Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO SUPERFICIAL PARA O ESTUDO DE ILHAS DE CALOR URBANAS: UM EXPERIMENTO UTILIZANDO VEÍCULO AÉREO NÃO-TRIPULADO (VANT).

Analysis of surface termal behavior for the study of urban heat islands: an experiment using unmanned aerial vehicle (UAV).

Análisis del comportamiento térmico superficial para el estudio de islas de calor urbano: un experimento con Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT).

Rafael Perussi
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo EESC-USP
rafaperussi@gmail.com.br

Gustavo Zen de Figueiredo Neves
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo EESC-USP
gustavozen@outlook.com

Gabriel Alberto Mini
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo EESC-USP
gabriel.mini@usp.br

Adriano Rogério Bruno Tech
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo FZEA-USP
adriano.tech@usp.br

Resumo: O objetivo deste estudo foi analisar a variação da temperatura superficial horizontal de diferentes tipologias de superfícies por meio de termografias utilizando uma câmera térmica embutida em um veículo aéreo não tripulado (VANT). Foram analisados os dados de temperatura de algumas tipologias de cobertura do solo (asfalto, calçada de cimento, gramado e árvores) e cobertura de edifícios (telhado de cerâmica e telha de cimento). Os resultados mostraram que houve uma maior retenção de calor pelo revestimento asfáltico, seguido pela calçada de cimento. A temperatura

do gramado era elevada durante o dia, mas à noite foi a superfície com a menor temperatura entre todas as analisadas. A copa da árvore acumulava menos calor durante o dia e demorava mais para perdê-lo durante a noite, obtendo a menor amplitude térmica. Nas superfícies de revestimento do edifício, enquanto a temperatura da cobertura cerâmica sofreu pouca variação durante o dia, a telha de cimento sofreu uma grande variação, mostrando que não é um bom isolante térmico. A análise episódica do tempo foi determinante para realizar as missões com VANT.
Palavras-chave: Clima urbano. Ilhas de calor urbana. Termografia. VANT.

Abstract: The objective of this study was to analyze the variation of horizontal superficial temperature of different typologies of surfaces through thermographies using a thermal camera embedded in an unmanned aerial vehicle (UAV). The temperature data of some typologies of ground cover (asphalt, cement sidewalk, lawn and trees) and buildings cover (ceramic roof and cement tile) were analyzed. The results showed that there was a greater retention of heat by the asphalt covering, followed by the cement sidewalk. The temperature of the lawn was high during the day, but at night it was the surface with the lowest temperature among all analyzed. The top of the tree accumulated less heat during the day and it took longer to lose it during the night, getting the lowest thermal amplitude. At the building covering surfaces, while the temperature of the ceramic roof suffered little variation during the day, the cement tile suffered a high variation, showing that it is not a good thermal insulator. The use of UAV allowed a quick acquisition of the thermographies of the selected targets. The weather analysis was a determining factor to carry out the UAV missions.
Keywords: Urban climate. Urban heat islands. Thermography. UAV.

Resumen: El objetivo de este estudio fue analizar la variación de la temperatura superficial horizontal de diferentes tipos de superficies mediante termografía utilizando una cámara térmica empotrada en un vehículo aéreo no tripulado (VANT). Se analizaron los datos de temperatura de algunos tipos de cubierta de suelo (asfalto, acera de cemento, césped y árboles) y cubierta de edificación (techo de cerámica y teja de cemento). Los resultados mostraron que hubo una mayor retención de calor por el revestimiento asfáltico, seguido por la acera de cemento. La temperatura del césped fue alta durante el día, pero por la noche fue la superficie con la temperatura más baja entre todas las analizadas. La copa del árbol acumuló menos calor durante el día y tardó más en perderlo durante la noche, obteniendo la menor amplitud térmica. En las superficies de revestimiento del edificio, mientras que la temperatura de la cubierta cerámica tiene poca variación durante el día, la teja de cemento tiene una gran variación, lo que demuestra que no es un buen aislante térmico. El análisis meteorológico episódico fue crucial para realizar misiones con VANT
Palabras clave: Clima urbano. Islas de calor urbano. Termografía. VANT.

Submetido em: 28/08/2021
Aceito para publicação em: 20/01/2022
Publicado em: 16/02/2021

1. INTRODUÇÃO

A crescente atenção dada às questões ambientais e a consequente busca de um desenvolvimento sustentável por parte das sociedades atuais têm acentuado as preocupações relacionadas aos impactos associados à transformação do ambiente natural em ambiente construído. Diversos autores têm relatado as diferenças microclimáticas promovidas nas cidades pelo processo de urbanização (LOWRY, 1967; LOMBARDO, 1985; OKE, 1987; PITTON, 1997). Sabe-se que mudanças na paisagem determinam condições que interferem diretamente na qualidade de vida dos habitantes das cidades. A definição de "ecossistema urbano", de acordo com Gómez, Tamarit e Jabaloyes (2001), refere-se à substituição do habitat natural por outro mais adequado às necessidades das pessoas atualmente. Entretanto, o ambiente artificial tem excedido a capacidade biológica de seus habitantes, que sentem necessidade crescente de equilíbrio envolvendo elementos naturais, como espaços livres de construções, presença de vegetação e água. A modificação do clima das cidades pode ser ocasionada pelos seguintes fatores: os materiais utilizados nas construções e na pavimentação; o formato das cidades; as atividades humanas geradoras de calor; a remoção das águas das superfícies e a presença de poluentes no ar (LOWRY, 1967).

