

CRISE CLIMÁTICA E ADAPTAÇÃO VIÁRIA: REFLEXÕES PARA A CIDADE DE SÃO CARLOS - SP COM AUXÍLIO DA PLATAFORMA URBVERDE

Gustavo Paixão Menezes¹, Vitor Antônio de Almeida Lacerda², Daniel José de Andrade³, Edmilson dos Santos Rodrigues Junior⁴, Eduardo Félix Justiniano⁵, Júlio Cesar Pedrassoli⁶, Fernando Shinji Kawakubo⁷, Rúbia Gomes Morato⁸, Marcos Roberto Martines⁹, Marcel Fantin¹⁰, Joice Genaro Gomes¹¹

¹ Universidade de São Paulo - EESC, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 - São Carlos - SP, gustavopmenezes@usp.br; ² idem endereço 1, vitorlacerda05@usp.br; ³ Universidade de São Paulo - IAU, Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos - SP, dan.jose.andrade@gmail.com; ⁴ idem endereço 1, edimilson.rodrigues.santos@usp.br; ⁵ Universidade de São Paulo – FFLCH, R. do Lago, 717 - Butantã, São Paulo - SP, e.justiniano@usp.br; ⁶ Universidade Federal da Bahia, Av. Milton Santos, s/nº - Ondina, Salvador - BA, pedrassoli.julio@gmail.com; ⁷ idem endereço 5, fsk@usp.br; ⁸ idem endereço 5, rubiagm@usp.br; ⁹ UFSCar, Rod. João Leme dos Santos, Km 110, Sorocaba - SP, mmartines@ufscar.br; ¹⁰ idem endereço 3, mfantim@sc.usp.br; ¹¹ idem endereço 3, joicegenaro@usp.br.

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise da configuração das temperaturas de superfície terrestre (TST) e dos percentuais de cobertura vegetal (PCV) no entorno das vias urbanas da cidade de São Carlos, tecendo reflexões que se inserem no âmbito das aplicações da plataforma UrbVerde. A plataforma se baseia no uso de sensoriamento remoto e geoprocessamento via computação em nuvem para análise ambiental em escala intraurbana. Os dados das imagens satelitais para o ano de 2020 denotam uma correlação negativa muito forte entre PCV e TST ($r = -0.92$). Os resultados elencados e disponibilizados em um mapa de livre acesso permitem prover suporte à decisão, com alto potencial de aplicação na construção de políticas públicas visando ao enfrentamento das mudanças climáticas em contexto de crise.

Palavras-chave — Computação em Nuvem, Google Earth Engine, Vias Urbanas, Temperatura de Superfície, Percentual de Cobertura Vegetal.

ABSTRACT

This article presents a configuration analysis of land surface temperatures (LST) and percentages of vegetation coverage (PCV) present on the surrounds of urban streets from the city of São Carlos, linking reflections within the scope of possible applications using the UrbVerde platform. The platform is based on the use of remote sensing and geoprocessing via cloud computing for environmental analysis on an intra-urban scale. The data from satellite images from 2020 denotes a very strong correlation ($p=-0.92$) between PCV and LST. The results made available in an open-access web map, allows support for decision makers, having a high application potential in the construction of public policies aiming to face climate change in a context of crisis.

Keywords — Cloud Computing, Google Earth Engine, Urban Streets, Land Surface Temperature, Percentage of Vegetation Coverage.

1. INTRODUÇÃO

O contexto de crise climática é um dos maiores desafios da contemporaneidade. Globalmente, o fracasso nos acordos de redução de emissões deve acentuar a fragilidade socioambiental urbana, criando um quadro desestabilizador [1].

O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) sistematizou dados e informações especificando como diferentes regiões do Brasil já vêm experimentando alterações em seus climas característicos [2]. Em 2022 observou-se na Índia um crescimento notório da mortalidade causado por ondas de calor, agora mais intensas e frequentes [3]. No Brasil o estresse térmico também foi vinculado ao aumento de internações por doenças cardiovasculares e respiratórias [4], agravado pela formação de ilhas de calor urbano [5]. Esses problemas estruturais se encontram vinculados ao modelo de urbanização atual, que privilegia os automóveis e se baseia na total impermeabilização das vias e na dependência de petróleo [6].

