

Conforto térmico e ambiente urbano: avaliação preliminar no Conjunto Paulo VI, Belo Horizonte, MG

Thermal comfort and urban environment: preliminary assessment in Paulo VI Housing, Belo Horizonte, MG

¹Eleonora Sad de Assis, ²Simone Queiroz da Silveira Hirashima

¹Doutora – Escola de Arquitetura, UFMG (elsad@ufmg.br)

²Doutora – Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG (simonehirashima@cefetmg.br)

RESUMO: Áreas urbanas informais e densamente construídas na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil tendem a ficar mais quentes do que a cidade formal e podem apresentar condições de desconforto térmico durante todo o ano. Considerando a escassez de estudos nestas áreas, apresenta-se o caso do Conjunto Paulo VI, localizado em Belo Horizonte, com o objetivo de avaliar as condições de conforto térmico no horário mais quente de um dia de inverno. Dados microclimáticos foram levantados em 25 pontos da área e inseridos no programa Rayman PRO, que foi configurado com as características do entorno de cada ponto e da população aclimatada, para cálculo do índice de conforto térmico Temperatura Equivalente Fisiológica (PET). Os resultados mostram que as condições de desconforto térmico nesta área estão relacionadas sobretudo à incidência solar nos recintos urbanos, sendo que as características construtivas da área acabam provocando altas temperaturas de superfície e radiante média. Considerando que a temperatura radiante média é uma variável microclimática que muito influencia o cálculo do PET, em dias ensolarados e de baixas velocidade do vento, medidas que possibilitem sua redução podem auxiliar na concepção de ambientes com condições térmicas mais favoráveis, diminuindo o desconforto térmico na área de estudo. Isto sugere que o sombreamento das áreas públicas pode ser a principal estratégia local para aumentar a resiliência do ambiente urbano à tendência de aquecimento e ao desconforto térmico.

Palavras Chave: Conforto térmico urbano. PET. Áreas urbanas informais. Programa Rayman PRO.

ABSTRACT: Informal, densely built urban areas in Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, tend to be hotter than the formal city and may present thermal discomfort throughout the year. Considering the scarcity of studies in these areas, the case of Paulo VI Housing, located in Belo Horizonte, is presented, to evaluate thermal comfort conditions during the hottest time of a winter day. Microclimatic data were collected at 25 points in the area and inserted as input data into the software Rayman PRO, which was configured with the characteristics of the surroundings of each point and the acclimatized population, to calculate the thermal comfort index Physiological Equivalent Temperature (PET). The results show that the conditions of thermal discomfort in this area are mainly related to solar incidence in urban areas and that the construction characteristics of the area may contribute to high surface and average radiant temperatures. Considering that the mean radiant temperature is a microclimatic variable that greatly influences the PET calculation, on sunny days with low wind speeds, measures that enable its reduction can help in the design of environments with more suitable thermal conditions, reducing thermal discomfort in the study area. This suggests that the shading of public areas may be one of the main local strategies to increase the resilience of the urban environment in contexts of warming trends and thermal discomfort.

Keywords: Urban thermal comfort. PET. Informal urban areas. Software Rayman PRO.

1. INTRODUÇÃO

A crescente exposição da população ao calor, devido a mudanças climáticas e/ou a ilhas de calor urbanas, traz várias consequências para a saúde pública; entretanto, as condições de exposição ao desconforto térmico e a capacidade de adaptação são, possivelmente, desiguais entre países desenvolvidos e em desenvolvimento (ZHANG *et al.*, 2023), entre regiões de um mesmo país (WU *et al.*, 2023) e de uma mesma cidade (DIALESANDRO *et al.*, 2021; SARRICOLEA *et al.*, 2022). Comunidades de mais baixa

renda e escolaridade, com alta proporção de crianças e idosos, são consideradas as mais vulneráveis.

Essas desigualdades à exposição ao calor e, de modo geral, a impactos das mudanças climáticas em várias escalas espaciais e temporais, têm sido ainda pouco exploradas na literatura acadêmica e apenas mais recentemente. Zhang *et al.* (2023), utilizaram dados históricos e de projeções climáticas para mostrar que, no futuro, é provável haver impactos desiguais do aquecimento global nas condições de conforto térmico entre as diferentes regiões do planeta. Nas latitudes médias e altas, regiões de climas mais amenos e frios, um número decrescente de dias frios e desconfortáveis e um número crescente de dias de conforto poderão contribuir para uma melhoria das condições de conforto térmico; enquanto que, nas regiões em baixas latitudes, com climas mais quentes, as condições de conforto térmico deverão piorar, como resultado de um aumento no número de dias quentes e desconfortáveis, que excederão em muito a diminuição no número de dias frios e desconfortáveis. Países com condições econômicas menos favoráveis localizados na faixa intertropical ou subtropical serão, portanto, mais negativamente afetados pelas mudanças climáticas, seja porque eventualmente experimentarão maiores alterações no clima local, seja porque provavelmente possuirão menor capacidade de adaptação (SARRICOLEA *et al.*, 2022). Deste modo, a exposição e vulnerabilidade às condições de conforto térmico não são ou serão equitativas globalmente.

Entretanto, mesmo em países desenvolvidos, tais desigualdades ocorrem entre grupos sociais mais vulneráveis pesquisados em diversas regiões nacionais e/ou cidades (DIALESANDRO *et al.*, 2021; WU *et al.* 2023). Esses aspectos têm sido abordados também no contexto da “justiça ambiental” ou “justiça climática” (SCHLOSBERG e COLLINS, 2014; DIALESANDRO *et al.*, 2021), enfatizando que, embora não sejam estas populações as responsáveis por grande parte das emissões históricas de gases de efeito estufa, serão elas as que sofrerão os piores efeitos das mudanças climáticas.

Deste modo, os autores concluem que o impacto geral das alterações no conforto térmico é negativo para a população global e que, portanto, o apoio prioritário à mitigação e adaptação climática às nações em desenvolvimento e comunidades socioeconomicamente vulneráveis é urgentemente necessário (DIALESANDRO *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2023).

Nas áreas urbanas, as populações que habitam assentamentos informais são as mais vulneráveis a efeitos locais de mudanças climáticas associados às ilhas urbanas de calor e/ou a ondas de calor (FOLLADOR *et al.*, 2016; BARUTI *et al.*, 2019). Este tipo de tecido urbano em climas tropicais e subtropicais constitui entre 30% a 80% das áreas urbanizadas de cidades da América Latina, África e Ásia, porém há poucos estudos em áreas urbanas informais e uma grande variabilidade nos resultados, de acordo com Baruti *et al.* (2019). São áreas que apresentam muitos desafios ambientais do ponto de vista das condições térmicas em seus espaços externos, visto que a morfologia compacta e a alta densidade de ocupação pode levar a falta de circulação de ar e elevado desconforto térmico. A compreensão dessas disparidades é importante para subsidiar ações equitativas de mitigação e adaptação climática nas cidades.

No presente estudo, o objetivo geral foi fazer uma avaliação preliminar das condições de conforto térmico ao ar livre, usando o índice PET (Temperatura Fisiológica Equivalente), em área urbana informal da cidade de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais, a partir de medições móveis de dados microclimáticos em período de inverno, no horário mais quente do dia (entre 14:00 e 15:00). Os valores de temperatura do ar, umidade relativa e velocidade e direção do vento, assim como do PET, foram obtidos e espacializados na área de estudo, o Conjunto Paulo VI. Buscou-se, também, identificar variações locais na estimativa de conforto térmico e relacioná-las às características do entorno urbano.

2. O ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO PET CALIBRADO PARA BELO HORIZONTE

Autores importantes na área da biometeorologia humana consideram necessário avaliar os diferentes microclimas urbanos de uma maneira termofisiologicamente relevante, para fins de aplicação da climatologia urbana ao planejamento das cidades (MAYER e HÖPPE, 1987; MATZARAKIS *et al.*, 1999). Isto pode ser feito por meio do uso de índices urbanos de conforto térmico – o índice PET é um deles.

