



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

SENSORIAMENTO REMOTO COMO SUPORTE À DEFINIÇÃO DE AÇÕES DE MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS

*Alline Gomes Lamenha e Silva*¹; *Mônica Regina Garcez*²; *Cecilia Fortes Merighi*³; *Gracieli Bordin Colpo*⁴ & *Lélio Antônio Teixeira Brito*⁵

RESUMO

A tendência de elevação da temperatura média global influencia diretamente infraestruturas vitais, como as rodovias. A exposição de superfícies pavimentadas a altas temperaturas, pode intensificar seu desgaste e reduzir sua vida útil. Adaptar-se às mudanças climáticas é crucial para manter a integridade e funcionalidade das redes de transporte, ressaltando-se a importância de integrar variáveis climáticas às ações de manutenção de pavimentos. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar, por meio de dados obtidos por sensoriamento remoto, padrões associados à temperatura de superfície do pavimento ao longo de um trecho rodoviário urbano, situado no município de Gurupi/TO. A metodologia incluiu a análise do perfil de temperatura de superfície em 2014, 2018 e 2022 e a identificação de padrões térmicos e de áreas de temperaturas extremas (*cold* e *hot spots*). A análise revelou variações térmicas no trecho ao longo dos anos, no qual a área de *cold spots* variou entre +21% e +23,7% da superfície, e a área de *hot spots*, de 21,8% a 24,6%. No ano mais quente, também aumentaram as áreas com temperaturas estatisticamente superiores às do entorno. Em 17,4% do trecho, foram identificados *cold spots* persistentes, enquanto em 9,4% da superfície persistiram os *hot spots*. Entende-se que a inclusão de informações sobre as temperaturas de superfície pode auxiliar na adaptação dos ciclos de manutenção do pavimento às mudanças climáticas, e que o uso de dados de sensoriamento remoto pode dar suporte a tais decisões, favorecendo a resiliência e sustentabilidade nas ações de manutenção.

PALAVRAS-CHAVE: mudanças climáticas; padrões térmicos; sensoriamento remoto, conservação de pavimentos.

ABSTRACT

Increasing average global temperatures trend directly influences vital infrastructure such as roads. The exposure of paved surfaces to high temperatures can intensify their deterioration and reduce their remaining life. Adapting to climate change is crucial to maintaining the integrity and functionality of transportation networks, highlighting the importance of integrating climate variables into pavement maintenance actions. In this context, the aim of this study is to analyze, using remote sensing data, patterns associated with pavement surface temperature along an urban segment located in Gurupi/TO, Brazil. The methodology included analyzing the surface temperature profile in 2014, 2018 and 2022 and identifying thermal patterns and areas of extreme temperatures (cold and hot spots). The analysis revealed thermal variations in the segment over the years, in which cold spots areas ranged from +21% and +23.7% of the surface, and that hot spots areas, varied from 21.8% to 24.6%. In the hottest year, areas with statistically higher temperatures than the surrounding area also increased. Persistent cold spots were identified in 17.4% of the surface, while hot spots persisted in 9.4% of this area. Including information on surface temperatures can help to adapt maintenance cycles to climate change, and the use of remote sensing data can support decisions, promoting resilience and sustainability in maintenance actions.

KEY WORDS: climate change; thermal patterns; remote sensing, pavement maintenance.

¹ Instituto Federal de Alagoas, e-mail: alline.silva@ifal.edu.br

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: monica.garcez@ufrgs.br

³ Ecorodovias, e-mail: Cecilia.Merighi@ecorodovias.com.br

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: gracieli.colpo@ufrgs.br

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: lelio.brito@ufrgs.br



INTRODUÇÃO

As atividades humanas, por meio da emissão de gases de efeito estufa, têm de forma inequívoca ocasionado o aquecimento global, elevando a temperatura média da superfície global em 1,1°C acima dos níveis pré-industriais (IPCC, 2023). Esse fenômeno representa não apenas uma ameaça iminente às condições climáticas, mas também traz implicações significativas para infraestruturas vitais, incluindo as redes de transporte, cuja integridade é crucial para a funcionalidade de setores essenciais como economia, educação e saúde (THACKER S et al., 2021).

Desta forma, medidas adaptativas são necessárias para proteger essas infraestruturas dos impactos adversos decorrentes do aumento das temperaturas médias. Neste contexto, políticas nacionais de adaptação às mudanças climáticas, como o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima, destacam a importância de investigar e entender a relação entre mudanças climáticas e a vulnerabilidade das infraestruturas de transporte. Tais estudos podem subsidiar a identificação de soluções para o setor (BRASIL, 2016).