O clima apresenta três escalas de abordagem: o macroclima ou mesoescala, que abrange a escala regional e se relaciona diretamente com as propriedades meteorológicas, o clima local ou escala local, que apresenta relação com as mudanças climáticas em menor escala, possibilitando averiguar modificações decorrentes da variação do relevo, e o microclima ou micro escala, que compreende as variações decorrentes da influência das edificações, dos elementos da paisagem, da geometria urbana e das propriedades dos elementos de superfície (OKE, 1987).

A introdução de geometrias complexas que compreendem cidades na paisagem natural são conhecidas por alterar drasticamente o balanço de energia na interface entre e superfície e atmosfera, isto é, a camada limite planetária. O efeito mais pronunciado detectável é o de anomalias térmicas positivas associadas à temperatura do ar urbano noturno, que são as ilhas de calor urbanas (ICU). As causas e implicações desse aquecimento dependem da escala da investigação, desde edifícios individuais ao longo de horas até áreas urbanas inteiras ao longo dos anos. Por isso, a magnitude da ICU é diretamente relevante

para estudos de saúde e conforto humano e gerenciamento de energia da construção (OKE, 1976; ALEXANDER; MILLS, 2014).

Segundo Amorim (2019) a literatura aponta três tipos principais de ilhas de calor urbanas em função da camada onde se encontram: 1 – a ilha de calor superficial diagnosticada por sensoriamento remoto, que permite o cálculo da temperatura dos alvos (OKE et. al., 2017); 2 – a ilha de calor atmosférica inferior, que Oke (1978) denominou de camada de dossel urbano (UCL), cuja temperatura é registrada entre o nível do solo e o nível médio dos telhados. Nesse caso, as temperaturas são medidas abaixo do nível do topo das edificações, por meio de diferentes procedimentos, como transectos móveis (medidas itinerantes com veículos) e pontos fixos por meio de uma rede de sensores de temperatura inseridos na malha urbana e no meio rural; e 3 - a ilha de calor da alta atmosfera urbana, a camada limite urbana, denominada por Oke (1978).

A estrutura da superfície afeta o clima local modificando o fluxo de ar, transportando o calor atmosférico e os balanços de radiação de ondas curtas e longas, enquanto a cobertura da superfície modifica o albedo, a disponibilidade de umidade e o potencial de aquecimento e resfriamento do solo (STEWART; OKE, 2012). . O uso de dados de estações meteorológicas de superfície e de termografias obtidas por câmeras especiais permite quantificar a variação térmica com base nesses tipos de uso do solo urbano, juntamente com técnicas como o sensoriamento remoto, que consiste em uma ferramenta rápida e prática na identificação de locais de concentração de calor (COSTA; FRANCO, 2013).

A principal diferença entre as imagens obtidas por VANTs e por satélite está relacionada aos diferentes níveis de resolução espacial e temporal que cada plataforma fornece. Enquanto a imagem do satélite Landsat-7 tem uma resolução espacial de 30 x 30 m de pixel, a aeronave não tripulada apresenta resolução espacial que pode ser regulada pela altitude da aeronave, variando entre centímetros até alguns metros. Já em relação à resolução temporal as aeronaves não tripuladas permitem a escolha do período de repetição do levantamento, ao contrário do satélite, o que facilita o acompanhamento dinâmico dos alvos sobre uma região. Por outro lado, uma vez que a aeronave não tripulada caracteriza-se pelos recentes avanços em tecnologias, verificam-se a inexistência de imagens de anos anteriores para se fazer comparações temporais. Outra vantagem apresentada por estas aeronaves é não estarem dependente das interferências das nuvens na obtenção das

imagens em regiões de clima tropical e subtropical. Além do baixíssimo custo de suas imagens, em comparação com imagens de satélites de alta resolução, como IKONOS e QUICKBIRD, as aeronaves não tripuladas podem operar em condições impraticáveis para plataformas orbitais e não requerem meios humanos significativos de suporte (NEWCOME, 2004) .

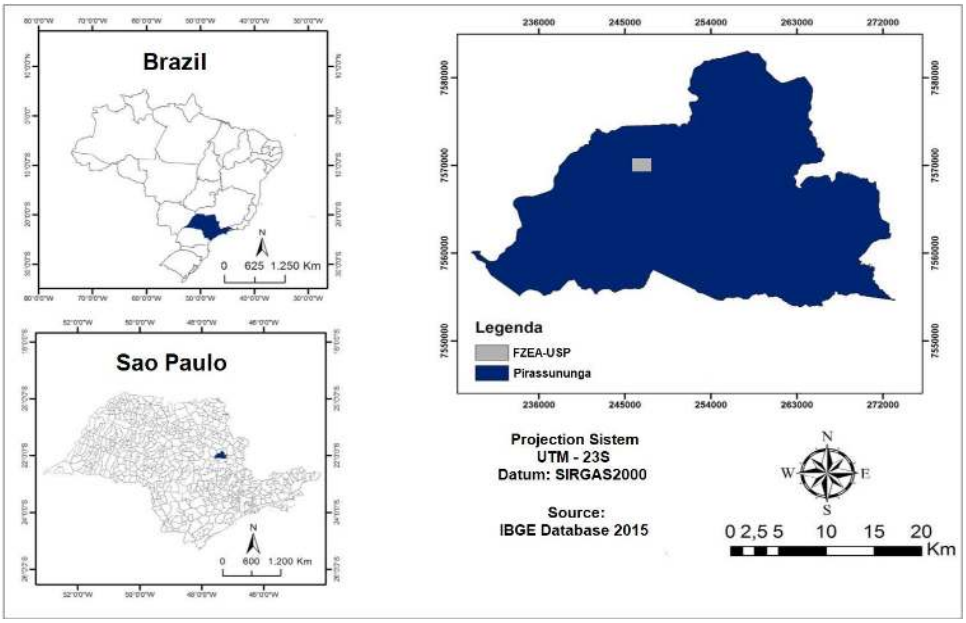
A proposição de novas metodologias para o estudo do clima urbano se faz relevante na medida em que possibilitam a obtenção de dados em micro escala de maneira mais dinâmica, otimizando o trabalho de investigação pelo pesquisador. O presente estudo tem como objetivo analisar a variação da temperatura superficial horizontal de diferentes tipologias de cobertura e também da temperatura e umidade atmosférica, utilizando VANT para obtenção das termografias e dados atmosféricos.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