O PET é baseado no MEMI (Modelo de Balanço Energético de Munique para Indivíduos), desenvolvido por Mayer e Höppe (1987) e Höppe (1999). Este índice considera a influência de parâmetros climáticos termicamente importantes (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade do ar), avaliando os efeitos deles nos processos regulatórios e no estado térmico do corpo humano. O corpo humano não percebe individualmente tais parâmetros, mas, por meio de termorreceptores, produz uma resposta termoregulatória às temperaturas da pele e do fluxo de sangue que passa pelo hipotálamo. O PET é definido como uma temperatura do ar (em °C) na qual, em um ambiente interior típico (sem vento e insolação), o balanço térmico do corpo humano ocorreria com as mesmas temperaturas da pele e do fluxo de sangue como nas complexas condições externas em análise.

Matzarakis e Mayer (1996) relacionaram intervalos de PET a diferentes intervalos de percepção térmica humana, considerando como referência um indivíduo médio alemão parado ou em repouso (produção interna de calor de 80 W) e com vestimenta pesada (resistência térmica de 0,9 clo). Uma escala simétrica de 9 pontos e dois polos, relacionando as faixas de PET à percepção térmica média da amostra populacional usada é indicada na Tabela 1. Porém, outros autores mostraram que a percepção das condições de conforto térmico em ambientes abertos depende também de outros fatores, tais como a adaptação da população ao clima local (NIKOLOPOULOU, 2011; SALATA *et al.*, 2016); diferenças psicológicas e socioculturais (NIKOLOPOULOU *et al.*, 2001; KNEZ e THORSSON, 2006). Deste modo, os índices de conforto térmico urbano devem ser calibrados para as condições climáticas de cada região, utilizando respostas das populações locais aclimatadas.

2.1. Calibração do PET para Belo Horizonte, MG

Os estudos para calibração do PET em Belo Horizonte tiveram início nos anos de 2009-2010, com a coleta de dados por meio de medições de variáveis microclimáticas e aplicação simultânea de questionários, em dias representativos de cada uma das quatro estações do ano. Este estudo resultou na definição de faixas de PET para os diferentes graus de percepção térmica na escala de sete pontos e dois polos, considerando uma amostra de 1.182 questionários válidos. Em 2013, o índice PET foi novamente calibrado, utilizando uma amostra maior (1.693 entrevistados). A coleta de dados foi realizada apenas durante o verão (março) e o inverno (julho). A escala de percepção de sensações térmicas utilizada no estudo anterior foi reclassificada para apenas três categorias (“Frio”, “Bem” – neutro/confortável – e “Calor”), visando um melhor ajuste do modelo de regressão logística ordinal (HIRASHIMA *et al.*, 2016). Na comparação apresentada na Tabela 1, verifica-se que, no caso de Belo Horizonte, a categoria “Frio” inclui as categorias originais “Com muito frio”, “Com frio” e “Com um pouco de frio”; a categoria “Bem” corresponde à categoria “Bem, nem com frio e nem com calor”; e a categoria “Calor” inclui “Com um pouco de calor”, “Com calor” e “Com muito calor”. A faixa neutra (confortável) é mais ampla e um pouco deslocada para condições térmicas mais quentes, quando comparada aos intervalos originais do PET de Matzarakis e Mayer (1996).

Tabela 1 – Comparação entre faixas de PET relacionadas à escala de percepção de sensação térmica, conforme estudos de Matzarakis e Mayer (1996) e Hirashima *et al.* (2016).

Escala de percepção de sensação térmica	Faixas originais de PET (MATZARAKIS E MAYER, 1996)	Calibração do PET para Belo Horizonte, MG, Brasil (HIRASHIMA <i>et al.</i> , 2016)
Muito frio (<i>very cold</i>)	< 4°C	-
Frio (<i>cold</i>)	4 - 8°C	
Pouco frio (<i>cool</i>)	8-13°C	< 19°C
Pouquíssimo frio (<i>slightly cool</i>)	13-18°C	
Neutra (Bem, nem calor e nem frio/confortável)	18-23°C	19-27°C
Pouquíssimo quente (<i>slightly warm</i>)	23-29°C	
Pouco quente (<i>warm</i>)	29-35°C	> 27°C
Quente (<i>hot</i>)	35-41°C	
Muito quente (<i>very hot</i>)	> 41°C	-

3. ÁREA DE ESTUDO: O CONJUNTO PAULO VI

O Conjunto Paulo VI (CPVI) foi selecionado para este estudo por estar entre as 10 áreas mais vulneráveis às mudanças climáticas do município identificadas pelo trabalho de Follador *et al.* (2016) e, portanto, ser uma das áreas prioritárias para ações de mitigação e adaptação climática no município de Belo Horizonte. Esta área passaria do 70º lugar na classificação de vulnerabilidade feita no ano-base do estudo (2016) para o 10º lugar na projeção de cenário para 2030, caso nada seja feito neste período.

O Conjunto localiza-se na região nordeste do município (Figura 1). Tem atualmente uma população de 2.589 habitantes distribuída em 0,23 km², de acordo com os dados do censo (IBGE, 2022). Embora tenha apresentado um decréscimo populacional em relação ao censo de 2010, acompanhando o que ocorreu também no município, a densidade populacional local é 61% superior à densidade média de Belo Horizonte. Constitui-se principalmente de famílias com renda média domiciliar de ½ a 2,5 salários-mínimos (FERREIRA, 2019), que ocupam a área há quase 40 anos. Foi apenas em 2019 que a Lei Municipal 11.181 classificou a área como Zona Especial de Interesse Social (ZEIS), possibilitando a regularização fundiária e alguma qualificação urbanística. Assim, alguns equipamentos públicos foram implantados dentro da área do CPVI, tais como o CRAS (Centro de Referência de Assistência Social), 2 escolas de educação infantil, 1 escola de ensino fundamental, todas municipais, 1 escola estadual de ensino médio e 1 posto de saúde. É servido por algumas linhas de transporte público, que circulam nas vias principais, ligando a parte baixa do Conjunto à sua parte mais alta, visto que a circulação de pedestres é dificultada pela alta declividade local.

Figura 1 – Localização e aspecto geral do Conjunto Paulo VI.



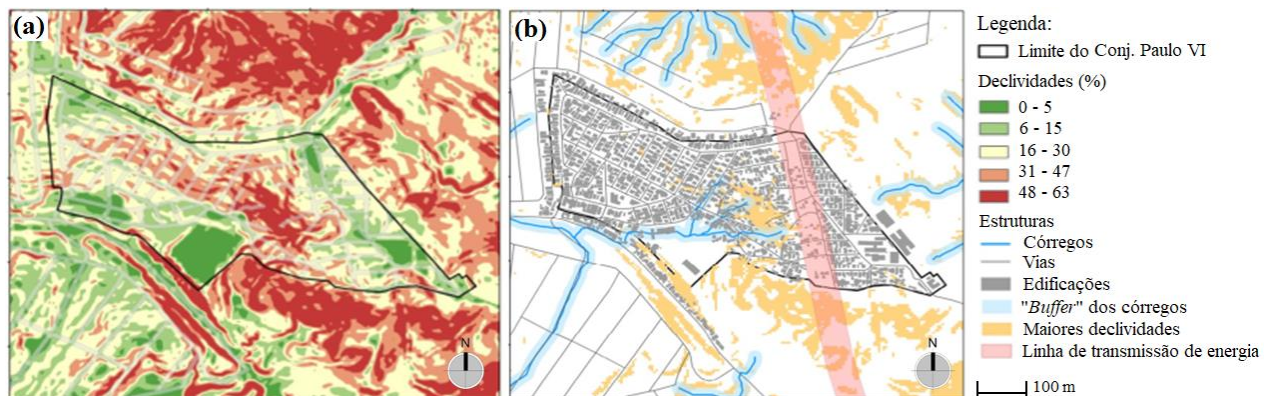
Fonte: Google Earth/Landsat/Copernicus, 2019.