Desta forma, destaca-se que os planos de manutenção da infraestrutura rodoviária devem considerar não apenas fatores relacionados às condições de tráfego e às características próprias do pavimento, mas também ao clima e ao meio ambiente. Tais aspectos exercem uma influência direta na vida útil do pavimento, na irregularidade da superfície, em sua estrutura, nos materiais e na sua capacidade de suportar cargas de transporte (SONG *et al.*, 2018). Desconsiderar esses aspectos durante a construção e manutenção das estradas pode resultar em danos prematuros, redução da vida útil e aumento dos custos de manutenção.

No contexto das ações de manutenção dos pavimentos rodoviários, tradicionalmente, as temperaturas locais não são explicitamente consideradas. Ressalta-se, então, a necessidade do desenvolvimento de estratégias que possibilitem incorporar essa variável às práticas de manutenção. Assim, dados sobre a variabilidade espacial das temperaturas locais são essenciais para orientar essas estratégias.

REVISÃO BIBLOGRAFICA

A utilização de dados de sensoriamento para a avaliação do campo térmico dos territórios vem ganhando destaque, contemplando estudos que objetivam mensurar como as propriedades térmicas dos materiais que constituem as paisagens urbanas e rurais influem nas mudanças climáticas. Nesse contexto, é reconhecido como as superfícies pavimentadas apresentam influência em fenômenos como, por exemplo, a formação de ilhas de calor (LUCENA *et al.*, 2013; SILVA; TORRES, 2021; WANG; BERARDI; AKBARI, 2015). As superfícies pavimentadas, durante o verão, chegam a atingir cerca de 60°C, apresentando temperaturas até 20°C mais altas que o ambiente circundante, devido a sua baixa capacidade de refletir a luz solar (baixo albedo) e alta absorção de radiação solar (NWAKAIRE *et al.*, 2020).

É importante ressaltar, todavia, que as superfícies pavimentadas não apenas influem, mas também são influenciadas pelas alterações nas temperaturas locais. As alterações climáticas afetam significativamente as infraestruturas rodoviárias globalmente, como evidenciado por estudos em



diversas regiões, que indicam um impacto econômico notável nas despesas com reparos rodoviários, caso medidas de adaptação não sejam implementadas (SARROUKH *et al.*, 2024).

Diversos estudos demonstram que o aumento das temperaturas pode ter efeitos significativos nos pavimentos, afetando diretamente seu ciclo de vida. Em rodovias, a degradação do pavimento está diretamente relacionada às alterações do material asfáltico devido ao estresse térmico, quando as temperaturas excedem os limites do projeto (BRASIL, 2016). As mudanças climáticas podem intensificar a formação de sulcos nos pavimentos e diminuir a rugosidade e a capacidade de resistência à derrapagem. O impacto nas fissuras transversais pode variar ao longo do tempo (YAO *et al.*, 2024). Além disso, as altas temperaturas e suas variações, geralmente também conduzem a deflexões significativas (LUKANEN; STUBSTAD; BRIGGS, 2000). Estudos indicam que um aumento de 5% na temperatura média é capaz de aumentar em até 12% o afundamento de trilha de rodas (BRITO; HELLER, 2017).

Diante desses desafios, o sensoriamento remoto oferece uma fonte de dados promissora para entender melhor as dinâmicas térmicas e suas implicações. O uso de imagens obtidas por sensoriamento remoto surge como uma ferramenta poderosa para ampliar a compreensão do campo térmico das superfícies (LANG; BLASCHKE, 2009). Devido à ampla disponibilidade, extensa cobertura regional e periodicidade regular, os produtos de temperatura dos sistemas de sensoriamento remoto por satélite são fontes viáveis, seja no diagnóstico dos impactos de um clima mais quente no sistema rodoviário, quanto na modelagem de cenários futuros (VINCENT; SUSHAMA, 2024).

No entanto, apesar de serem amplamente utilizadas em aplicações destinadas a várias áreas do desenvolvimento sustentável (DESPINI *et al.*, 2021), ainda são limitados os estudos que exploram o potencial desses dados para obter informações relevantes que orientem ações de manutenção do pavimento.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo a condução de um estudo-piloto para analisar, por meio de dados obtidos por sensoriamento remoto, padrões associados à temperatura de superfície do pavimento ao longo de um trecho rodoviário urbano, situado no município de Gurupi/TO.

METODOLOGIA

Para implementar a metodologia de análise sugerida, foi selecionado um segmento da rodovia BR-153/TO, especificamente entre os km 671+190 e km 677+000, situado no município de Gurupi, Tocantins. A escolha desta área de estudo ocorreu na conjuntura da duplicação de um trecho de rodovia situado na zona de transição entre o complexo Regional do Centro-Sul e a Amazônia (Figura 1).