Em contraponto às ocorrências supracitadas, soluções integradas de vegetação urbana deveriam ser estimuladas uma vez que podem tornar o entorno das vias urbanas mais permeável, prevenir enchentes e regular as temperaturas [7]. As ações de arborização são as mais efetivas para a redução de temperatura no entorno das vias públicas porque previnem a exposição direta à radiação solar e o sobreaquecimento do asfalto [8]. A arborização também reduz a poluição do ar e diminui, indiretamente, o consumo de combustível e as emissões associadas à refrigeração interna de veículos expostos ao sol [9], além de aumentar o tempo de vida útil dos pavimentos.

Este artigo tem como objetivo analisar a correlação entre a temperatura da superfície terrestre (TST) no entorno de vias urbanas e o percentual de cobertura vegetal (PCV) nessas localidades. Para isso, empregaram-se métodos e técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto desenvolvidas no âmbito do projeto UrbVerde [10] para o caso de São Carlos (SP).

Localizado a noroeste da capital do estado de São Paulo, o município de São Carlos participa de duas bacias hidrográficas, a do Mogi-Guaçu e do Tietê Jacaré. Dados demográficos registraram uma população estimada em 2021 de 256.915 habitantes [11]. A área urbanizada ocupava 5,42% da área total do município em 2020 [12].

Com foco na necessidade de adaptação aos efeitos negativos do contexto de crise climática, a finalidade deste estudo é prover suporte à decisão e apoiar políticas públicas de arborização urbana.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A Temperatura de Superfície Terrestre (TST) pode ser definida como “um parâmetro físico que diz respeito ao fluxo de calor dado em função do balanço de radiação que chega e que sai de um corpo”[13]. Para aferição da TST intraurbana foram utilizadas as bandas infravermelho térmico 10 e 11 TIRS (Thermal Infrared Sensor) do satélite Landsat 8 no ano de 2020. Originalmente, essas imagens possuem resolução espacial de 100 metros. Contudo, as mesmas foram reamostradas para 30 metros. As imagens do satélite Landsat 8 têm se mostrado adequadas para estimar a temperatura da superfície terrestre (TST)¹ com uma alta resolução espacial (ERMIDA, 2020) [14]. Com base nisso, foi realizado o mapeamento da TST intra-urbana a partir da construção de um mosaico da série Landsat 8 para o ano de 2020. O desenvolvimento foi realizado via *Google Earth Engine*, de acordo com o algoritmo proposto por Ermida (2020). A abordagem é baseada em uma relação empírica entre as temperaturas de brilho (T_b) e emissividade (ε), utilizando uma simples regressão linear, A_i, B_i e C_i. A equação que calcula a temperatura da superfície terrestre é indicada abaixo.

$$TST = A_i \frac{T_b}{\epsilon} + B_i \frac{1}{\epsilon} + C_i \text{ onde,}$$

T_b = Temperatura de brilho

ε = Emissividade

A_i | B_i | C_i = Coeficientes do algoritmo determinados a partir de regressões lineares de simulações de transferência radiativa

Utilizou-se, também, o índice PCV² que denota a densidade de vegetação por área de análise, a fim de obter resultados acerca da relação entre a temperatura de superfície terrestre e vegetação em torno das vias. Para este cálculo, utilizou-se a metodologia desenvolvida por meio Projeto de Pesquisa UrbVerde (2021) [10]. Nas legendas classificadas na figura 2 foram adotados os seguintes limiares e classificações (Quadro 1):

¹ O TST é gerado a partir das bandas TIRS da Landsat Collection 2 Level-1, reflectância do *Top of Atmosphere* (TOA), temperatura de brilho TOA, dados do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) *Global Emissivity Database* (GED), ASTER Índice Normalizado de Vegetação Diferencial (NDVI) e perfis atmosféricos de altura geopotencial, umidade específica e temperatura do ar [15].

Figura 2	Limiar cobertura vegetal	Classificação
	0,00 - 0,50	Baixa
	0,51 - 2,34	Baixa-média
	2,35 - 5,76	Intermediária
	5,77 - 10,12	Média-alta
	10,13 - 33,79	Alta

Quadro 1 - Limiares e classificação.

O vetor da malha viária municipal utilizado provém da base de dados aberta e colaborativa do Open Street Maps, tendo sido acessado com a biblioteca python OSMnx [16]. Foram gerados buffer de 5 metros, com a faixa de 10 metros de largura das ruas, vias ou rodovias em trecho urbano.