De acordo com a proposta de classificação meso e topoclimática do município (Assis, 2010), o CPVI situa-se no mesoclima Depressão Central, que abrange a maior parte do território municipal. Embora prevaleça o uso residencial, as diferentes morfologias, estruturas urbanas e densidades de ocupação dão origem a vários topoclimas distintos neste mesoclima. O Conjunto localiza-se, assim, no chamado topoclima ID₇, onde foram registradas as amplitudes térmicas mais elevadas e as temperaturas médias máximas dentre todos os topoclimas do município. A direção predominante do vento é leste, com baixa intensidade (0 a 2 na escala de Beaufort).

O relevo do CPVI é acidentado, com áreas de grande declividade entre duas porções mais planas nos limites norte e sul do Conjunto (Figura 2a). Apesar de algumas nascentes identificadas (Figura 2b), onde foi prevista uma APP (área de preservação permanente), os cursos d'água estão atualmente aterrados por construções e/ou parcialmente canalizados, por causa da falta de mecanismos legais efetivos para a preservação deles e de sua área de entorno imediato (“buffer”). A APP e a faixa *non aedificandi* da linha de transmissão de energia elétrica (Figura 2b) vêm sendo sistematicamente ocupadas por novas edificações precárias e irregulares.

De modo geral, o CPVI tem pouca vegetação de porte arbóreo, sendo a arborização viária bastante reduzida e apenas em trechos de algumas vias. Do mesmo modo, os lotes, em sua grande maioria, não possuem vegetação, visto o alto percentual de área construída, onde, à moradia principal somam-se acréscimos posteriores, usualmente para moradia dos filhos e outros parentes.

Figura 2 – Relevo (a) e estrutura geral (b) do Conjunto Paulo VI.



Fonte: Laboratório de Geoprocessamento da Escola de Arquitetura, UFMG, 2018.

4. MATERIAIS E MÉTODO

A metodologia usada foi a de simulação computacional (GROAT e WANG, 2002) das condições de conforto térmico ao ar livre, usando o índice PET calculado pelo programa Rayman PRO (MATZARAKIS *et al.*, 2010), a partir de dados microclimáticos coletados em campo. Como já comentado, este índice foi calibrado para moradores do município de Belo Horizonte (HIRASHIMA *et al.*, 2016), de modo que os resultados foram avaliados a partir das faixas de sensação térmica da população aclimatada local.

4.1. Instrumentação e trabalhos de campo

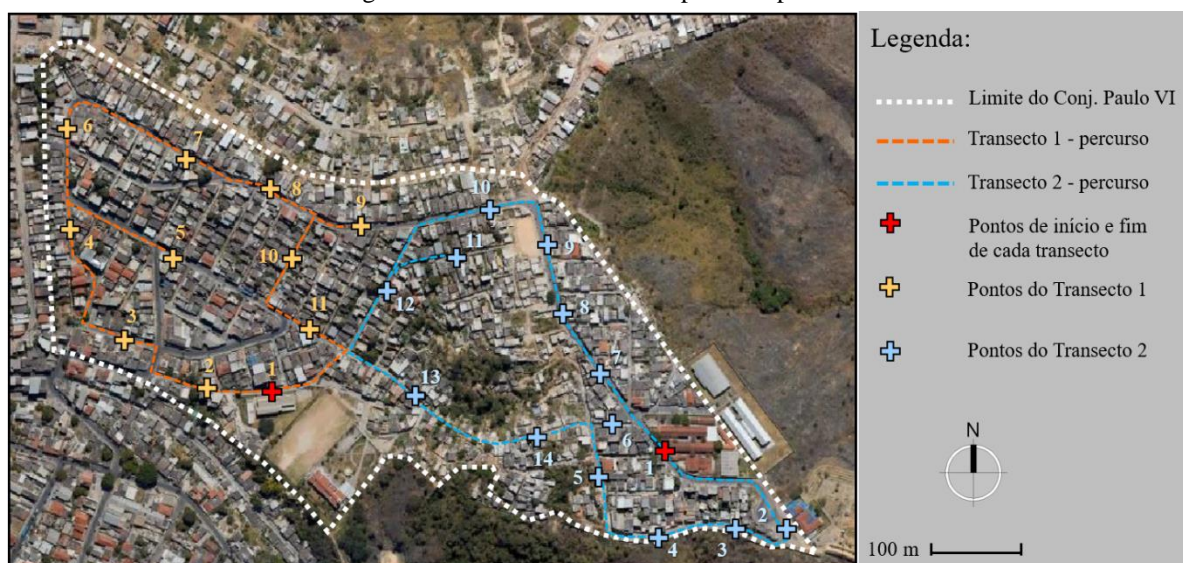
O trabalho de campo foi organizado buscando atender as recomendações do documento técnico 1250 da Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2006) na escala do estudo. Vinte e cinco pontos foram distribuídos regularmente na malha viária local para a medição móvel de temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento,

organizando dois transectos fechados simultâneos, de modo que cada um deles pudesse ser finalizado a pé em 30 a 40 minutos (Figura 3).

Um conjunto de instrumentos digitais calibrados foi usado para as medições em cada transecto, a saber o termo-higrômetro Incoterm TTHI-0010 e o termo-higro-anemômetro Akrom KR-825. Para o registro da direção de vento foi usado o aplicativo de bússola do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Center*, EUA) para telefones celulares. Para dar visibilidade ao fluxo de ar, uma linha de costura vermelha, de cerca de 10 cm de comprimento, foi presa aos telefones celulares, melhorando a estimativa da direção do vento nos vários pontos durante os trabalhos de campo.

Os dados de temperatura e umidade do ar foram medidos à altura de 1,5 m e à sombra, usando como proteção guarda-chuvas de tecido ultrablock na cor externa prata, para reflexão dos raios solares (FREITAS *et al.*, 2019); os dados de velocidade do vento foram medidos à altura de 2,0 m.

Figura 3 – Transectos e seus respectivos pontos.



Fonte: Google Earth/Landsat/Copernicus 2019.

Cada transecto foi percorrido por uma equipe composta de 3 pessoas, com a seguinte dinâmica: uma delas segurando o guarda-chuva e o aparelho termo-higrômetro; a segunda fazendo a leitura da velocidade e direção do vento e a terceira pessoa marcando os tempos para as leituras dos aparelhos e anotando os valores numa planilha (Figura 4).

Figura 4 – Medição em cada ponto e instrumentos utilizados.



Foram realizados 2 trabalhos de campo, nos dias 22 e 29 de junho de 2022, das 14:00 às 15:00. Um pré-teste para confirmação dos pontos selecionados para as medições e para

treinamento das equipes e uniformização dos procedimentos de coleta de dados foi realizado no dia 15 anterior aos trabalhos de campo. Em torno de cada ponto, foram feitos 3 registros dos dados com cerca de 3 minutos de intervalo entre as medições, gerando as médias das variáveis em cada ponto. As diferenças entre as medidas inicial e final de temperatura e umidade relativa do ar em cada transecto foram distribuídas linearmente por todos os pontos, visando corrigir os dados, visto que as medições não foram feitas simultaneamente em todos os pontos. Ao se considerar o tempo de resposta da instrumentação, as leituras em cada ponto iniciavam após ligar os aparelhos e aguardar 5s. Os dados finais para a modelagem no programa Rayman PRO foram preparados como médias das medições nos dois dias citados.

4.2. Modelagem no programa Rayman PRO

O programa Rayman PRO calcula alguns índices de conforto térmico no exterior baseados em modelos de balanço de energia do corpo humano, dentre os quais o PET. O programa estima os fluxos de irradiação de ondas curtas e longas, considerando o efeito de nuvens e das estruturas edificadas do entorno de um certo ponto, quanto à geometria e ao albedo de superfície, para o cálculo da temperatura radiante média, variável necessária àqueles índices. A vantagem do programa para aplicações em áreas urbanas de pequeno porte, como no caso em estudo, reside na facilidade de uso e rapidez de execução, mesmo quando a entrada de dados é feita individualmente para cada ponto.