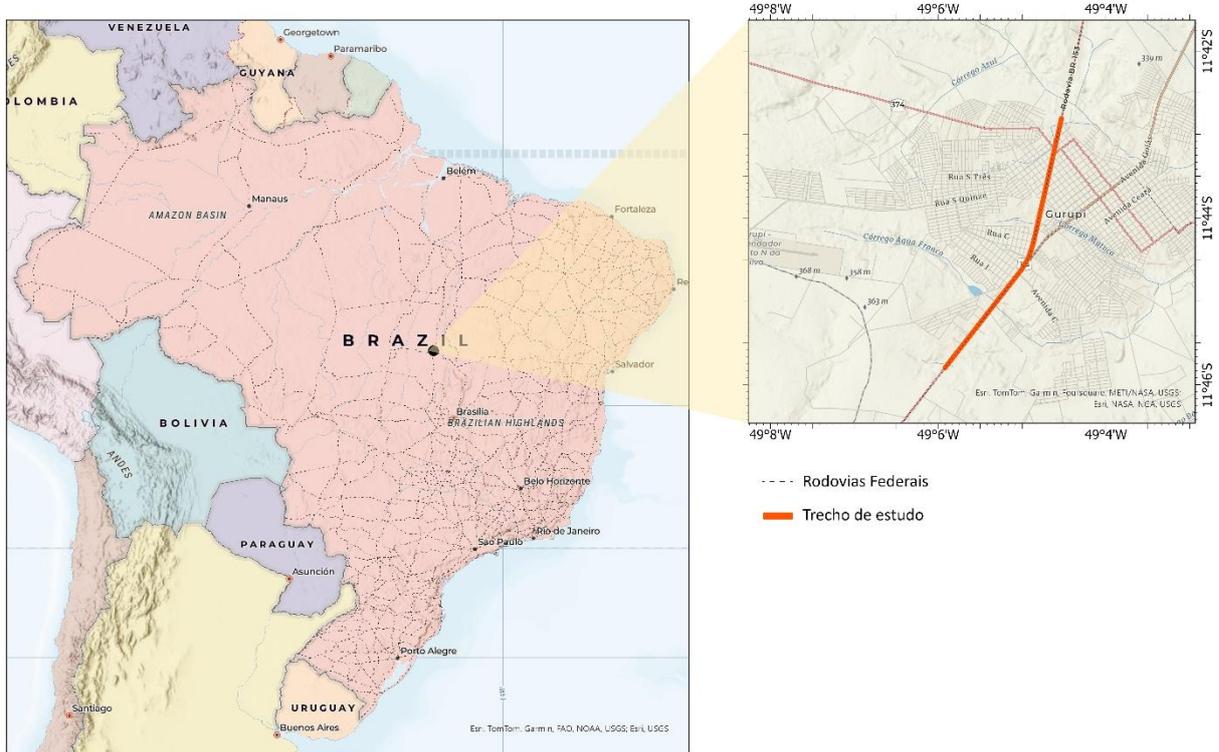


Figura 1. Localização do trecho de estudo.

Foram obtidos os seguintes produtos: i) o perfil de temperatura de superfície do trecho nos anos de 2014, 2018 e 2022; ii) a análise dos padrões térmicos espaciais; e iii) a identificação de áreas com temperaturas significativamente altas (*hot spots*) e baixas (*cold spots*). O procedimento metodológico adotado é ilustrado na Figura 2, e as etapas apresentadas estão descritas em seguida.

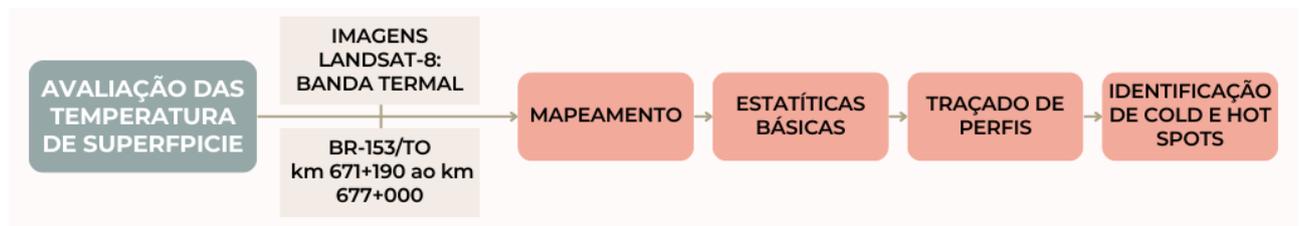


Figura 2. Fluxo metodológico.

Os dados de referência foram coletados pela banda termal do satélite Landsat-8, coleção 2, permitindo a estimativa da temperatura da superfície no momento da passagem do satélite. As imagens representativas do verão dos anos de 2014, 2018 e 2022 foram obtidas pelo cálculo da média de todas as imagens disponíveis no referido período. A obtenção dos dados, cálculo da temperatura média de superfície no verão de cada ano e recorte da área de estudo foram realizados por meio da plataforma baseada em nuvem *Google Earth Engine* (GEE).