3. RESULTADOS

A utilização da métrica de Percentual de Cobertura Vegetal (PCV) na escala intra-urbana gerou um cartograma que demonstra a ausência significativa de vegetação arbórea na área central e bairros adjacentes mais adensados de São Carlos. O resultado aponta ainda para áreas centrais e de bairros próximos cujas margens viárias apresentam Baixa e Baixa-média cobertura arbórea (Figura 2).

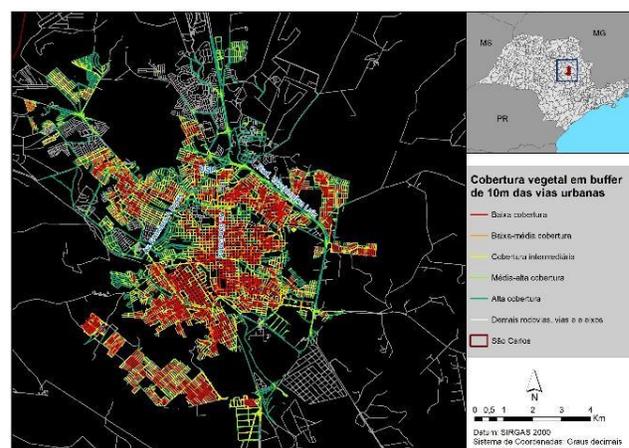


Figura 2 - Média do PCV em 2020 por ruas, vias e rodovias da área urbana. Elaborado pelos autores.

A presença de vias e principalmente rodovias com margens vegetadas (Média-alta e Alta) ocorre nas áreas mais distantes ao núcleo central de São Carlos. Excetuando-se o anel intermediário urbano, o que se percebe é uma vegetação rarefeita e composta por poucos fragmentos ao redor de vias que coexistem com uma infraestrutura viária majoritariamente desprovida de vegetação.

² O PCV, que traz a densidade de vegetação por área de análise, é obtido de maneira análoga [...], sendo que será utilizada a fração de vegetação obtida pelo Modelo Linear de Mistura Espectral - MLME (Settle & Drake, 1993; Roberts et al,1996; Batistella et al, 2004; Small, 2005; Shimabukuro et al, 2005; Wenze et al, 2006; Kumar et al, 2013) [10].

Do mesmo modo que a cobertura vegetal, a média anual da temperatura de superfície por vias urbanas apresentou uma distribuição heterogênea na área urbanizada de São Carlos no ano de 2020. Com variações entre $-6,62^{\circ}\text{C}$ a $+8,28^{\circ}\text{C}$ em relação à média anual da área urbana onde as vias com elevadas temperaturas sobrepõem a parte central, bem como bairros adjacentes e periféricos (gradiente vermelho) (Figura 3):

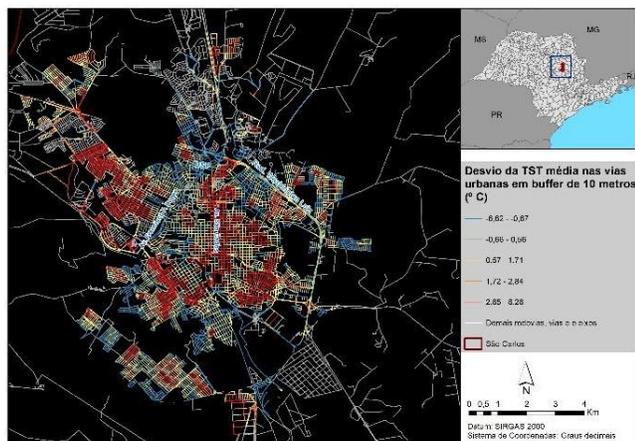


Figura 3 - Desvio da TST média em 2020 por ruas, vias e rodovias da área urbana.. Elaborado pelos autores.

Percebe-se que as temperaturas mais baixas (em azul), aparentemente são notadas em áreas cuja utilização da terra possui significativa cobertura vegetal, principalmente em terrenos cortados por córregos e onde a altitude mais baixa relativa ao relevo gera alguma influência. Contudo, nota-se um mosaico bastante heterogêneo das temperaturas em praticamente todas as vias urbanas.