Para configurar o programa, além dos dados microclimáticos do ponto, considerou-se:

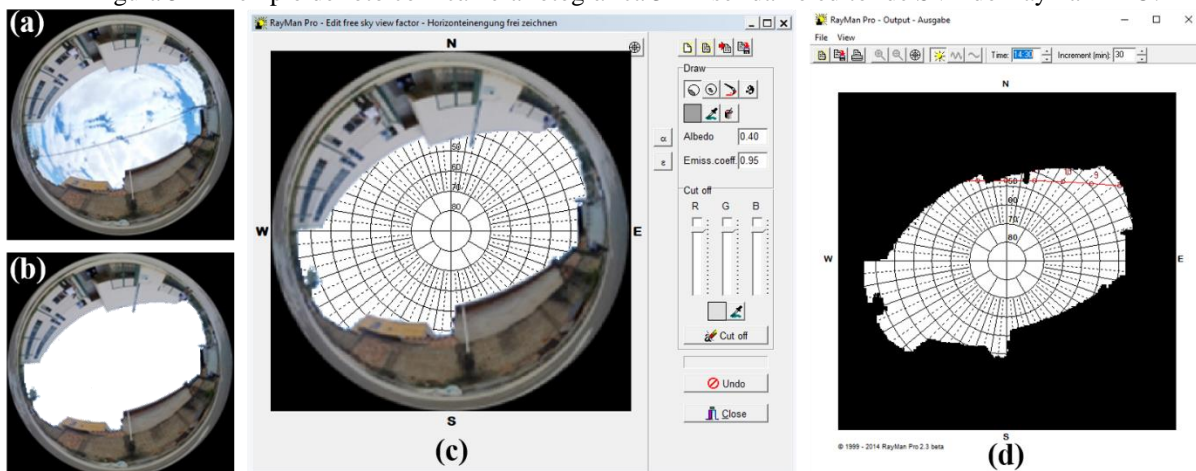
(a) a irradiação global incidente sobre plano horizontal (G) nos dias e horários das medições em campo, extraída da estação meteorológica automática da cidade (código A521);

(b) a nebulosidade nos dias e horários das medições em campo, registrada na estação meteorológica convencional da cidade (código 83597);

(c) os dados da amostra populacional de calibração do PET para Belo Horizonte, tais como as médias de altura, peso e idade, o tipo de vestimenta mais frequente (*clothing*) e calor metabólico para a atividade “andando”, ou seja, posição de pé (*standing*);

(d) o cálculo do fator de visão de céu (SVF) em cada ponto foi feito pela inserção de foto olho-de-peixe de cada ponto no editor de SVF do programa (Figura 5); Estas fotos foram feitas usando uma câmera 3D da marca Samsung Gear 360° em um dia à parte dos dias das medições microclimáticas, com característica de maior nebulosidade, para facilitar depois o tratamento das fotos.

Figura 5 – Exemplo de foto com câmera fotográfica 3D inserida no editor de SVF do Rayman PRO.



Legenda: (a) foto original rotacionada para o norte geográfico; (b) foto tratada para “cortar” o céu; (c) foto tratada inserida no editor de SVF, tela do programa Rayman PRO (note o ajuste do albedo médio do ponto); (d) máscara em preto e branco com a trajetória aparente solar no dia de estudo (linha vermelha). Fonte: elaboração própria.

(e) na aba “*additional pre-settings*” do menu “*input*” foram definidos a razão de Bowen (β) e o albedo médio estimado visualmente no entorno de cada ponto; o coeficiente de turbidez da atmosfera (coeficiente de Linke) foi mantido constante com valor médio típico para regiões do Brasil (NASCIMENTO *et al.* 2021); a razão entre a irradiação difusa e global foi determinada para o mês e horário das medições de campo usando as estimativas do programa Radiasol 2 (LABSOL, s/d) para o plano horizontal em Belo Horizonte; o albedo do ser humano e o limite inferior da umidade relativa para irradiação difusa total foram mantidos *default*. Para a definição da razão de Bowen em cada ponto foram usados dados medidos por Maitelli (2010) e Callejas *et al.* (2019), considerando $\beta = 2$ para entornos urbanizados e $\beta = 1$ caso no entorno houvesse expressiva massa de vegetação.

A Tabela 2 apresenta os dados constantes usados na configuração do programa Rayman PRO para todos os 25 pontos.

Tabela 2 – Dados constantes de configuração do programa Rayman PRO para a área de estudo.

Dia e hora local		Dados geográficos			Dados do local				Dados pessoais e calor metabólico				
Data	Hora	Lat (graus)	Lon (graus)	Fuso horário	N (oitavas)	G (W/m ²)	L (adm)	D/G (adm)	A (m)	P (kg)	Id (anos)	Vest (clo)	At (W)
29.06.22	14:30	-19°56'	-43°56'	-3,0	3,2	574	3,3	0,38	1,7	69	33	0,5	133

Legenda: Lat (latitude); Lon (longitude); N (nebulosidade); G (irradiação solar global sobre plano horizontal, média no horário); L (coeficiente de turbidez de Linke); D/G (razão entre as médias estimadas de irradiação solar difusa e global, sobre o plano horizontal, para o mês em estudo); A (altura média); P (peso médio); Id (idade média); Vest (resistência térmica da vestimenta); At (calor metabólico total para a atividade).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Conjunto Paulo VI apresentou certa variabilidade das condições microclimáticas no horário de estudo, devido principalmente ao relevo acidentado, uma vez que as edificações são de baixa altura e, portanto, têm menor influência localmente do que o relevo. A Tabela 3 registra os dados medidos, as variáveis de entrada no programa Rayman PRO para cada ponto, bem como os dados calculados. As áreas de maior altitude apresentaram as temperaturas mais altas e as umidades mais baixas, provavelmente porque estão mais expostas à insolação (Figuras 6 e 7). As amplitudes médias de temperatura e umidade relativa do ar no horário das medições (mais quente) foram de 2,7°C e 4,5% respectivamente. Houve, também, uma grande variação das condições de ventilação urbana, havendo áreas em calmaria, principalmente nas partes mais baixas do Conjunto, e outras mais bem ventiladas, com velocidades de vento chegando a mais de 2,0 m/s, nas áreas mais altas (Figura 8).

Figura 6 – Variação local das condições de temperatura do ar no horário do estudo.

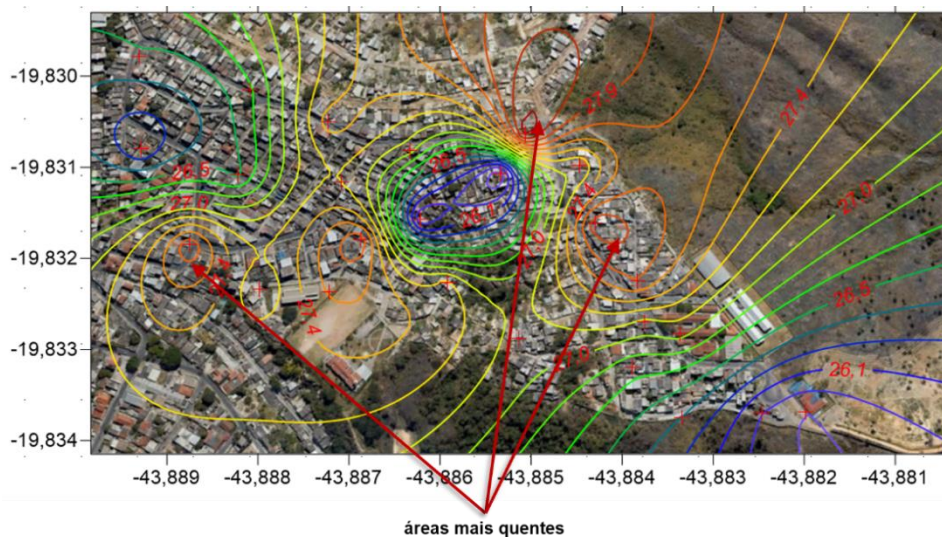


Tabela 3 – Dados variáveis de configuração do programa Rayman PRO e dados calculados.