Além do mapeamento das temperaturas de superfície ao longo do trecho para cada um dos anos, foram obtidas estatísticas básicas da temperatura de superfície do pavimento, a citar: média, máxima, mínima e desvio padrão. Foram, então, traçados os perfis de temperaturas ao longo do trecho para cada ano avaliado, e verificada a relação com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (ROUSE et al., 1973) nas imediações do trecho rodoviário. Tais etapas foram realizadas por meio do *software* ArcGIS Pro 3.2.2.

A avaliação dos agrupamentos espaciais das temperaturas de superfície foi realizada com base na estatística Getis-Ord G_i^* (GETIS; ORD, 1992), possibilitando a identificação de áreas onde estão agrupadas espacialmente as temperaturas superficiais mais elevadas (*hot spots*) ou mais reduzidas (*cold spots*), em relação às temperaturas locais. Foram considerados como *hot spots* ou *cold spots* significativos aqueles calculados com nível de confiança superior a 90%. Em seguida, foi desenvolvido um código em Python para a identificação de pontos que foram classificados como *cold* ou *hot spots* nos três anos avaliados, sendo estes identificados como *cold* ou *hot spots* persistentes. Esta etapa também foi realizada por meio do *software* ArcGIS Pro 3.2.2.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 são apresentadas as estatísticas básicas quanto à temperatura do trecho nos três anos avaliados. A análise dos dados sugere que, enquanto as temperaturas médias e mínimas mostram uma tendência de estabilização ao longo dos anos, as temperaturas máximas têm sido mais voláteis, sugerindo a influência de fatores que podem impactar os extremos de temperatura, mais do que as médias ou mínimas. Embora diversos fatores climáticos e elementos do tempo - como radiação solar, umidade, ventos e a cobertura de nuvens - desempenhem um papel crucial na determinação das temperaturas de superfície, a análise das variações locais podem fornecer indícios sobre implicações das variações térmicas, uma vez que estas podem ser significativas. A variação no desvio padrão reflete essa instabilidade, especialmente evidente no ano de 2018, que apresentou as maiores temperaturas gerais. É importante ressaltar que os dados de temperatura analisados representam um trecho relativamente pequeno, revelando a importância de se avaliar de forma localizada tais aspectos.

Tabela 1. Estatísticas de temperatura obtidas no trecho de estudo, nos três anos avaliados.

Estatística	2014	2018	2022
Temperatura Média (°C)	46,5	45,9	45,8
Temperatura Mínima (°C)	38,5	37,4	37,8
Temperatura Máxima (°C)	50,6	52,4	49,6
Desvio Padrão (°C)	2,9	3,7	2,7

A Figura 3 apresenta a distribuição espacial das temperaturas de superfície ao longo do trecho de estudo, respectivamente para o verão dos anos de 2014, 2018 e 2022. É possível observar padrões espaciais regulares na distribuição das temperaturas de superfície no período investigado, com as temperaturas mais elevadas ocorrendo consistentemente nos mesmos locais ao longo do trecho de estudo. Esta consistência nos padrões espaciais das temperaturas de superfície sugere que certas áreas do pavimento são mais vulneráveis a extremos térmicos. Isso pode ocorrer devido a uma combinação de fatores, como a composição do material, a orientação da rodovia em relação ao sol e a falta de



cobertura vegetal ou sombreamento nas proximidades. Destacando, assim, como o uso e ocupação do solo dos arredores influencia nas temperaturas às quais o pavimento é exposto.