O experimento foi conduzido no campus da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, FZEA-USP, no município de Pirassununga, região centro-leste do Estado de São Paulo (Figura 1). O município localiza-se a uma latitude 21º59'46" Sul e a uma longitude 47º25'33" Oeste e com altitude média de 627 metros.

Figura 1 - Localização da FZEA-USP.



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2020).

O clima da região é quente com inverno seco do tipo Cwa, de acordo com a classificação clássica de Köppen-Geiger (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). Sob a ótica dinâmica do clima, a região se caracteriza pela passagem de frentes frias ao longo de todo o ano. Segundo Monteiro (1973), a região de Pirassununga possui clima controlado por massas equatoriais e tropicais, caracterizando-se por climas tropicais alternadamente secos e úmidos. No período seco, entre os meses de abril e setembro, a frequência de chuva diminui consideravelmente e se constitui na área de inverno nitidamente mais seco do Estado de São Paulo, quando predominam sobre a região as massas de ar Tropical Continental (mTc), Tropical Atlântica (mTa) e Polar Atlântica (mPa), apresentando baixa precipitação, pouca nebulosidade, baixa umidade relativa e temperaturas médias menores que as dos períodos chuvosos. A estação chuvosa ocorre nos meses de outubro a março, devido às incursões da massa Equatorial Continental (mEc) e ao dinamismo da Frente Polar Atlântica sobre a Tropical Atlântica, que responde, em grande parte, pela gênese das chuvas que se produzem durante a atuação de sistemas frontais nesse período do ano (MONTEIRO, 1973; BARBOSA, 2009).

Os baixos totais pluviométricos no período seco estão associados à atuação do ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul), pois nesta estação tal sistema alcança sua posição mais a oeste do continente se estendendo até a região sudeste do Brasil. Eventos de chuva ocorrem quando os sistemas frontais e ciclones subtropicais e extratropicais conseguem se sobrepor ao ASAS (REBOITA, 2010). No verão, a persistente precipitação nas regiões Sudeste, sul do Nordeste, norte do Paraná e Brasil central está relacionada à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), um fenômeno típico neste período na América do Sul e se caracteriza por uma faixa de nebulosidade cnvectiva que, quando se configura, estende-se desde o Sul da Amazônia em direção ao Sudeste até o Oceano Atlântico Subtropical (QUADRO, 1994).

As missões para a obtenção das termografias foram conduzidas nas proximidades do Laboratório de Tecnologia e Sistemas de Informação (LTSI), dentro de um espaço aéreo de aproximadamente 8.000 m², conforme indicado na Figura 2.

Figura 2 – Imagem aérea com indicação da área e sentido dos voos.

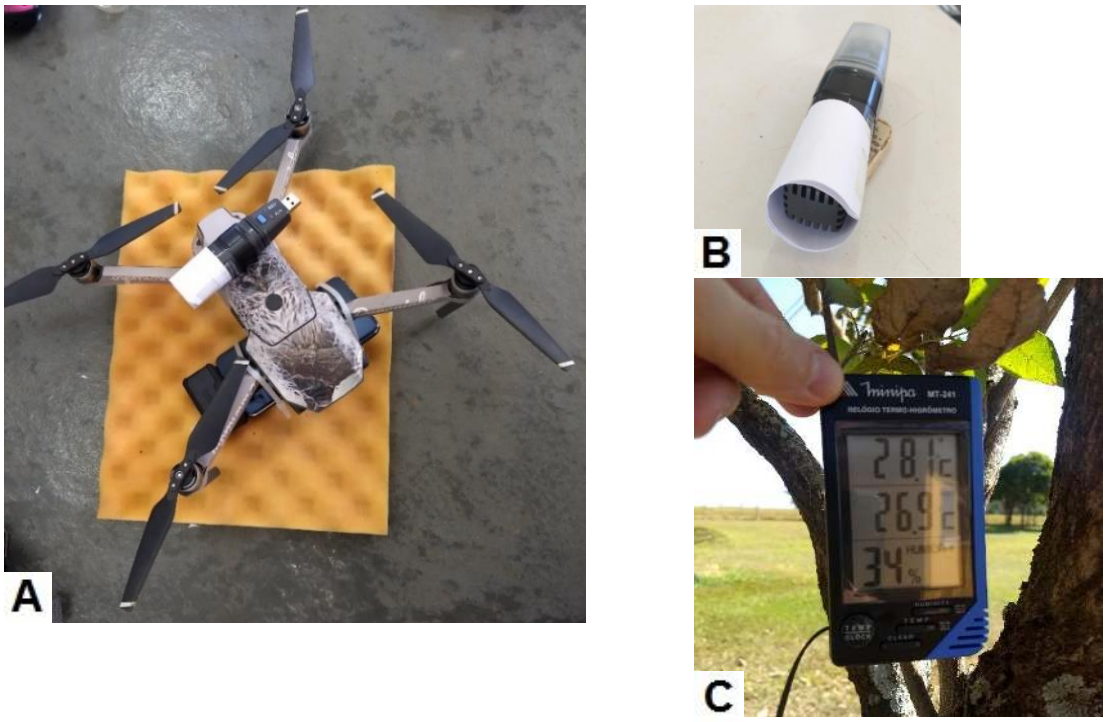


Fonte: Os autores (2021). Adaptado de Google Earth, 2021.