Ponto	Dados variáveis			Dados medidos			Dados calculados pelo programa					
	Alt (m)	α (adm)	β (adm)	Ta (°C)	UR (%)	v (m/s)	SVF (adm)	G _{act} (W/m ²)	Ts (°C)	T _{rm} (°C)	PET (°C)	
Transecto 1	1	753	0,45	1	27,6	39,5	0,9	0,414	90,4	28,1	35,1	28,9
	2	744	0,40	2	27,1	40,9	0,4	0,222	48,5	27,6	31,1	28,0
	3	744	0,40	2	27,8	38,0	0,3	0,468	102,0	29,0	36,5	31,6
	4	769	0,50	2	26,1	42,4	0,2	0,432	94,3	26,8	34,1	29,9
	5	761	0,45	2	26,5	41,4	0,7	0,451	98,3	27,3	34,9	28,4
	6	783	0,50	2	26,5	41,6	2,0	0,515	574,0	33,9	50,8	32,5
	7	784	0,50	2	26,6	40,4	0,8	0,479	104,5	27,2	35,4	28,4
	8	789	0,65	2	27,5	39,5	2,0	0,429	93,6	27,6	35,2	27,0
	9	796	0,50	2	27,0	38,5	0,0	0,506	574,0	40,9	53,8	44,7
	10	780	0,45	2	27,2	40,1	0,6	0,346	75,5	27,8	33,5	28,6
	11	766	0,60	2	27,8	38,3	1,6	0,296	64,6	27,8	32,9	26,7
Transecto 2	1	813	0,40	2	27,0	40,1	1,6	0,403	574,0	37,3	51,3	34,2
	2	812	0,40	1	25,8	38,8	1,8	0,678	574,0	33,0	51,7	32,6
	3	807	0,45	1	25,9	39,8	1,8	0,501	109,3	26,4	35,1	25,2
	4	808	0,40	1	26,4	42,4	2,7	0,530	574,0	32,5	50,4	30,7
	5	807	0,40	1	26,7	39,6	0,0	0,522	574,0	40,8	53,8	44,6
	6	811	0,55	2	27,1	38,3	1,8	0,286	62,4	27,2	32,1	25,3
	7	818	0,40	2	27,7	39,8	1,4	0,477	574,0	38,4	52,7	36,2
	8	824	0,40	2	28,0	38,1	0,7	0,573	574,0	40,8	54,8	39,9
	9	830	0,40	2	27,1	37,9	1,8	0,635	574,0	36,4	53,2	34,7
	10	825	0,55	2	28,3	38,1	1,8	0,501	109,4	28,6	37,1	28,7
	11	811	0,40	2	25,6	41,4	1,4	0,424	574,0	36,5	50,6	33,0
	12	785	0,45	2	25,8	40,3	0,0	0,226	49,3	26,2	30,0	29,3
	13	764	0,50	1	27,3	38,9	0,0	0,392	85,5	27,8	34,4	32,4
	14	807	0,50	1	27,1	38,1	0,7	0,266	58,0	27,3	31,8	27,4

Legenda: Alt (altitude do ponto); α (albedo médio do entorno do ponto); β (razão de Bowen); Ta (temperatura do ar); UR (umidade relativa do ar); v (velocidade do vento); SVF (fator de visão do céu no ponto); G_{act} (irradiação global incidente no ponto); Ts (temperatura superficial média); T_{rm} (temperatura radiante média); PET (temperatura fisiológica equivalente).

Figura 7 – Variação local das condições de umidade relativa do ar no horário do estudo.

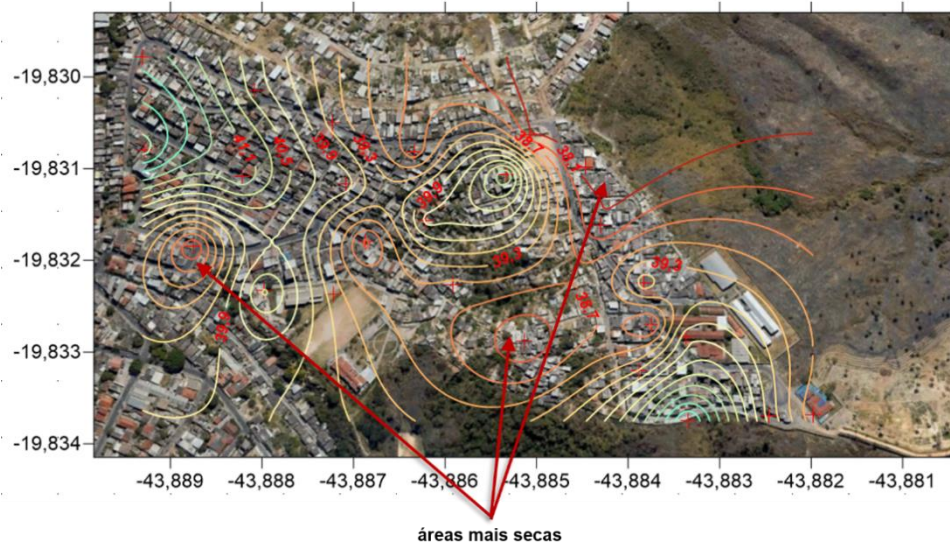
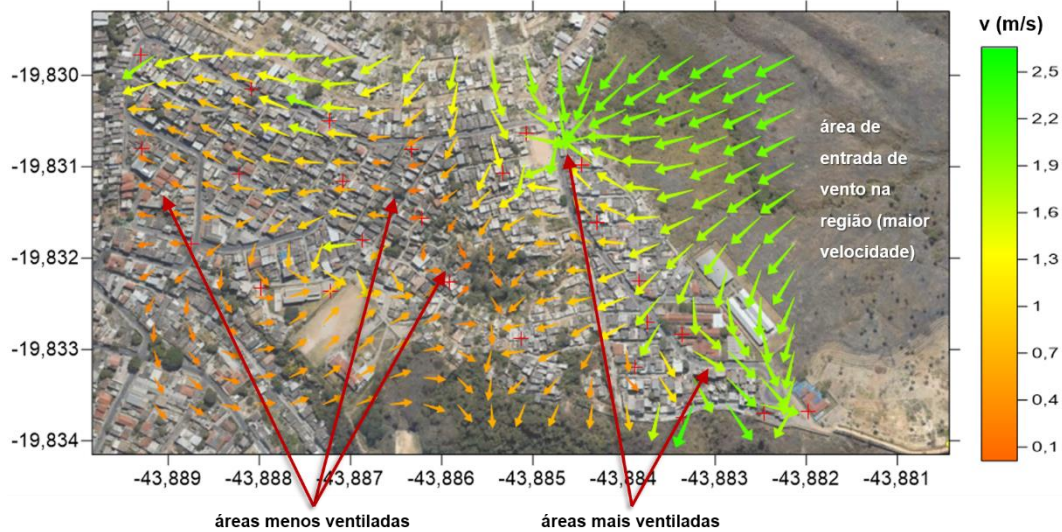
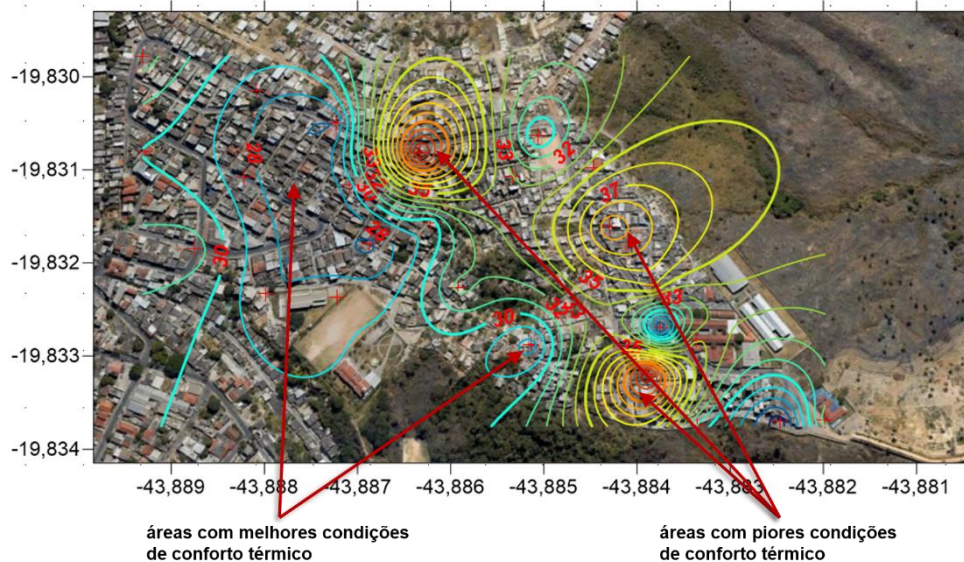