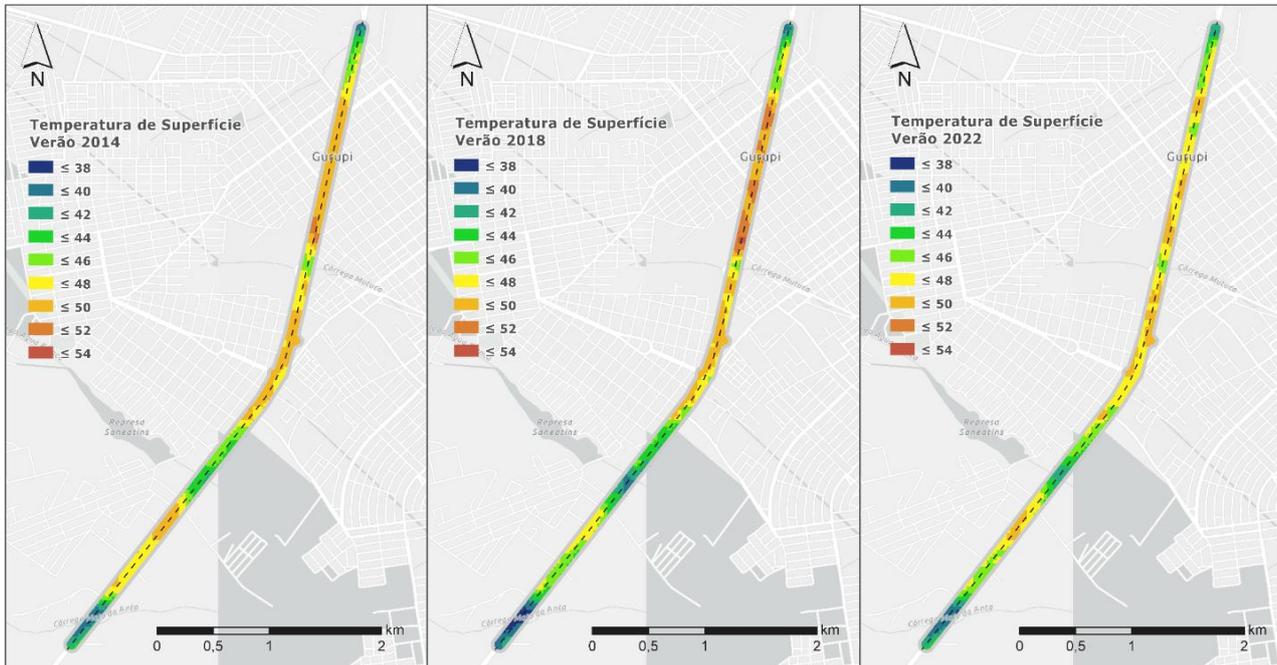


Figura 3. Temperaturas de Superfície identificadas no período de primavera/verão dos anos de 2014, 2018 e 2022.

Essa observação é corroborada pela análise do perfil de temperaturas de superfície, ilustrado na Figura 4, que revela uma distribuição térmica distinta ao longo do trecho estudado. É possível observar picos de temperatura localizados em certos segmentos da via nos três anos avaliados. Esses picos sugerem áreas onde as superfícies pavimentadas absorvem e retêm calor de forma mais intensa. Paralelamente aos picos, também destacam "vales" térmicos, ou seja, segmentos onde as temperaturas são consistentemente mais baixas em comparação com o restante do trecho estudado. Também é observada uma relação entre a cobertura vegetal nas imediações do trecho rodoviário e as temperaturas registradas. Os locais com maior índice de vegetação tendem a apresentar temperaturas mais baixas, enquanto áreas com menor cobertura vegetal exibem temperaturas mais elevadas. Esse fenômeno pode ser atribuído à propriedade da vegetação de proporcionar sombra e promover a evapotranspiração, dois processos que naturalmente resfriam o ambiente. No contexto urbano, a configuração espacial da vegetação e a ocupação do solo na faixa de influência de rodovias podem ter um impacto significativo na temperatura do pavimento, especialmente em áreas mais densamente construídas.