2.2. Instrumentação e aquisição dos dados

Para o desenvolvimento do estudo foi utilizado um VANT quadrotor DJI Mavic no qual foi embarcado uma câmera térmica Flir One conectada a um smartphone para obtenção dos dados de temperatura superficial por meio das termografias. A câmera capta imagem RGB e imagem termal, onde cada pixel da imagem possui um valor de temperatura, com resolução de 640x480 pixels. Também foi embarcado um termohigrômetro portátil com datalogger Minipa EZ Temp10, para se obter os valores de temperatura e umidade em altitude. Para se obter os valores de temperatura e umidade máxima e mínima do ambiente foi utilizado um termohigrômetro digital Minipa MT241. Os equipamentos embarcados no VANT tiveram suas pesagens aferidas para não sobrecarregá-lo e maximizar o aproveitamento da sua bateria durante as missões. As Figuras 3A, 3B e 3C mostram os equipamentos utilizados para a aquisição dos dados.

Figura 3 – (A) VANT com os equipamentos embarcados; (B) termohigrômetro portátil com proteção do sensor contra radiação solar direta e (C) termohigrômetro digital para registro da temperatura e umidade ambiente.

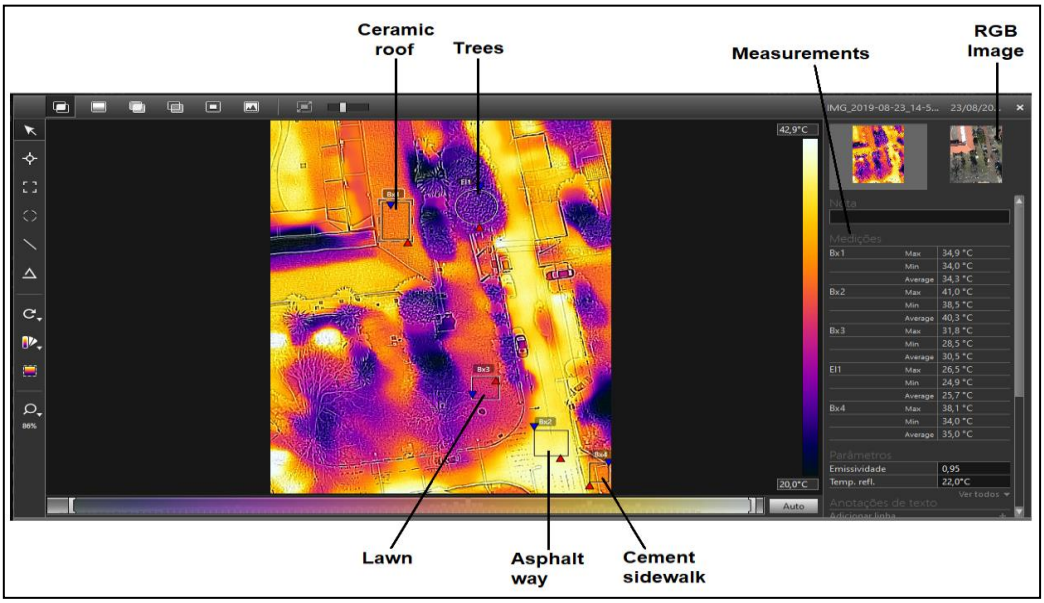


Fonte: Elaborated by the authors (2021).

O experimento foi constituído por três missões com o VANT durante o inverno, no dia 23/8/2019, com duração de 5 a 7 minutos cada. A primeira missão teve início às 12h40, a segunda às 14h50 e a terceira às 18h20. Os voos, mantidos a uma altura média de 50 metros do solo, possibilitaram a obtenção das termografias das superfícies selecionadas para o estudo, como via de asfalto, calçada de cimento, cobertura vegetal (gramado e árvores) e cobertura de edificações (telhado cerâmico e telhado de fibrocimento), permitindo a análise da variação das temperaturas de cada tipologia de superfície nos diferentes horários.

A câmera térmica foi programada para obter imagens a cada 15 segundos e as termografias foram analisadas com o programa Flir Tools (Figura 4), que permite verificar os valores de temperatura de cada pixel da imagem, calcular a média das temperaturas de uma área específica e também exportar esses valores para uma planilha.

Figura 4 -- Imagem do programa Flir Tools, utilizado para analisar as termografias, mostrando no exemplo as temperaturas máxima, mínima e média de algumas superfícies selecionadas.



Fonte: Os autores (2021).

