

COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE ENTRE CENA HISTÓRICA E CENA CONTEMPORÂNEA, POR TIPOS DE COBERTURA DO SOLO, PARA A ÁREA DA ZONA NORTE DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO**COMPARISON OF LAND SURFACE TEMPERATURE BETWEEN HISTORICAL AND CONTEMPORARY SCENARIOS, BY LAND COVER TYPE, FOR THE NORTHERN ZONE OF THE MUNICIPALITY OF RIO DE JANEIRO****COMPARACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE ENTRE LOS ESCENARIOS HISTÓRICO Y CONTEMPORÁNEO, SEGÚN TIPO DE COBERTURA TERRESTRE, PARA LA ZONA NORTE DEL MUNICIPIO DE RIO DE JANEIRO**

10.56238/revgeov17n1-088

Vania Maria Britto Cunha Lopes Ducap

Mestre em Arquitetura

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Endereço: Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: vaniaducap@poli.ufrj.br

Vitor Ottoni Pastore

Doutor em Geografia

Instituição: Fundação de Apoio à Escola Técnica (FAETEC)

Endereço: Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: pastorevo@gmail.com

Eduardo Linhares Qualharini

Doutor em Engenharia

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Endereço: Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: qualharini@poli.ufrj.br

RESUMO

Observando-se a piora no microclima da Zona Norte da Cidade do Rio de Janeiro buscou-se compreender causas específicas da localidade através de análise de uso e ocupação do solo imageamento por meio de sensoriamento remoto, a partir de imagens termais gratuitas e de baixa resolução. Os resultados mostram grande correlação do modo pelo qual este território está sendo modificado através do processo de verticalização: perda de áreas verdes intralote, e diminuição da umidade, bastante restringida pelo encapsulamento dos pequenos rios da região. A predominância deste último fator aponta para a necessidade de melhorias na infraestrutura verde e, principalmente, na azul, como eixo central no planejamento urbano com vistas à mitigação para a ilha de calor, melhoria estética, de biodiversidade e qualidade de vida da população.

Palavras-chave: Uso do Solo Urbano. Ilha de Calor. Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

Observing the worsening microclimate in the North Zone of Rio de Janeiro, this study sought to understand specific causes in this area through land use and occupation analysis and remote sensing imaging, using free, low-resolution thermal images. The results show a strong correlation between how this territory is being modified through the verticalization process: loss of green areas within lots, and decreased humidity, significantly restricted by the encapsulation of the region's small rivers. The predominance of this latter factor points to the need for improvements in green infrastructure and, especially, blue infrastructure, as a central axis in urban planning aimed at mitigating the heat island effect, improving aesthetics, biodiversity, and the quality of life of the population.

Keywords: Urban Land Use. Heat Island Effect. Remote Sensing.

RESUMEN

Al observar el deterioro del microclima en la Zona Norte de Río de Janeiro, este estudio buscó comprender las causas específicas de esta situación mediante el análisis del uso y la ocupación del suelo y la obtención de imágenes de teledetección, utilizando imágenes térmicas gratuitas de baja resolución. Los resultados muestran una fuerte correlación entre la forma en que este territorio se modifica mediante el proceso de verticalización: pérdida de áreas verdes dentro de los lotes y disminución de la humedad, significativamente restringida por la encapsulación de los pequeños ríos de la región. El predominio de este último factor apunta a la necesidad de mejoras en la infraestructura verde, y en especial en la infraestructura azul, como eje central de la planificación urbana para mitigar el efecto isla de calor, mejorar la estética, la biodiversidad y la calidad de vida de la población.

Palabras clave: Uso del Suelo Urbano. Efecto Isla de Calor. Teledetección.



1 INTRODUÇÃO

Limitados por características físicas e necessidades biológicas, os seres humanos se organizam em grupos próximos à disponibilidade de água e de outros recursos. Uma das maiores expressões dessa organização é a cidade. Quanto maiores as possibilidades de sobrevivência – recursos naturais, trabalho, educação, saúde – mais atrativa se torna uma cidade, o que a faz modificar-se continuamente em função do número de habitantes e das limitações geográficas. A fim de disciplinar o uso e a ocupação do solo urbano, cada cidade criou seu conjunto de normas e leis, adaptando-o às exigências do momento histórico e de suas características físicas – geográficas, geomorfológicas e climáticas. No entanto, questões geopolíticas ligadas muitas vezes conduzem tais leis para atender aos interesses do capital, que visa ocupar o espaço disponível da forma mais rentável possível. O adensamento urbano resultante tem provocado impactos diversos, como a formação de ilhas de calor, fenômeno climático caracterizado pelo aumento de temperatura de uma área em relação às áreas vizinhas, dentro de uma mesma cidade, criando um microclima e impactando a qualidade de vida da população aí assentada.