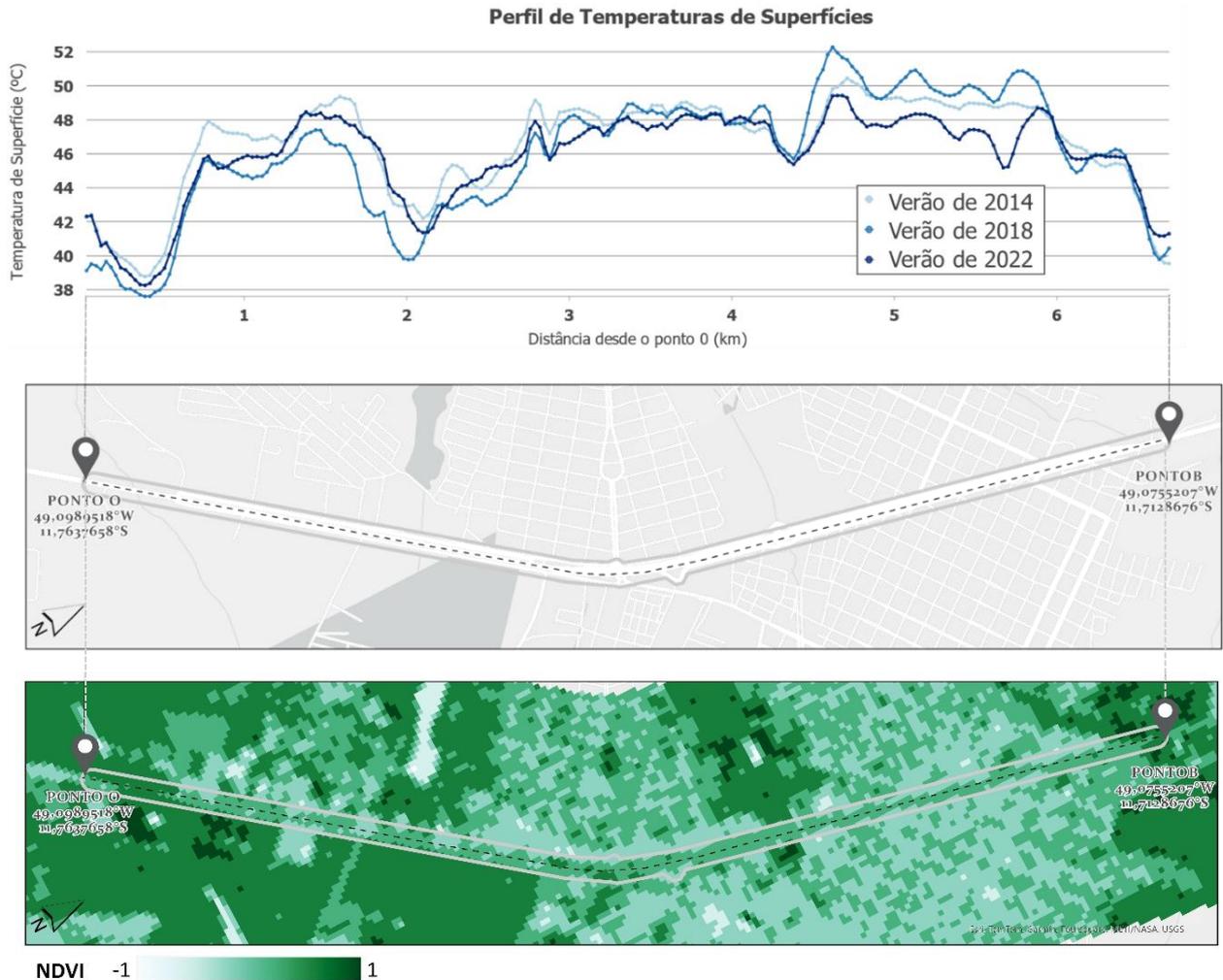


Figura 4. Perfil da Temperatura de Superfície no período de verão dos anos de 2014, 2018 e 2022, ao longo do trecho, e comparação com o índice de vegetação (NDVI).

Na Figura 5 constam os agrupamentos estatisticamente significativos de temperaturas superficiais, revelando uma distinção clara entre as áreas de maior aquecimento (*hot spots*) e de resfriamento (*cold spots*) ao longo do trecho estudado. Em 2014, aproximadamente 21% da superfície foi identificada como *cold spots*, enquanto os *hot spots* compreenderam 23,7% da área. Em 2018, nota-se um incremento nas proporções, com 21,5% da superfície para *cold spots* e 24,6% para *hot spots*, sugerindo uma correlação entre o ano de temperaturas mais elevadas e uma maior incidência de extremos térmicos. Em 2022, tanto as áreas de *cold spots* quanto as de *hot spots* apresentaram uma diminuição, ocupando 18,8% e 21,8% da superfície, respectivamente.