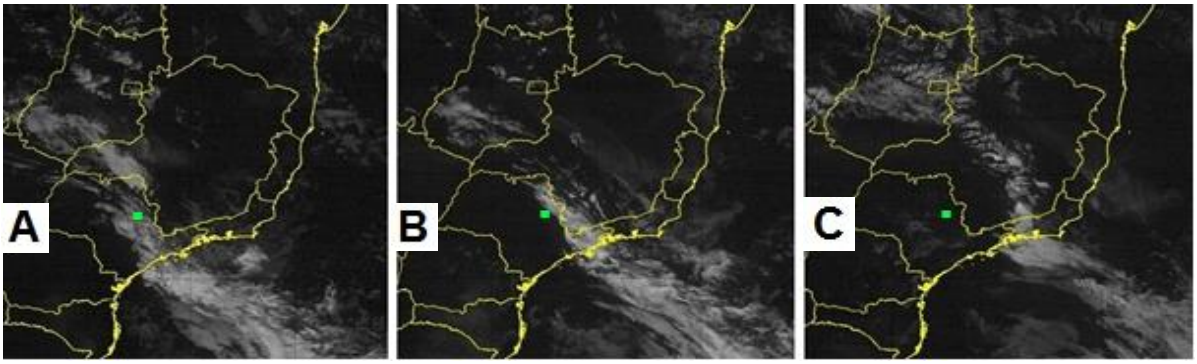
O termohigrômetro digital fixo de referência foi mantido durante todo o experimento a uma altura de 1,5 metros do solo e protegido da radiação solar direta e os dados foram registrados manualmente em 4 horários diferentes. O termohigrômetro portátil foi programado para registrar as medições a cada 30 segundos. Antes de se iniciar cada voo, o VANT era mantido a uma altura de 1,5 metros do solo por 1 minuto para permitir a estabilização do sensor em relação ao ambiente externo.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Análise episódica para aquisição dos dados

Para identificação das massas de ar atuantes foram utilizadas as análises do boletim técnico fornecido pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais CPTEC-INPE, com confirmação pelas imagens do satélite GOES-16 (Figuras 5A, 5B e 5C). Durante o dia experimental o avanço de um cavado em níveis médios da atmosfera deixou o tempo instável entre o leste de São Paulo, sul de Minas Gerais e Rio de Janeiro (INPE, 2019), causando chuva na região de Pirassununga de fraca intensidade no início da manhã.

Figura 5 - Imagens do satélite da região sudeste com destaque para localização de Pirassununga mostrando a presença de nebulosidade pela ação do cavado no dia experimental: (A) às 12h30; (B) às 15h00 e (C) às 18h30.



Fonte: INPE (2019).

3.2. Análise dos dados meteorológicos

No dia experimental a configuração de um cavado, uma zona de relativa baixa pressão atmosférica, favoreceu a formação de nebulosidade e precipitação no período da manhã, mas com estabilidade de ventos e pouca nebulosidade no período da tarde, que possibilitou a realização dos voos. A Tabela 1 mostra os valores do termohigrômetro fixo, que registrou a variação da temperatura máxima e da umidade relativa do ar durante o período do estudo.

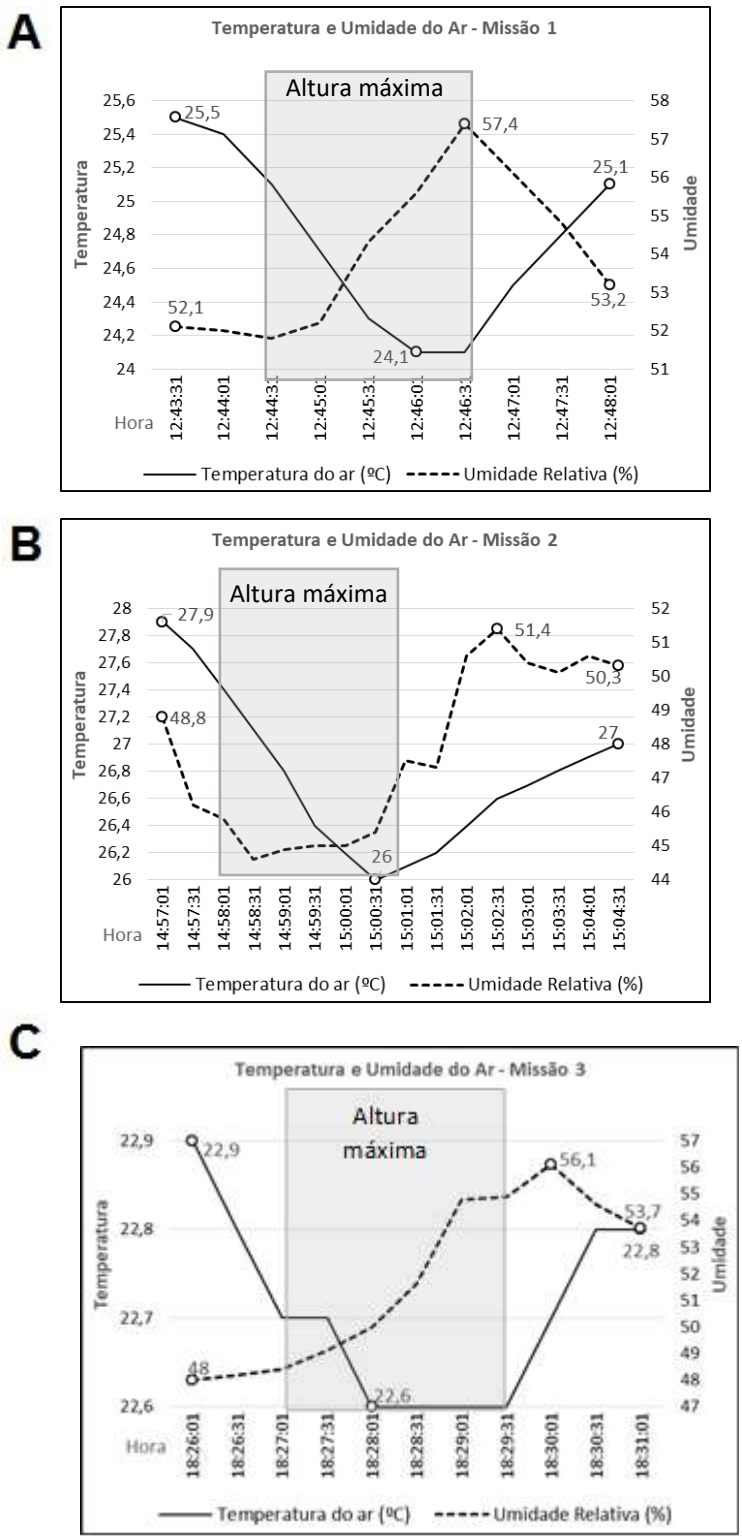
Tabela 1 - Valores de temperatura máxima e umidade relativa do ar registrados nos respectivos horários.

