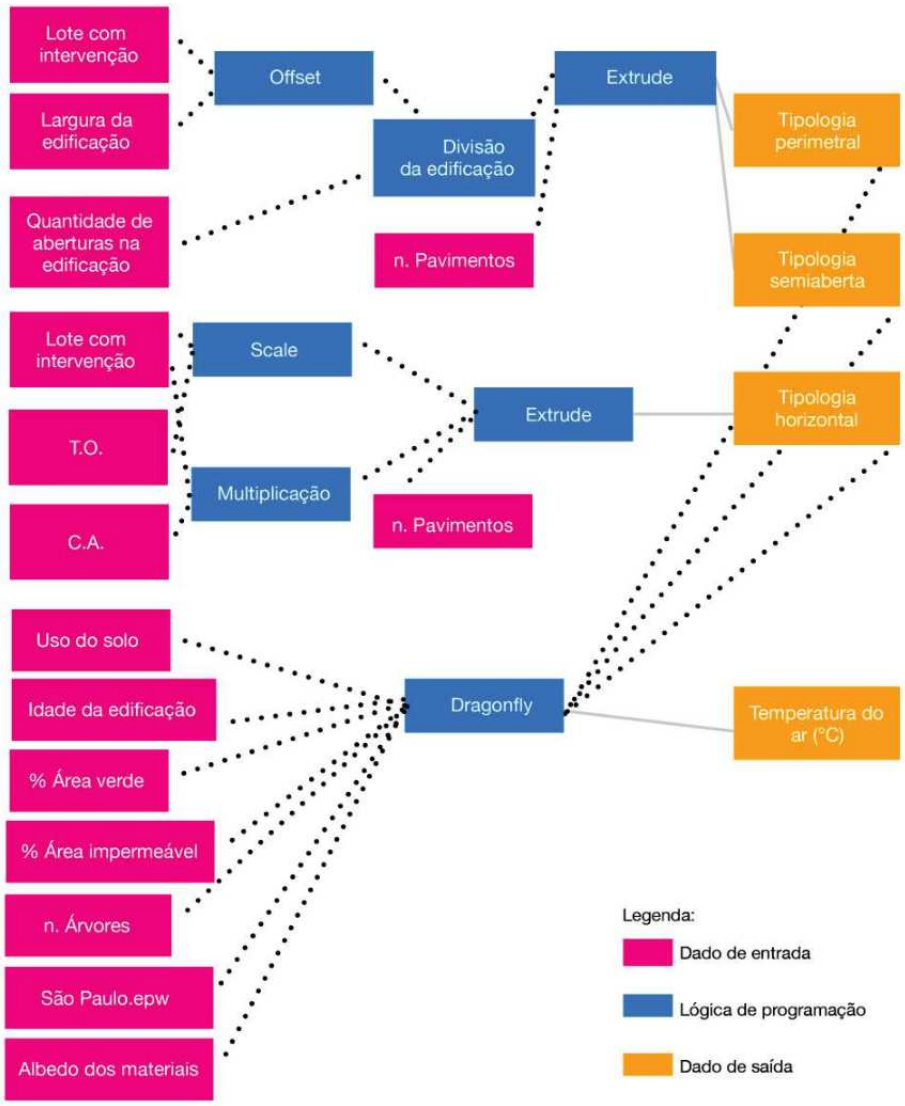


Figura 3 – Fluxograma das etapas desenvolvidas no algoritmo *Grasshopper*® (Autoras).

4. RESULTADOS

Ao comparar as diferentes tipologias dos quatro cenários simulados, se constatou variações de temperatura do ar anuais e nos meses mais quentes: janeiro e fevereiro. A média anual de temperatura do ar obtida em cada tipologia é ilustrada na Figura 4.