Figura 8 – Variação local das condições de ventilação urbana no horário do estudo.



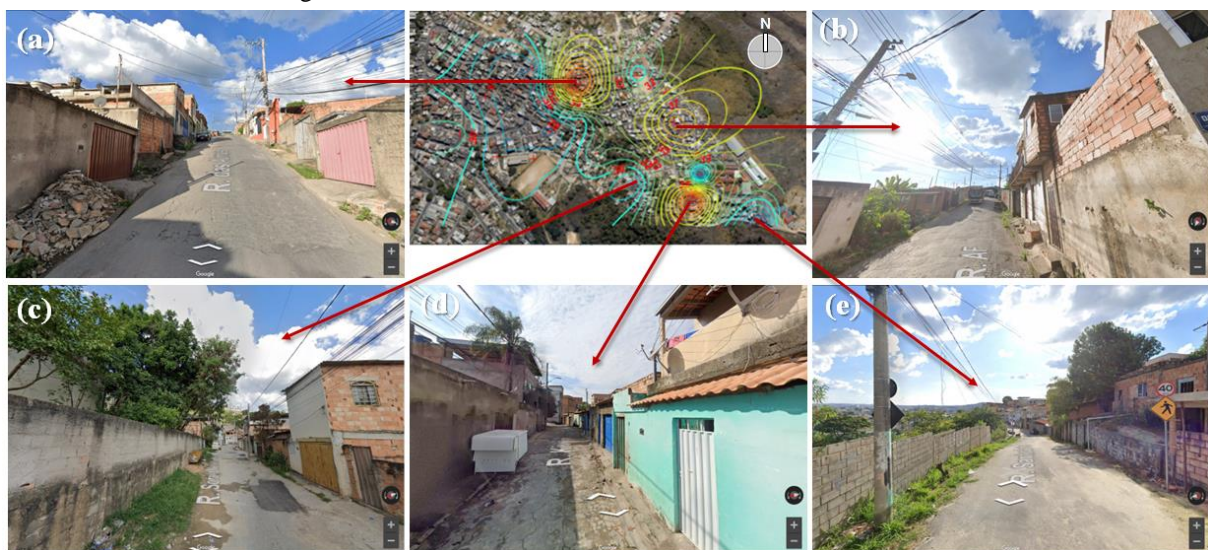
A amplitude do PET, entretanto, foi muito maior do que a amplitude da temperatura do ar, variando de 25,2°C a 44,7°C (19,5°C), com média de 31,6°C e mediana de 29,9°C. Com PET acima de 27°C, a percepção da população local aclimatada é de desconforto por calor, o que, portanto, ocorreu na maior parte da área no horário mais quente do dia, mesmo sendo no inverno. Na Figura 9 pode-se notar a variação ambiental das condições de conforto térmico. Os maiores valores de PET (acima da média) ocorreram geralmente em locais sob sol pleno, em situação de calmaria e com SVF médio de 0,507. Os menores valores (abaixo da média) ocorreram em locais que estavam sombreados pelo entorno, com velocidade média de vento de 1,8 m/s e com SVF médio de 0,373. Os valores calculados do SVF variaram de 0,222 a 0,678, com média geral de 0,439.

Figura 9 – Variação local das condições de PET no horário do estudo.



Na Figura 10 são apresentadas imagens dos pontos onde ocorreram os valores máximos e mínimos de PET. De modo geral, nota-se que os tipos de vias e de edificações são bastante homogêneos, porém a interação da urbanização com o relevo e as condições de ventilação local podem promover a variação expressiva das sensações térmicas encontradas no CPVI. As imagens (a) e (d) correspondem aos pontos com os valores máximos de PET (respectivamente pontos 9 do transecto 1 e 5 do transecto 2), enquanto o ponto 8 do transecto 1 (b) apresenta um valor intermediário, embora todos estejam acima do limite superior de conforto térmico (vide Tabela 3). Nos casos (a), (b) e (d) as edificações quase não têm afastamentos entre si e estão bastante expostas à insolação no horário pesquisado. A velocidade do vento nestas áreas está abaixo de 1m/s, pois elas sofrem a influência da rugosidade urbana a barlavento, bem como da cumeada nordeste do morro. Percebe-se, ainda, a completa falta de arborização viária, sendo as edificações os únicos elementos a lançar alguma sombra sobre as vias asfaltadas.

Figura 10 – Áreas com os maiores e menores valores de PET.



Fonte: Google Street View; As imagens são todas de abril de 2023, exceto a imagem (d), que é de junho de 2021.

Já as imagens (c) e (e), correspondentes, respectivamente aos pontos 14 e 3 do transecto 2, são os locais onde ocorreram valores menores de PET. No caso do ponto 14, mesmo com baixa velocidade de vento, o PET manteve-se no limite superior da faixa de conforto térmico. Nesta área nota-se certo afastamento entre as edificações e, embora não haja arborização viária, muitos terrenos possuem vegetação de porte arbóreo e parte dos passeios é gramada. A imagem (e) mostra características semelhantes, porém a ocorrência do menor valor de PET neste local pode ser devido ao fato de estar este trecho de rua mais exposto à ventilação, pois o muro que se vê à esquerda na imagem separa o CPVI de uma grande gleba de terreno ao sul que ainda mantém grande parte da vegetação nativa. As melhores condições de conforto térmico observadas de modo homogêneo na parte oeste do Conjunto devem-se ao sombreamento provocado pela orientação solar das encostas no horário de estudo.

As Figuras 11 e 12 ilustram, respectivamente, os gráficos de correlação linear binária entre o PET e as variáveis medidas e calculadas pelo programa Rayman PRO para cada ponto.

Como se percebe na Figura 11, não foram identificadas correlações binárias significativas entre o PET (baixos coeficientes de determinação, R^2) e as variáveis microclimáticas medidas ou o albedo médio estimado nos pontos, embora as tendências estejam coerentes, como a queda nos valores do PET com o aumento da velocidade do vento ou do albedo (significando, com isso, maior reflexão local da radiação térmica).

Já no caso das variáveis calculadas foram encontradas correlações positivas e mais significativas com o PET, como mostra a Figura 12, exceto para a variável SVF. A maior correlação linear binária ocorreu com a temperatura média das superfícies no entorno do ponto (T_s), cujo R^2 foi de 0,82; a seguir, com a temperatura média radiante (T_{mr}), cujo R^2 foi de 0,64 e, por fim, com a irradiação global incidente no ponto (G_{act} – ou seja, a que penetra no recinto urbano), com R^2 de 0,57.