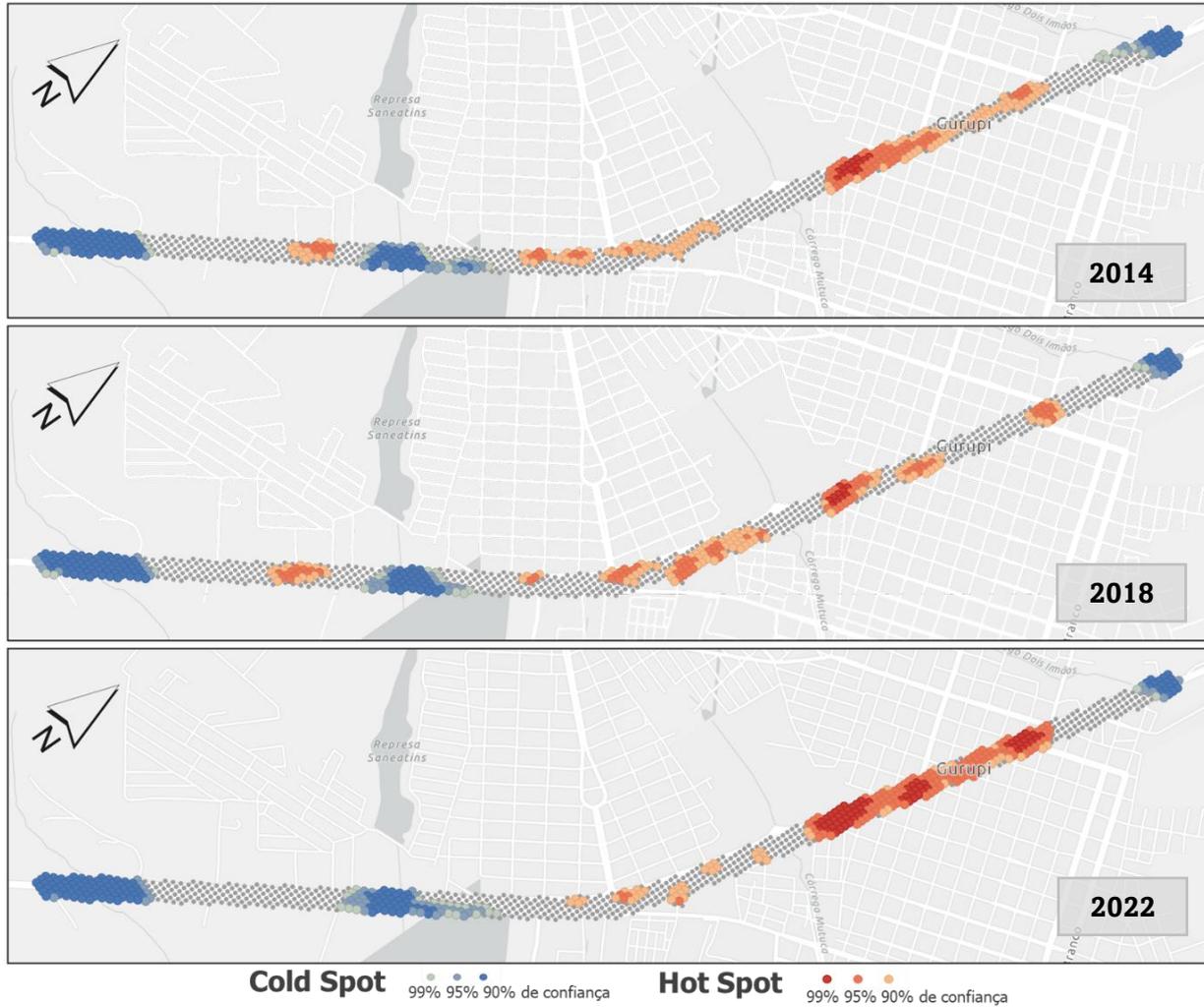


Figura 5. Identificação de *cold* e *hot spots* de temperatura superficial no trecho.

Na Figura 6, observa-se a identificação de locais onde as condições de *hot* ou *cold spots* foram consistentemente reportadas nos três anos avaliados, destacando-se como zonas de estabilidade térmica alterada.

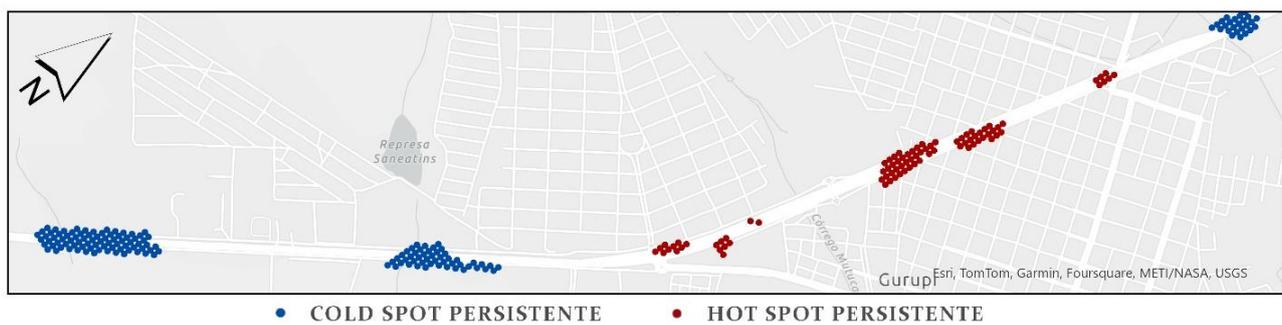


Figura 6. Identificação de *cold* e *hot spots* persistentes de temperatura superficial no trecho.



Essa identificação pode auxiliar na priorização de locais relevantes para o planejamento e a execução da manutenção rodoviária, uma vez que sua constante exposição a temperaturas extremas - significativamente mais altas do que as médias locais - as torna especialmente suscetíveis a danos ou degradação acelerada. As áreas persistentemente classificadas como *hot spots*, por exemplo, estão frequentemente sujeitas a tensões térmicas, que podem acelerar deformações ou outros tipos de falhas estruturais, principalmente em pavimentos com revestimento asfáltico, que por sua natureza viscoelástica, tende a sofrer deterioração prematura quando solicitado pela combinação de altas temperaturas e tráfego de veículos. Por essa razão, esses locais podem demandar inspeções e intervenções mais frequentes para prevenir falhas prematuras e garantir a segurança dos usuários da via.

Por outro lado, as áreas identificadas como *cold spots* persistentes, podem ter um ciclo de manutenção diferente, possivelmente mais espaçado. Embora menos propensas a danos térmicos diretos, podem enfrentar outros desafios, como o acúmulo de umidade, que também comprometem a integridade do pavimento. Nestas zonas, a manutenção pode necessitar de uma abordagem focada na melhoria da drenagem, por exemplo.