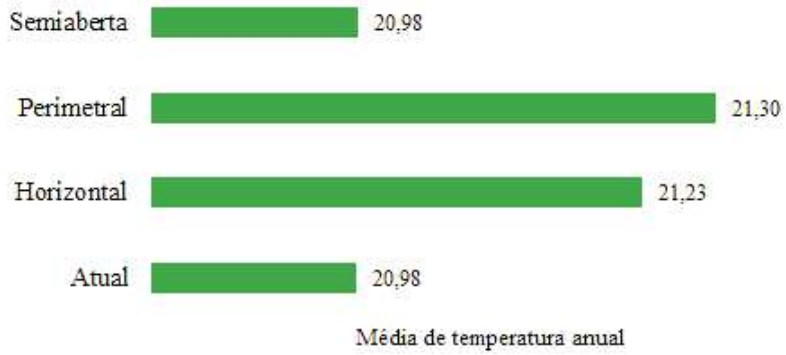


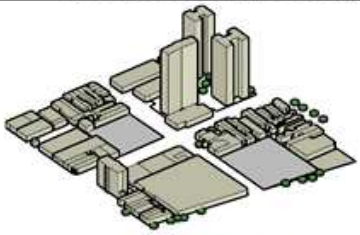
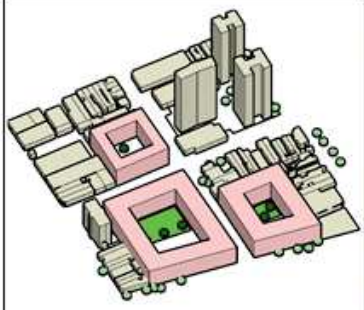
Figura 4 – Média de temperatura anual nos quatro cenários de estudo (Autoras).

A Figura 4 indica que a tipologia com a temperatura do ar mais elevada é a perimetral, seguida pela tipologia horizontal e pela tipologia semiaberta. É importante ressaltar que a simulação de temperatura do ar foi realizada considerando não apenas os lotes que sofreram alteração, mas todo o perímetro de estudo.

Nesse contexto, apenas na tipologia semiaberta, a média anual de temperatura do ar permanece a mesma que no cenário anual, mesmo com a intervenção realizada.

A Tabela 2 mostra detalhadamente os resultados obtidos no estudo.

Tabela 2 – Síntese dos resultados, para diferentes cenários, com relação dos valores médios obtidos através da simulação de temperatura do ar de toda área de estudo.

Atual (horizontal / vertical)		
		
Horizontal		
	Altura das edificações com intervenção:	48 m
	n. de pavimentos das edificações com intervenção	16 pav.
	T.O. das edificações com intervenção	0,25
	C.A. das edificações com intervenção	4
	% área verde (em relação ao lote)	20%
	FVC da área total de estudo	0,67
	H/W (Calculado através das edificações com intervenção e seu entorno)	1,83
	Relação (%) do aumento da temperatura do ar anual em relação a morfologia urbana atual	1,201%
	Relação (%) do aumento da temperatura do ar em jan e fev em relação a morfologia urbana atual	1,075%
Perimetral		
	Altura das edificações com intervenção:	21 m
	n. de pavimentos das edificações com intervenção	7 pav.
	T.O. das edificações com intervenção	0,65
	C.A. das edificações com intervenção	5
	FVC da área total de estudo	0,55
	H/W (Calculado através das edificações com intervenção e seu entorno)	1,02
	% área verde (em relação ao lote)	15%
	Relação (%) do aumento da temperatura do ar anual em relação a morfologia urbana atual	1,513%
	Relação (%) do aumento da temperatura do ar em jan e fev em relação a morfologia urbana atual	1,404%
Semiaberta		
	Altura das edificações com intervenção:	18 m
	n. de pavimentos das edificações com intervenção	6 pav.
	T.O. das edificações com intervenção	0,4
	C.A. das edificações com intervenção	2
	FVC da área total de estudo	0,60
	H/W (Calculado através das edificações com intervenção e seu entorno)	0,86
	% área verde (em relação ao lote)	48%
	Relação (%) do aumento da temperatura do ar anual em relação a morfologia urbana atual	0,005%
	Relação (%) do aumento da temperatura do ar em jan e fev em relação a morfologia urbana atual	-0,052%

A análise da Tabela 2 mostra que apenas a tipologia semiaberta teve o resultado negativo de temperatura do ar em relação a morfologia atual nos meses mais quentes, e foi a única que teve um valor de H/W satisfatório de acordo com os valores apresentados pelos autores Futcher, Kershaw e Mills (2013), ou seja, entre 0,6 e 1,0, quando o objetivo é diminuir os efeitos causados pela ICU.

A tipologia que obteve melhor resultado em relação a temperatura do ar foi a semiaberta, sendo que a tipologia que obteve o pior resultado em relação a temperatura do ar foi a perimetral. As tipologias perimetral e semiaberta possuem formas parecidas, porém, a tipologia perimetral é a tipologia que permite o maior adensamento construtivo das três tipologias analisadas, C.A. 5, e a semiaberta é a que permite menos adensamento construído, C.A. 2.