Indicadores	**12h30**	**14h50**	**17h50**	**18h20**
Temperatura do Ar (°C)	26,9	28,3	21,5	20,1
Umidade Relativa (%)	34	27	41	45

Fonte: Os autores (2021).

Os valores obtidos pelo termohigrômetro portátil embarcado no VANT foram exportados para uma planilha, permitindo gerar os gráficos para melhor representação e análise da temperatura e umidade relativa do ar em diferentes altitudes. As Figuras 6A, 6B e 6C e a Tabela 2 mostram os valores obtidos durante as três missões com o VANT.

Figura 6 - Gráficos da temperatura e umidade relativa do ar, destacando o período de tempo em que o VANT permanece na altitude máxima programada durante a missão 1 (A), Missão 2 (B) e missão 3 (C).



Fonte: Os autores (2021).

Tabela 2 - Valores de temperatura máxima, mínima e a amplitude térmica atmosférica e a umidade relativa do ar registrados nas respectivas missões com o VANT.

Indicadores		Missão 1	Missão 2	Missão 3
Temperatura (°C)	Máx.	25,5	27,9	22,9
	Mín.	24,1	26	22,6
	ΔT	1,4	1,9	0,3
Umidade Relativa (%)	Máx.	57,4	51,4	56,1
	Mín.	52,1	48,8	48
	ΔU	5,3	2,6	8,1

Fonte: Os autores (2021).

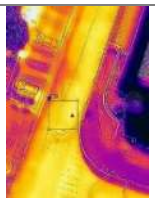
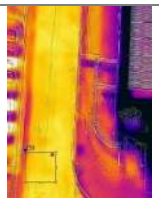
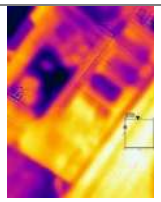
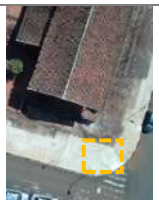
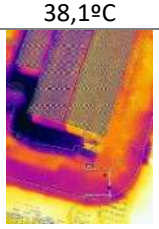
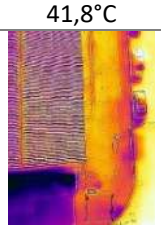
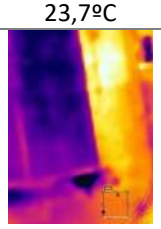
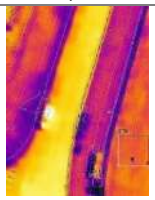
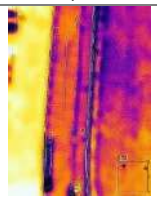
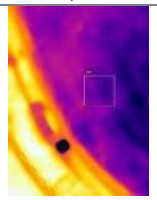
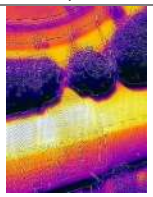
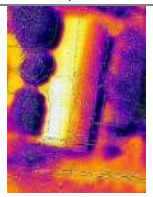
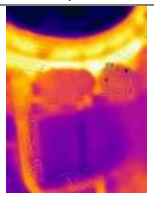
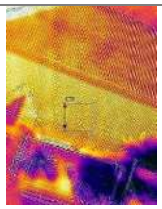
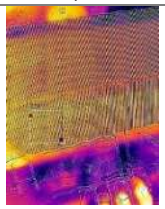
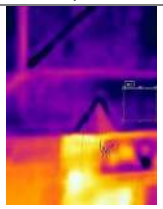
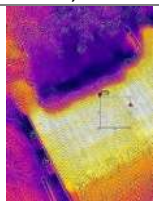
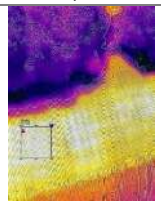
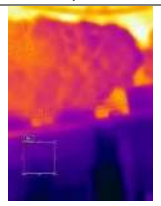
Verificou-se, nas três missões, que os valores da temperatura do ar eram menores nas camadas mais elevadas, variando 1,4°C na missão 1, 1,9°C na missão 2 e 0,3°C na missão 3, ficando esta última dentro da margem de erro do equipamento, de ±0,5°C. Já os valores da umidade relativa do ar comportavam-se de maneira contrária, ficando mais elevados conforme o VANT atingia altitudes mais elevadas, variando 5,3% na missão 1, 2,6% na missão 2 e 8,1% na missão 3.