4. DISCUSSÃO

Após o mapeamento dos elementos ambientais e infraestruturais foi realizado o cruzamento estatístico com produto em gráfico que exhibe a correlação entre TST(s) e a cobertura vegetal (PCV) no sistema viário de São Carlos. A partir dos parâmetros estabelecidos na metodologia, construiu-se um gráfico do desvio de TST das vias (em $^{\circ}\text{C}$) em relação ao PCV estabelecido ao redor das mesmas na área urbana da cidade de São Carlos. A curva destacada infere a média dos desvios da temperatura de superfície terrestre das vias, já os valores ao fundo, com menor opacidade, retratam todos os desvios padrões de TST em relação a uma determinada porcentagem de PCV. De antemão, é possível observar uma relação decrescente e contínua no comportamento da TST, como já foi pré-estabelecido por Farr (2013) sobre a possibilidade de reversão do aumento de temperatura pela existência de cobertura arbórea [17] (Gráfico 1).

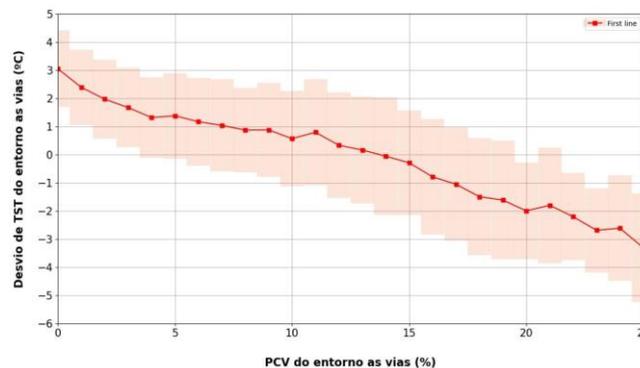


Gráfico 1 - TST(s) e PVC. Elaborado pelos autores.

Há uma relação inversa entre estes parâmetros, pois quanto maior a porcentagem de cobertura vegetal no solo ao entorno das vias, menores são os respectivos valores de temperatura de superfície das mesmas. Ademais, observa-se que com os valores de PCV entre 12% e 14%, o desvio médio da TST atinge valores próximos a 0 e a partir desse limiar passa a registrar valores negativos. Esse valor, também chamado de “ponto limite” por Santos (2021)[18], tem um enorme potencial de servir como diretriz para o nível mínimo de arborização recomendado pelos planos diretores. Apesar de terem sido apresentados valores altos de desvios brutos de TST em relação ao PCV em alguns setores, eles foram causados por outros fatores que determinam os microclimas urbanos para além da vegetação. Sendo assim, é possível observar a tendência da curva do gráfico destacado, comprovando a relação inversa entre os dois parâmetros. Desta forma, observou-se uma correlação de spearman linear, entre as duas variáveis, igual à cerca de -60%.

Sendo assim, identifica-se, a partir dessa investigação, um ferramental para a orientação de políticas públicas de arborização e constituição de infraestruturas verdes no entorno do sistema viário da cidade de São Carlos, buscando diminuir a TST nestes locais, promovendo assim o bem estar da população local e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas promovidas pelo aquecimento global.

5. CONCLUSÕES

A crise climática retratada na Nova Agenda Urbana de 2015 (Habitat III), na Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e nos relatórios do IPCC de 2022, é o que motivou o desenvolvimento deste estudo. Na escala intra-urbana do município de São Carlos (SP), ao analisar o entorno das vias urbanas, observou-se que alguns fatores exercem influência na regulação térmica e na possibilidade de formação de ilhas de calor. Tal influência pode ser notada na correlação linear e significativa entre a presença ou ausência da cobertura vegetal urbana.

Ainda que a crise climática seja pouco estudada junto à planificação e ao planejamento urbano dos municípios brasileiros, os seus efeitos e a percepção dos fenômenos climáticos extremos tem se tornado cada vez mais frequentes.

Tal constatação suscita aos tomadores de decisão a adoção de planejamentos que incorporem a governança associada às questões climáticas. Para essa mudança de governança a nível municipal, além da breve análise espacial e correlacional proposta neste artigo, outros estudos podem servir de embasamento de ações focadas na potencialização dos efeitos e influência direta da vegetação urbana na regulação termal intra-urbana e no combate às ilhas de calor [4] e [19].

Na escala municipal, o destaque dado ao planejamento urbano suportado pelas geotecnologias parece configurar o caminho mais assertivo na formulação e no acompanhamento de políticas urbanas para a mitigação de efeitos adversos da crise climática. Observando o município de São Carlos e sua área urbanizada, essa metodologia nos permitiu espacializar e dimensionar a problemática associada à incidência de ilhas de calor e a influência da cultura do automóvel e da prevalência da engenharia de tráfego sem maiores considerações com a qualidade de vida da população [5].