A tipologia com pior resultado em relação a temperatura do ar, a perimetral, não possui o maior valor de H/W, porém, conforme mencionado, é a tipologia com maior densidade construída. A densidade construída dessa tipologia não é conquistada pelo gabarito da mesma, sendo que o *Plano de Cerdá* de Barcelona estabelece gabarito máximo para as edificações de 21 metros, e conforme os autores Futcher, Kershaw e Mills (2013) em alguns casos, o sombreamento causando pelas edificações diminui o efeito causando pela ICU durante o dia. Dessa forma, edificações com alturas variadas podem ser benéficas para oferecer sombreamento e diminuir a temperatura do ar durante o dia.

Os gráficos das Figuras 5 à 8 ilustram, detalhadamente, a variação média de temperatura do ar nos meses mais quentes, janeiro e fevereiro, no cenário atual e nas três variações de tipologia. Na simulação de temperatura do ar foi considerada toda a área de estudo.

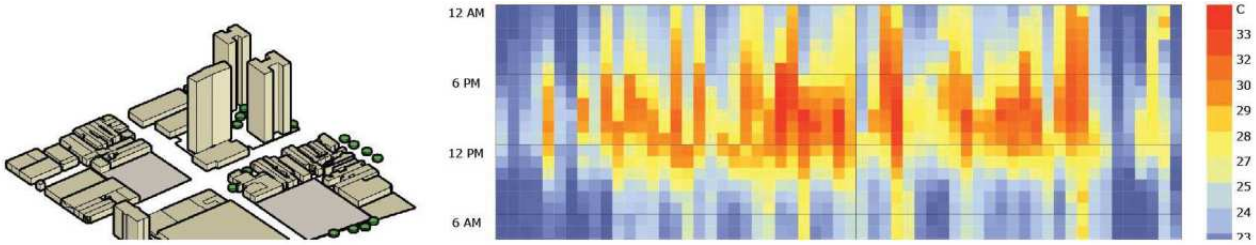


Figura 5 – Comparação de temperatura média do ar cenário atual nos meses janeiro de fevereiro (Autoras).

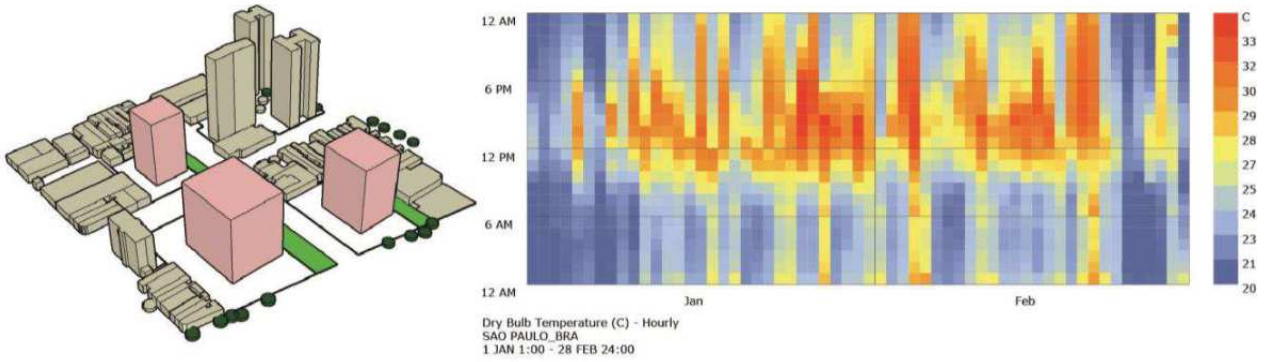


Figura 6 – Comparação de temperatura média do ar tipologia horizontal nos meses janeiro de fevereiro (Autoras).