Figura 11 – Gráficos de correlações binárias entre o PET e as variáveis medidas e albedos estimados.

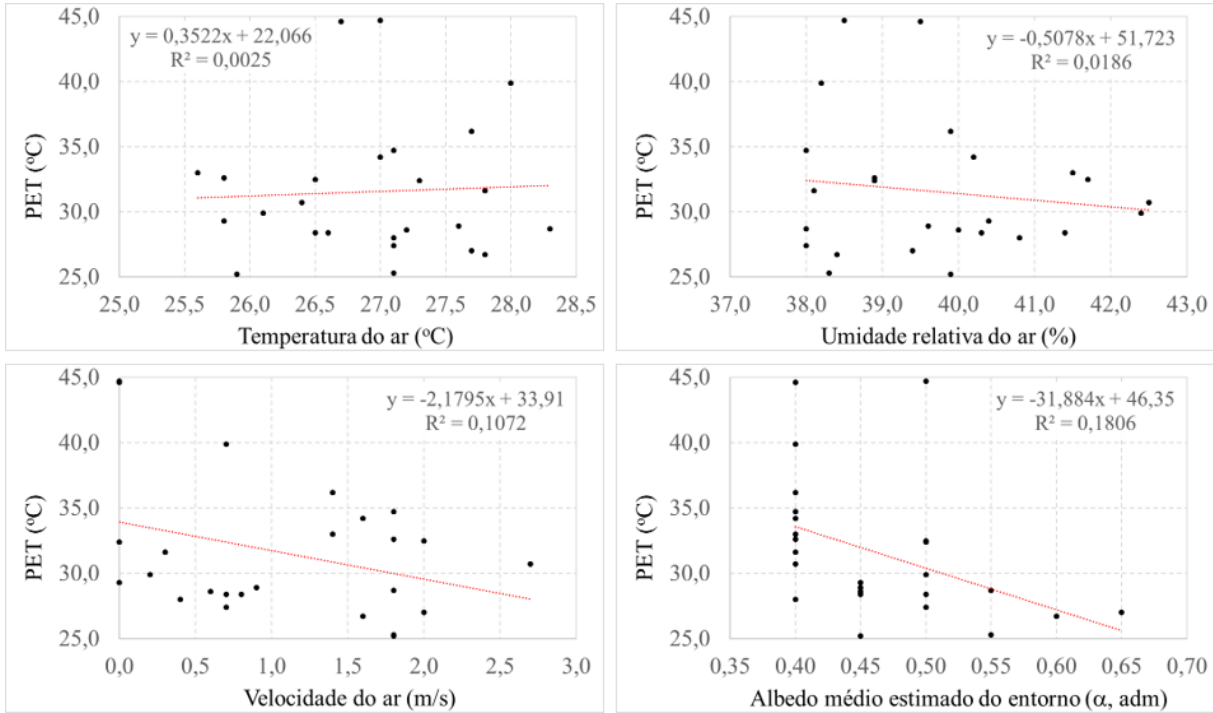
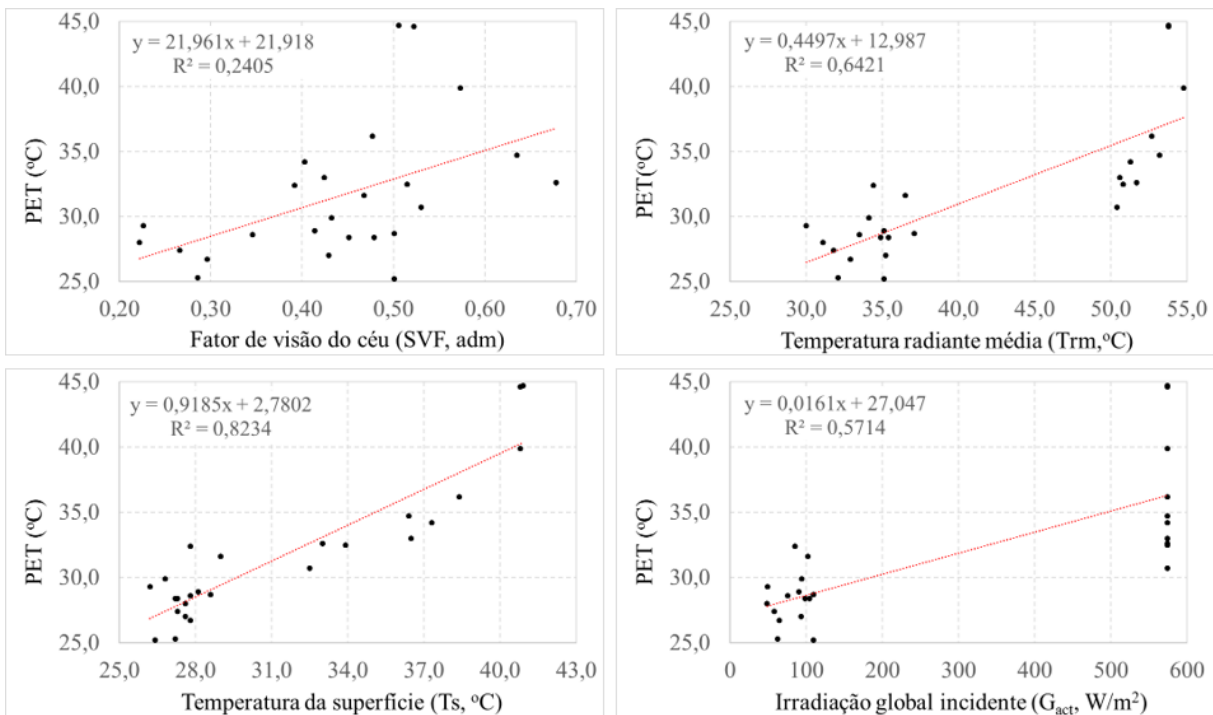


Figura 12 – Gráficos de correlações binárias entre o PET e as variáveis calculadas pelo Rayman PRO.



Estes resultados são compatíveis com os encontrados na revisão de Baruti *et al.* (2019), tais como a tendência de diminuição do valor do índice de conforto com a diminuição do SVF e o efeito positivo dos locais em sombra, em climas tropicais, sobre o conforto térmico, visto que a irradiação solar incidente tem um forte efeito sobre as temperaturas radiante média (T_{rm}) e superficial (T_s). Na Tabela 3 e nos gráficos da Figura 12 pode-se notar que os locais sombreados no horário das medições, ou seja, que apresentam a irradiação global incidente (G_{act}) menor ou até 100 W/m^2 , foram também onde ocorreram os menores valores de T_{rm} e T_s .

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Conjunto Paulo VI caracteriza-se como um assentamento informal densamente construído em um relevo movimentado e com pouquíssima arborização. Verificou-se que, no horário mais quente de um dia de inverno, ocorre desconforto térmico por calor na maior parte da área, com grande amplitude do PET, devido a efeitos conjuntos de insolação, ventilação e condições construtivas geradoras de altas temperaturas radiantes e superficiais na área. A correlação positiva encontrada entre G_{act} , T_{mr} , T_s e o PET sugere que o sombreamento das vias públicas e áreas livres pode ser a principal estratégia local para aumentar a resiliência do ambiente urbano à tendência de aquecimento e ao desconforto térmico.

Os resultados, entretanto, não podem ser generalizados, pois os topoclimas de Belo Horizonte têm características climáticas diferentes e assim também, os assentamentos informais possuem morfologias diversas, em cada lugar. Diante da complexidade do relevo e dos assentamentos informais densos, como neste caso de estudo, seria recomendável o monitoramento das variáveis microclimáticas por períodos mais longos, em horários variados, abrangendo pelo menos as condições típicas locais de verão e de inverno, com o objetivo de descrever de modo mais amplo e robusto as condições locais de conforto térmico, identificando as estratégias mais adequadas para cada lugar.