Observa-se na missão 3 que, embora a amplitude da umidade tenha sido maior no momento em que a temperatura do ar era a menor, foi durante a missão 1 que a umidade do ar estava mais elevada tanto ao nível do solo quanto na altitude máxima do VANT, devido à influência da precipitação ocorrida pouco tempo antes de ser iniciada.

3.3. Análise das termografias

Para analisar as termografias, foram selecionadas as imagens obtidas do VANT em altitude estabilizada, permitindo a menor variação possível da distância entre a câmera e as superfícies. As tipologias de superfícies analisadas foram separadas em dois grupos: cobertura do solo (via de asfalto, calçada de cimento, gramado e árvores), e cobertura das edificações (telhado cerâmico e telhado de fibrocimento). Em cada tipologia foi selecionada uma área amostral da termografia nos três diferentes horários utilizando-se os seguintes critérios: área amostral de igual dimensão, que não tivesse sido sombreada durante o dia e sem poças d'água. Em seguida, analisou-se a temperatura média de cada área amostral e sua amplitude térmica (diferença entre a maior e a menor temperatura média entre as três missões), conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Imagem RGB e termografias das tipologias analisadas em cada missão, indicando as temperaturas médias das áreas amostrais e a amplitude térmica.

	Termografias e temperaturas médias superficiais			
Imagem RGB	Missão 1	Missão 2	Missão 3	**ΔT**
				18,1°C
Asfalto	38,1ºC	41,8°C	23,7ºC	
				11°C
Calçada	27,4°C	32,8°C	21,8°C	
				26°C
Gramado	33,7°C	38,5°C	12,5°C	
				8,5°C
Árvore	22°C	25,8°C	17,3°C	
				21,5°C
Telhado cerâmico	36,7°C	36,3°C	15,2°C	
				37,6°C
Telha fibrocimento	37,3°C	52°C	14,4°C	

Fonte: Os autores (2021).

Dentre as tipologias de cobertura do solo, a via de asfalto foi a superfície com temperatura mais elevada durante a missão 1 e também durante a missão 3, no período noturno. A temperatura da calçada de cimento foi a segunda mais baixa durante as missões 1 e 2, abaixo somente da temperatura da copa da árvore, e manteve-se com temperatura

menor do que a do asfalto durante a missão 3. Já os valores de temperatura do gramado foram superiores aos da calçada de cimento e inferiores aos do asfalto durante as missões 1 e 2, mas durante a missão 3 esteve com a temperatura entre todas as superfícies analisadas. A copa da árvore foi a superfície com as menores temperaturas durante as missões 1 e 2, e também foi a superfície que sofreu a menor amplitude térmica total.

No grupo das coberturas das edificações, a telha cerâmica foi a única superfície cuja temperatura decaiu entre as missões 1 e 2, mesmo que ligeiramente. Já a telha de fibrocimento foi a superfície com a segunda maior temperatura durante a missão 1, menor somente que a do asfalto, atingiu a maior temperatura entre todas as superfícies, durante a missão 2, e também sofreu a maior amplitude térmica total.

Na análise das áreas amostrais das termografias verificou-se que em todas as superfícies houve um aumento da temperatura entre as missões 1 e 2 com posterior decréscimo na missão 3, com exceção ao telhado cerâmico, cuja temperatura sofreu um decréscimo de 0,4°C entre as duas primeiras missões.

Analisando os tipos de coberturas do solo sem vegetação (asfalto e calçada), o asfalto mostrou-se como a superfície com maior capacidade de reter calor durante o dia e liberá-lo no período noturno. A calçada de cimento, por ser mais clara e possuir maior refletividade em relação ao asfalto, acumula menos calor e permanece com uma temperatura inferior à do asfalto no período noturno. Tanto o asfalto quanto a calçada de cimento permaneceram com temperaturas acima da temperatura do ar durante a noite, mostrando que são materiais com capacidade de continuar aquecendo o ar em contato com essas superfícies mesmo após a radiação solar ter cessado ao final do dia.

A vegetação do gramado diminui sua taxa de transpiração durante as horas mais quentes do dia, sendo que a folhagem, com uma refletividade intermediária às duas superfícies anteriores, acaba por absorver menos calor que o asfalto e passa a liberá-lo nos horários com menor temperatura atmosférica por meio da transpiração, o que permite que o vegetal perca energia e permaneça com a menor temperatura no período noturno, somado também à evaporação da água do solo. Já a vegetação arbórea, cuja copa fica mais elevada em relação ao solo, manteve a menor amplitude térmica total entre todas as superfícies analisadas.

As coberturas das edificações analisadas apresentaram diferença significativa. A temperatura do telhado cerâmico foi ligeiramente reduzida durante a missão 2, o que não aconteceu com nenhuma das outras superfícies. Essa redução pode ter ocorrido pelo fato de as telhas cerâmicas serem porosas e acumularem umidade com a chuva ocorrida pela manhã, que, ao evaporar, retira o calor do telhado. Isso favorece uma amplitude térmica total menor em comparação com a telha cimentícia, que foi registrada como as maiores temperaturas entre todas as superfícies durante as missões 1 e 2, a menor temperatura durante a missão 3 e a maior amplitude térmica total, mostrando ser um material com baixa capacidade de isolamento térmico.

A estabilidade atmosférica ao longo do estudo proporcionou voos seguros com VANT e imagens definitivas, otimizando o tempo das missões e sem a necessidade de recarregar a bateria, que é consumida mais rapidamente em dias de vento, o que pode comprometer as missões e a qualidade das imagens.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, o comportamento térmico superficial de algumas tipologias de cobertura do solo em edifícios foi analisado por meio de imagens térmicas obtidas com o auxílio de um VANT.