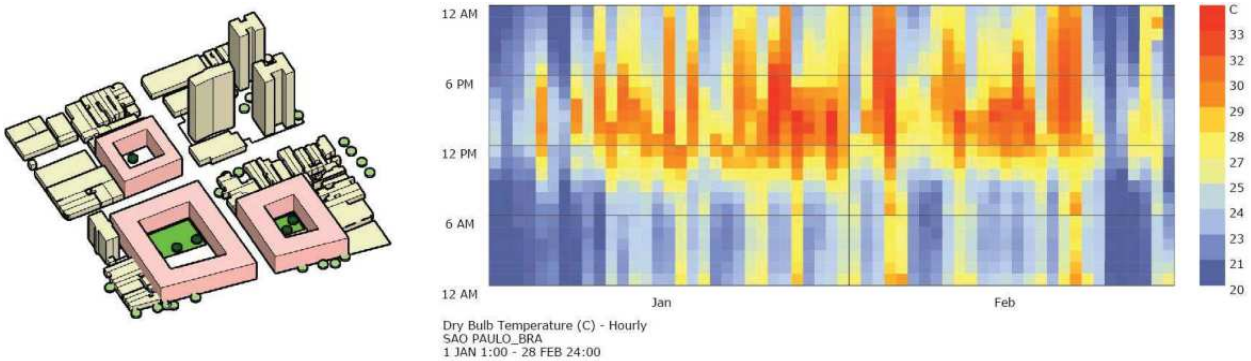


Figura 7 – Comparação de temperatura média do ar tipologia perimetral nos meses janeiro de fevereiro (Autoras).

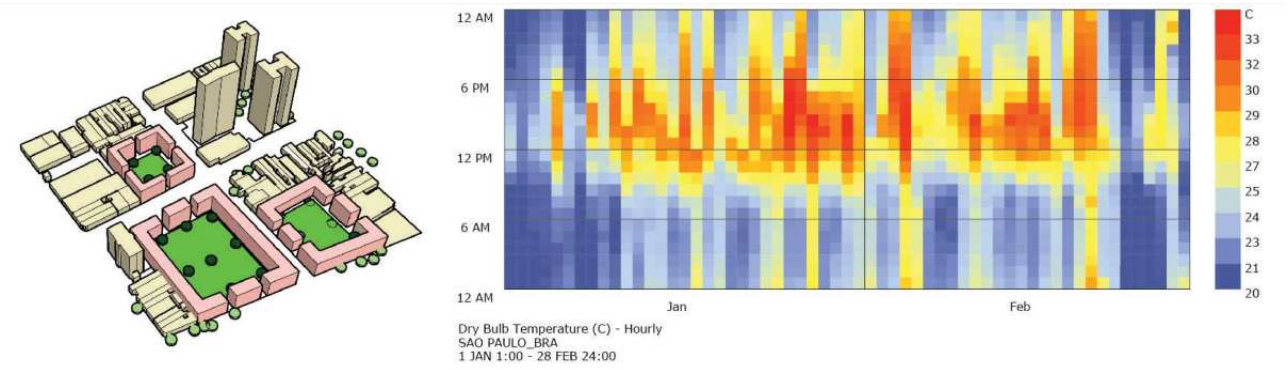


Figura 8 – Comparação de temperatura média do ar tipologia semiaberta nos meses janeiro de fevereiro (Autoras).

A análise dos gráficos das Figuras 5 à 8 indica que com relação ao cenário atual as tipologias horizontal e perimetral possuem maior temperatura de ar noturna, o que vai ao encontro do que foi apresentado pelos autores Ramírez-Aguilar e Lucas Souza (2019). A densidade construída interfere na ICU, considerando que essas tipologias são as que apresentam maiores valores de densidade construída, sendo a horizontal com C.A. 4 e a perimetral com C.A. 5.

A análise da temperatura noturna, também vai ao encontro dos resultados dos autores Futcher, Kershaw e Mills (2013) que indicam que H/W maior no que 1,0 interfere negativamente no efeito ICU durante a noite, considerando que a tipologia horizontal possui H/W de 1,83 e a tipologia perimetral possui H/W de 1,02.

A tipologia que obteve melhor resultado em relação a temperatura do ar durante os meses mais quentes, continuou sendo a tipologia semiaberta, o que vai ao encontro com a pesquisa dos autores Futcher, Kershaw e Mills (2013) que indica que H/W entre 0,6 e 1,0 é um valor apropriado quando o objetivo é diminuir os efeitos da ICU, considerando que o H/W da tipologia semiaberta é 0,86.

O melhor resultado em relação a temperatura do ar também vai ao encontro com a pesquisa dos autores Bartesaghi-Koc, Osmond e Peters (2020), Liu *et al*. (2021), Sanches (2020) e Santamouris e Osmond (2020) que indicam que a vegetação possui um papel indispensável quando o objetivo é amenizar os efeitos causados pela ICU e amenizar a temperatura do ambiente urbano. Nos resultados apresentados, pode observar este efeito, considerando que a tipologia semiaberta é a que possui maior porcentagem de área verde com 48% do lote, a tipologia perimetral possui apenas 15% do lote e a horizontal apenas 05% do lote.