CONCLUSÕES

Considerar a questão contextual de variáveis como a temperatura pode auxiliar no desenvolvimento de estratégias de adaptação da infraestrutura rodoviária às mudanças climáticas, priorizando ações em áreas de maior risco térmico e explorando oportunidades para aumentar a resiliência do sistema rodoviário como um todo. A abordagem de considerar não apenas os valores das variáveis em pontos específicos, mas também as condições dos arredores, é fundamental para uma análise mais aprofundada dos padrões térmicos apresentados pelo pavimento, levando em conta a influência dos fatores locais e das características do ambiente circundante.

Ao considerar a temperatura como um fator determinante, surgem possibilidades de ajustes nos ciclos de manutenção dos pavimentos. A expectativa de como a temperatura afetará o desempenho das estruturas pode orientar decisões sobre quando realizar intervenções de manutenção. Nesse sentido, entende-se que os dados termais obtidos por sensoriamento remoto desempenham um papel importante como auxiliares na identificação de áreas com temperaturas. Essas iniciativas têm o potencial de promover avanços na discussão de como a gestão e o planejamento de infraestruturas viárias pode apoiar-se em dados para decisões mais conscientes, contribuindo para a sustentabilidade e a resiliência das rodovias.

Este estudo realizou uma análise da temperatura de superfície ao longo de três anos. Para trabalhos futuros, propõe-se uma investigação mais detalhada, em que todo o conjunto de dados de temperatura de superfície disponível na série histórica seja contemplado, possibilitando uma compreensão mais completa das tendências e variações ao longo do tempo. Além disso, recomenda-se a integração de dados de precipitação. A combinação desses conjuntos de dados enriqueceria a análise, permitindo avaliações fundamentadas nos efeitos das mudanças climáticas sobre a infraestrutura rodoviária. Compreender essas dinâmicas é crucial para o desenvolvimento de estratégias de manutenção de pavimentos mais eficazes e adaptadas às condições climáticas específicas de cada região.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: Estratégia de Infraestrutura**. Brasília: MMA, 2016. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80182/PNA_Estrategia_de_Infraestrutura.pdf. Acesso em: 01 mai. 2024.
- BRITO, L. A. T.; HELLER, L. F. Montagem e validação de um banco de dados climáticos para fins de avaliação do efeito da temperatura no desempenho de pavimentos flexíveis. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 4, n. 1, 2017. <https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v4n1p3-18>
- DESPINI, F. et al. Urban surfaces analysis with remote sensing data for the evaluation of UHI mitigation scenarios. **Urban Climate**, v. 35, 1 jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100761>
- GETIS, A.; ORD, J. K. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. **Geographical analysis**, v. 24, n. 3, p. 189–206, 1992. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- IPCC. Sections. In: **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]**. (P. Arias et al., Eds.). Geneva, Switzerland: [s.n.]. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 23 abr. 2024.
- LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da paisagem com SIG**. Oficina de Textos, 2009.
- LUCENA, A. J. DE et al. Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro. **Theor Appl Climatol**, v. 111, p. 497–511, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0668-0>
- LUKANEN, E. O.; STUBSTAD, R.; BRIGGS, R. Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement. Em: MCLEAN (Ed.). **Turner-Fairbank Highway Research Center**. Federal Highway Administration, United States Department of Transportation, 2000. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/98085a/98085a.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2024.
- NWAKAIRE, C. M. et al. Urban Heat Island Studies with emphasis on urban pavements: A review. **Sustainable Cities and Society**. Elsevier Ltd, 1 dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102476>
- ROUSE, J. et al. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite- 1 Symposium. **Anais...** Washington, DC, USA: 1973. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>. Acesso em: 01 abr. 2024.
- SARROUKH, M. et al. Effect of global warming and new equivalent temperature zoning maps for asphalt pavement design in Morocco. **Energy and Buildings**, v. 303, 15 jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113820>.
- SILVA, A. G. L.; TORRES, M. C. A. Proposing an effective and inexpensive tool to detect urban surface temperature changes associated with urbanization processes in small cities. **Building and Environment**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107634>.
- SONG, Y. et al. Segment-based spatial analysis for assessing road infrastructure performance using monitoring observations and remote sensing data. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, 1 nov. 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10111696>.



THACKER S et al. **Infrastructure for climate action**. Copenhagen, Denmark. 2021. Disponível em: https://content.unops.org/publications/Infrastructure-for-climate-action_EN.pdf?mtime=20211008124956&focal=none. Acesso em: 24 abr. 2024.

VINCENT, A.; SUSHAMA, L. City-scale modelling of road thermal and hydrologic characteristics and failure mechanisms: Case study of Montreal. **Sustainable Cities and Society**, p. 105484, abr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105484>.

WANG, Y.; BERARDI, U.; AKBARI, H. Comparing the effects of Urban Heat Island Mitigation Strategies for Toronto, Canada. **Energy & Buildings**, v. 114, p. 2–19, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>.

YAO, L. et al. Adaptive maintenance strategies to mitigate climate change impacts on asphalt pavements. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 126, 1 jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.104026>.