Neste trabalho, foram usados instrumentos de medição e métodos simples que, entretanto, têm custo acessível e podem ser reproduzidos facilmente, viabilizando, por exemplo, campanhas de medições em períodos diferentes do ano. Destaca-se, ainda, que as áreas de assentamentos informais são difíceis de estudar usando outros métodos e técnicas, como o geoprocessamento de produtos gratuitos de satélites, devido à alta resolução necessária das imagens, inclusive as da banda termal, para possibilitar a distinção dos vários elementos urbanos.

O programa Rayman PRO, sendo de acesso livre, mostrou-se uma ferramenta bastante útil para a estimativa de variáveis de mais difícil medição em campo, principalmente em áreas de estudo de pequeno porte, ou seja, com um número limitado de pontos de medição. Isto porque, embora seja possível inserir um arquivo de dados dos pontos na atual versão do programa, as imagens para o cálculo do SVF são inseridas individualmente, tornando o processo bastante trabalhoso para áreas maiores ou um grande número de pontos.

Neste estudo do Conjunto Paulo VI, o cálculo do PET possibilitou identificar os locais mais críticos da área em termos de conforto térmico e que, portanto, seriam prioritários em termos de intervenções para a melhoria das características ambientais. Além disso, constatou-se que as temperaturas superficiais tiveram a relação mais significativa com o PET, sendo este um indício de que a densidade construtiva e o tipo de materiais usados nas construções são fatores tão ou mais importantes do que as cores e/ou tipos de acabamentos que afetam o albedo do entorno. Isto mostra o potencial deste tipo de estudo para subsidiar ações locais de desenho urbano e de melhorias nas habitações.

7. REFERÊNCIAS

ASSIS, W. L. **O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva tempo-espaço**. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em <http://hdl.handle.net/1843/MPBB-89XH5T>

BARUTI, M. M.; JOHANSSON, E., ASTRAND, J. Review of studies on thermal comfort in warm humid climates: challenges of informal urban fabric, **Int. J. Biometeorology**, v. 63, p. 1449-1462, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01757-3>

BELO HORIZONTE. Câmara Municipal. **Lei Municipal 11.181, de 8 de agosto de 2019**. Aprova o Plano Diretor do Município de Belo Horizonte e dá outras providências, 2019.

CALLEJAS, I. J. A.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G. *et al.* Patterns of energy exchange for tropical urban and rural ecosystems located in central Brazil, **J. Urban and Environmental Engineering**, vol. 13, n. 1, p. 69-79, 2019. <https://doi.org/10.4090/juee.2019.v13n1.69-79>

DIALESANDRO, J.; BRAZIL, N.; WHEELER, S.; ABUNNASR, Y. Dimensions of thermal inequity: neighborhood social demographics and urban heat in the Southwestern U.S. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, v. 18, 18030941, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijerph18030941>

FERREIRA, R. N. Vulnerabilidade social e acesso a equipamentos públicos de educação infantil, cultura e lazer no município de Belo Horizonte – MG. **Geoinf. Rev. Programa Pós-Graduação em Geografia**, Maringá, v. 11, n. 2, p. 4-27, 2019.

FOLLADOR, M.; ROCHA, A.; VAZ, C. *et al.* **Análise de vulnerabilidade às mudanças climáticas do município de Belo Horizonte**. Relatório Final para a Prefeitura Municipal. Belo Horizonte: Way Carbon, junho de 2016. Disponível em http://bhgeo.pbh.gov.br/sites/geoportal.pbh.gov.br/files/BHGEO/RECURSO_METADADO/VULNERABILIDADE/ESTUDO_VULNERABILIDADE_AMBIENTAL.pdf. Acesso em: 18 ago. 2017.

FREITAS, R.; ALVES, J.; SILVA, T.; AZEREDO, J. Densificação construtiva e acúmulo de calor: o caso de Recife, PE. In: XV ENCONTRO NACIONAL e XI ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2019, p. 518-527.

GROAT, L.; WANG, D. Simulation and modeling research. In: GROAT, L.; WANG, D. **Architectural research methods**. N. York: John Wiley. 2002. p. 275-300.

HIRASHIMA, S. Q. S.; ASSIS, E. S.; NIKOLOPOULOU, M. Daytime thermal comfort in urban spaces: a field study in Brazil, **Building and Environment**, vol. 107, p. 245-253, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.006>

HÖPPE, P. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **Int. J. Biometeorol.**, v. 43, p. 71-75, 1999. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo 2022**. Panorama. Mapas. Disponível em:

https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/mapas.html?localidade=3106200&recorte=setores_censitarios. Acesso em: 25 mar. 2024.

KNEZ, I.; THORSSON, S. Influences of culture and environmental attitude on thermal, emotional and perceptual evaluations of a public square. **Int. J. Biometeorology**, v. 50, p. 258-268, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0024-0>

LABSOL (Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul). **Radiasol 2**. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/labsol/download>. Acesso em: 06 abr. 2022.

MAITELLI, G. T. Balanço de energia estimado para a cidade de Cuiabá: uma abordagem de balanço de energia pelo método de Bowen, **Fórum Patrimônio**, vol. 4, n. 1, 2010, 32 pp.

MATZARAKIS, A.; MAYER, H. Another kind of environmental stress: thermal stress. **WHO News**, v. 18, p. 7-10, 1996.

MATZARAKIS, A.; MAYER, H.; IZIOMON, M. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. **Int. J. Biometeorology**, v. 43, p. 76-84, 1999. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model, **Int. J. Biometeorology**, v. 54, n. 2, p. 131-139, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>

MAYER, H.; HÖPPE, P. Thermal comfort of man in different urban environments. **Theor. Appl. Climatol.** v. 38, p. 43-49, 1987. <https://doi.org/10.1007/BF00866252>

NASCIMENTO, L. H. D.; EMILIAVACA, S. A. S.; TAPIA, G. I. M. *et al.* Estimativa da turbidez atmosférica e aplicação do modelo de céu claro ESRA para oito localidades do Brasil. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2021, 13 pp.

NIKOLOPOULOU, M.; BAKER, N.; STEEMERS, K. Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. **Solar Energy**, v. 70, n. 3, p. 227-235, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00093-1)

NIKOLOPOULOU, M. Outdoor thermal comfort. **Frontiers in Bioscience (Schol Ed)**, v. 3, n. 4, p. 1552-1568, 2011. <https://doi.org/10.2741/245>

SALATA, F.; GOLASI, I.; VOLLARO, R. L.; VOLLARO, A. L. Outdoor thermal comfort in the Mediterranean area. A transversal study in Rome, Italy. **Building and Environment**, v. 96, p. 46-61, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.023>

SARRICOLEA, P.; SMITH, P.; ROMERO-ARAVENA, H.; SERRANO-NOTIVOLI, R.; FUENTEALBA, M.; MESEGUER-RUIZ, O. Socioeconomic inequalities and the surface heat island distribution in Santiago, Chile. **Science of the Total Environment**, v. 832, 155152, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155152>

SCHLOSBERG, D.; COLLINS, L. B. From environmental to climate justice: climate change and the discourse of environmental justice. **WIREs Climate Change**, v. 5, n. 3, p. 359-374, 2014. <https://doi.org/10.1002/wcc.275>

ZHANG, J.; YOU, Q.; REN, G. *et al.* Inequality of global thermal comfort conditions changes in a warmer world. **Earth's Future**, v. 11, e2022EF003109, 2023. <https://doi.org/10.1029/2022EF003109>

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. Instruments and Observing Methods, Report No 81. TD No 1250, 2006.

WU, S.; YO, W.; CHEN, B. Observed inequality in thermal comfort exposure and its multifaceted associations with greenspace in United States cities. **Landscape and Urban Planning**, v. 233, 104701, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104701>

AGRADECIMENTOS

As autoras gostariam de agradecer as sugestões do prof. Lutz Katzschner para o trabalho de campo, bem como aos estudantes de pós-graduação envolvidos nas medições.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.