5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados que envolve o H/W e a ICU, se mostrou alinhada com a bibliografia, indicando, em consonância com os autores Futcher, Kershaw e Mills (2013) e Bartesaghi-Koc, Osmond e Peters (2020) que menores índices de H/W são indicados quando o objetivo é diminuir o efeito da ICU.

Com relação as áreas verdes e a ICU, o resultado da pesquisa está alinhada com o que foi apresentado pelos autores Bartesaghi-Koc, Osmond e Peters (2020), Liu *et al*. (2021), Sanches (2020) e Santamouris e Osmond (2020) que indicam que a vegetação é fundamental quando o objetivo é amenizar os efeitos causados pela ICU e amenizar a temperatura do ar no ambiente urbano. Dessa forma, a tipologia com melhor resultado em relação a temperatura do ar, foi a tipologia semiaberta, que possui maior porcentagem de área verde, com 48% do lote. Já a tipologia horizontal possui 20% do lote de área verde e a tipologia perimetral possui 15% do lote de área verde.

Estudos mais aprofundados sobre direção e velocidade do vento; bem como umidade relativa do ar; e análise da tipologia em outras regiões; poderão auxiliar na descoberta da interrelação destas variáveis com a forma das tipologias e o efeito na ICU.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTON, I.; TĂNASE, D. Informed Geometries. Parametric Modelling and Energy Analysis in Early Stages of Design. **Energy Procedia**, v. 85, p. 9–16, 2016.

APREDA, C.; REDER, A.; MERCOGLIANO, P. Urban morphology parameterization for assessing the effects of housing blocks layouts on air temperature in the Euro-Mediterranean context. **Energy and Buildings**, v. 223, p. 110171, 2020.

BARTESAGHI-KOC, C.; OSMOND, P.; PETERS, A. Quantifying the seasonal cooling capacity of 'green infrastructure types' (GITs): An approach to assess and mitigate surface urban heat island in Sydney, Australia. **Landscape and Urban Planning**, v. 203, n. February, p. 103893, 2020.

FUTCHER, J. A.; KERSHAW, T.; MILLS, G. Urban form and function as building performance parameters. **Building and Environment**, v. 62, p. 112–123, 2013.

LIU, J. et al. Predicting the surface urban heat island intensity of future urban green space development using a multi-scenario simulation. **Sustainable Cities and Society**, v. 66, n. 159, p. 102698, 2021.

OKE, T. R. City Size and the Urban Heat Island. **Atmospheric Environment Pergamn**, v. 7, p. 769–779, 1973.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1–24, 1982.

PMSP. **SÃO PAULO, Lei nº 16.050, de 31 de Julho de 2014. Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo.** Brasil, 2014.

PMSP. **SÃO PAULO, Lei nº 16.402, de 23 de março de 2016. Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo do Município de São Paulo.** Brasil, 2016.

RAMÍREZ-AGUILAR, E. A.; LUCAS SOUZA, L. C. Urban form and population density: Influences on Urban Heat Island intensities in Bogotá, Colombia. **Urban Climate**, v. 29, n. May, p. 100497, 2019.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. **Grasshopper: versão 1.0.0007**, 2019.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. **Rhinoceros: versão 6.0**, 2021.

SANCHES, P. M. **Cidades compactas e mais verdes : conciliando densidade urbana e vegetação por meio do desenho urbano**. Piracicaba: Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2020.

SANTAMOURIS, M.; OSMOND, P. Increasing Green Infrastructure in Cities: Impact on Ambient Temperature, Air Quality and Heat-Related Mortality and Morbidity. **Buildings**, v. 10, n. 233, p. 1–34, 7 dez. 2020.

SCHIANO-PHAN, R.; WEBER, F.; SANTAMOURIS, M. The Mitigative Potential of Urban Environments and Their Microclimates. **Buildings**, v. 5, n. 3, p. 783–801, 7 jul. 2015.

SONG, A. et al. **Dragonfly**. Disponível em: <https://github.com/ladybug-tools/dragonfly-legacy>. Acesso em: 23 maio. 2020.

URBANO, J. The Cerdà Plan for the Expansion of Barcelona: A Model for Modern City Planning. **Focus**, v. 12, n. 1, 2016.