Os resultados obtidos evidenciaram que, dentre os tipos de cobertura do solo de vegetação, houve uma maior retenção de calor pela cobertura de asfalto, onde foi registrada a temperatura mais elevada durante o dia e também a noite, seguida da calçada de cimento, sendo que ambas foram as únicas superfícies com temperatura maior do que a temperatura do ar no período noturno, o que contribui com o fenômeno de formação das ilhas de calor urbanas. No gramado a temperatura permaneceu elevada durante o dia, chegando a estar acima à da calçada de cimento, porém a noite foi a superfície com menor temperatura entre todas as analisadas. Já a copa da árvore mostrou ser a superfície com menor variação de temperatura, ou seja, que acumula menos calor durante o dia e demora mais para perder durante a noite.

Nas superfícies de cobertura das edificações a variação das temperaturas mostraram-se bastante distintas. Enquanto a temperatura do telhado cerâmico sofreu pouca variação

durante o dia, a do telhado de fibrocimento sofreu uma variação elevada mostrando não ser um bom isolante térmico.

Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Oke (2017), que demonstrou cada material usado para construir cidades (por exemplo, concreto, asfalto, pedra, tijolo, madeira, metal, vidro, telha) mais materiais naturais (por exemplo, solos, vegetação, água) tem sua própria mistura distinta de propriedades radiativas, rugosas, térmicas e de umidade, de modo que o comportamento climático de uma superfície urbana, que compreende uma variedade de materiais em diferentes proporções, é único.

Esses dados podem ser utilizados ao se planejar estratégias para minimizar o efeito da ilha de calor urbana quando se deseja diminuir a amplitude térmica superficial podendo adotar, por exemplo, um plano de arborização urbana de modo a impedir a incidência da radiação solar direta no asfalto e nas calçadas e, onde não for possível arborizar, priorizar pavimentos com tonalidades mais claras. Ao mesmo tempo, para a cobertura das edificações devem ser evitados os telhados com baixa capacidade de isolamento, como os de fibrocimento e aqueles de tonalidades escuras, devendo ser priorizados telhados com tonalidades mais claras, de materiais porosos e também os telhados verdes, onde as coberturas convencionais dão lugar a um sistema com vegetação proporcionando um melhor isolamento térmico. Uma vez que o calor das superfícies aquece o ar em contato com elas, ao se utilizar materiais e técnicas que favoreçam um menor acúmulo de calor evita-se o aumento da temperatura atmosférica no ambiente urbano.

A utilização do VANT para o estudo das ilhas de calor urbanas em micro escala se mostrou uma ferramenta bastante satisfatória na medida em que possibilitou uma rápida obtenção das termografias dos alvos selecionados e no período de tempo programado. A análise meteorológica foi um fator determinante para identificar a massa de ar ativa e escolher o melhor período para realizar as missões com a necessária estabilidade atmosférica.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, P. J.; MILLS, G. Local Climate Classification and Dublin's Urban Heat Island, **Atmosphere**, v. 5, p. 755-774, 2014.

AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. **Revista Brasileira de Climatologia**. Ed. Especial, p. 22-46, 2019.

BARBOSA, R. V. **Estudo do campo térmico urbano de São Carlos (SP): análise da intensidade da ilha de calor urbano em episódio climático de verão.** Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

COSTA, A. S.; FRANCO, I. M. Aplicação de imagens termográficas para caracterização do calor urbano. **Rev. Ciências da Amazônia**, v. 1, n. 2, p. 18-26, 2013.

GÓMEZ, F.; TAMARIT, N.; JABALOYES, J. Green zones, bioclimatic studies and human comfort in the future development of urban planning. **Landscape and Urban Planning**, n. 55, p.151-161, 2001.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Technical Bulletin.** Available at: <http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt > Accessed in: 25/7/2019.

LOMBARDO, M. **A Ilhas de calor nas metrópoles:** o exemplo da cidade de São Paulo, Hucitec, São Paulo. 244 p., 1985.

LOWRY, W. The climate of cities. **Scientific American**, v. 217, n. 2, p. 15-24, 1967.

MONTEIRO, C. A. F. **A. dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo:** estudo geográfico sobre a forma de atlas. São Paulo: Instituto de Geografia- USP, 1973.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. London: Methuem & Ltd. A. Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York, 1978. 372p.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. Routledge, 2nd Ed , UK. 434p., 1987.

OKE, T. R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. **Atmosphere**, v. 14, p. 269–277, 1976.

OKE, T. R., MILLS, G., CHRISTEN, A. & VOOGT, J. A. **Urban Climates.** Cambridge Univ. Press, 519p, 2017.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, n. 11, p. 1633-1644, 2007.

PITTON, S. E. C. **As cidades como indicadoras de alterações térmicas.** São Paulo, 272 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1997.

QUADRO, M. F. de L. **Estudo de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul ZCAS sobre a América do Sul.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE, 1994.

REBOITA, M. S. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

RIBEIRO, M. F. B.; STOPPA, N. E.; TREVISAN, D. P.; CARVALHO, A. C. P.; CARVALHO, A. P. P.; MOSCHINI, L. E. Identificação de áreas potenciais à expansão urbana no município de Pirassununga, São Paulo, Brasil. **Revista Tecnologia e Ambiente**, v. 26, p. 106-120, 2020.

SANTOS, R. F. **Caracterização das alterações tecnogênicas do meio físico no município de Pirassununga-SP**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia), Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, 2011.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879-1900, 2012.