Por fim, este estudo preliminar se atém a elementos comuns de infraestrutura (vias e rodovias) e ao contexto climático, estando inseridos junto ao Projeto UrbVerde. A utilização do processamento de imagens em nuvem (Cloud Computing) possibilitará a equipe do projeto estender essa metodologia de forma ampla e com baixo custo para os demais municípios do estado de São Paulo, provendo não só um ferramental de acompanhamento anual desse fenômeno como também de avaliação da eficiência das políticas públicas associadas a essa temática a serem implementadas.

Agradecimento: À Pró-reitoria de Pesquisa e Inovação da Universidade de São Paulo pelo financiamento do projeto Plataforma UrbVerde através do Edital de Apoio a Projetos Integrados de Pesquisa em Áreas Estratégicas - PIPAE.

8. REFERÊNCIAS

- [1] IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Sixth Assessment Report. Working Group II, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf>.
- [2] BRASIL. Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 1: estratégia geral: portaria MMA nº 150 de 10 de maio de 2016 / Ministério do Meio Ambiente. --. Brasília: MMA, 2016. 2 v. 44 p., il. ISBN: 978-85-7738-271-2.
- [3] N. Christidis. UK MET Office: The heatwave in North India and Pakistan in April-May 2022. Technical summary.
- [4] B. F. A.. Oliveira, et al. Impactos das condições de estresse térmico na mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares no Brasil. Sustainability in Debate - Brasília, v. 11, n.3, p. 314-330, dez/2020. DOI:10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33970.
- [5] M. C. C. T. Amorim. Ilhas de calor em cidades tropicais de médio e pequeno porte: teoria e prática. 1. ed. Curitiba: Appris, 2020. v. 1. 161p.
- [6] E. Maricato. A cidade e o automóvel. Ciência & Ambiente, v. 37, p. 5-12, 2008.
- [7] EPA, U.S. Environmental Protection Agency. Reducing urban heat islands: Compendium of strategies, 2008. Rascunho disponível em. <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>.
- [8] E. G. Mcpherson; J. Muchnick. Effects Of Street Tree Shade On Asphalt Concrete Pavement Performance Arboriculture & Urban Forestry International Society of Arboriculture, , 1 nov. 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.48044/jauf.2005.039>>.
- [9] R. M Hartmann; D. M. Flores. Estudo do Impacto da Arborização no Conforto Térmico de Veículos, Consumo de Combustível Gasolina e Emissões de CO2 em Foz do Iguaçu. International Journal of Environmental Resilience Research and Science - IJERRS, v. 4, n. 1, p. 1–25, 2022. DOI: 10.48075/ijerrs.v4i1.28570. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/ijerrs/article/view/28570>.
- [10] URB VERDE. Plataforma de monitoramento das áreas verdes urbanas do Estado de São Paulo - Urb Verde. [Org] Marcel Fantin e Marcelo Montañó. Universidade do Estado de São Paulo – USP, Instituto de Arquitetura e Urbanismo IAU – Campus São Carlos. São Carlos - SP, 2021.
- [11] IBGE. Cidades e Estados - População Estimada, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-carlos.html>. Acesso em: 30 de mar. 2022.
- [12] MAPBIOMAS. Coleção V.6.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, 2020. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acessado em 03 de jun. 2022.
- [13] A. E. Arantes; S. B.Sousa; G. S. C. Soares; L. G. Ferreira. Análise da temperatura da superfície terrestre e índice de vegetação SAVI para o município de Goiânia, 2009. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.
- [14] S. L. Ermida. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. Remote Sensing, [s. l.], 2020.
- [15] USGS. United States Geological Survey: Landsat Collection 2 Surface Temperature. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-temperature>. Acesso em 29 de mar. 2022.
- [16] G. Boeing. OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks. Computers, Environment and Urban Systems 65, 126-139. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004
- [17] D. Farr. Urbanismo sustentável: desenho urbano com a natureza. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- [18] E. Santos, et al. QUALISalvador: Qualidade do Ambiente Urbano na Cidade da Bahia. Salvador, Bahia: Eudfba, pg 107. ISBN: 978-65-5630-155-6. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/handle/ri/34177>>. 2021
- [19] J. Siqueira-Gay; A. P. A. Dibo; M. A. Giannotti. Vulnerabilidade às Ilhas de Calor no Município de São Paulo: Uma Abordagem para a Implantação de Medidas Mitigadoras na Gestão Urbana. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 6, n. 2, p. 105–123, 1 ago. 2017.