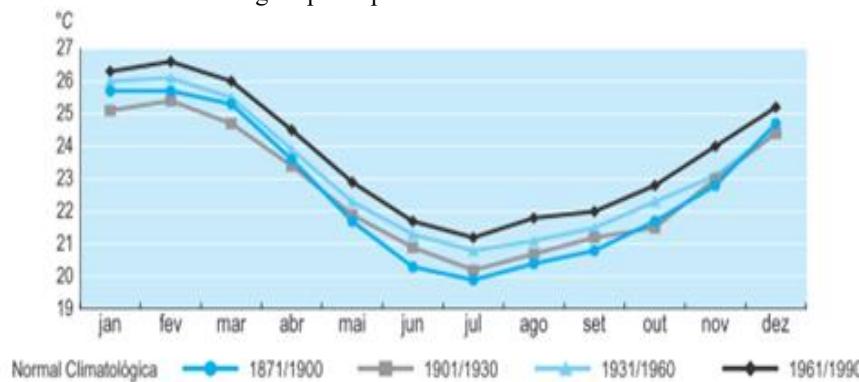
1.1 MICROCLIMA NA ZONA NORTE DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

O fenômeno da ilha de calor urbano foi observado em diversas cidades, como em Madri e Mumbai [1] em Manaus [2], São Paulo [3] e Rio de Janeiro, onde vários autores [4] [5] apontam tendências de extremos climáticos na Zona Norte da cidade e em sua conurbação metropolitana, em especial a formação de ilha de calor [6]. Estes últimos descrevem as características térmicas desta ilha de calor, mostram em mapas as temperaturas mais altas nesta região da cidade e concluem pelas tendências anuais de aumento das temperaturas mínimas e máximas bem como pela diminuição de noites e dias frios. A ilha de calor tornou-se um dos muitos problemas ambientais urbanos pois, ao contrário da controvérsia sobre um possível aquecimento global [7] [8], esta anomalia climática é detectável com precisão e a área onde ela se instala é especialmente castigada quando ocorrem eventos climáticos de temperatura extrema. Tais eventos passaram a ser observados com frequência maior do que nos séculos anteriores, levando a ONU [9] a declarar emergência climática em 2021.

Em condições climáticas originais há um ajuste natural entre eventos extremos e o retorno à normalidade, hoje conhecido como resiliência. A antropização de territórios impacta este equilíbrio, o que pode ser observado na Cidade do Rio de Janeiro. A cidade possui clima classificado como “Aw” [10], com verões quentes e chuvosos e invernos secos e amenos. A fig. 1 mostra, respectivamente, as normais climatológicas referentes às temperaturas médias mensais, a cada três décadas, na estação climatológica principal da cidade entre 1871 e 1990 [11]:



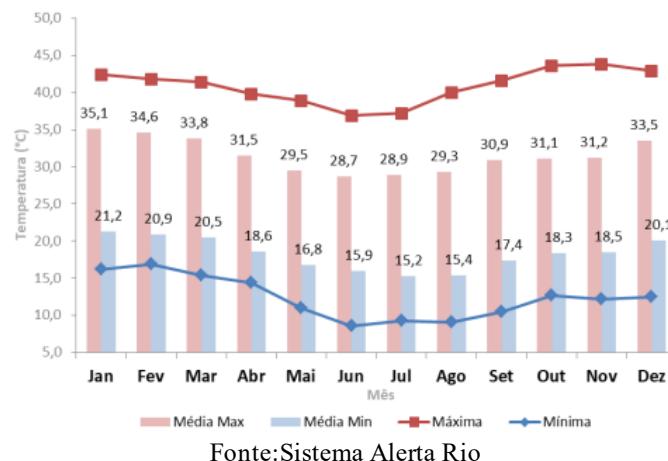
Figura 1. Normais climatológicas, a cada 3 décadas, das temperaturas médias compensadas mensais da estação climatológica principal da cidade do Rio de Janeiro



Fonte: Instituto Pereira Passos apud Instituto Nacional de Meteorologia

Na figura 1 é possível perceber o constante aumento de temperatura média compensada a cada 30 anos. No período de 1961 a 1990 ela foi mais alta do que no período anterior em todos os meses do ano. Estes dados referem-se às medições feitas na estação climatológica principal do INMET, que esteve e está situada fora da área de estudo. O INMET teve uma estação no bairro do Engenho de Dentro, mas seus dados disponíveis não estão consistidos. A partir de 2002 a prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro instalou uma estação meteorológica do Sistema Alerta Rio no bairro de São Cristóvão e, a partir desta, outras estações foram criadas. Com os dados destas estações Sistema Alerta Rio [12] disponibiliza a fig. 2:

Figura 4 – Recordes e média das temperaturas máximas e mínimas (absolutas) mensais das estações do Sistema Alerta Rio entre 2014 e 2024.



Fonte:Sistema Alerta Rio

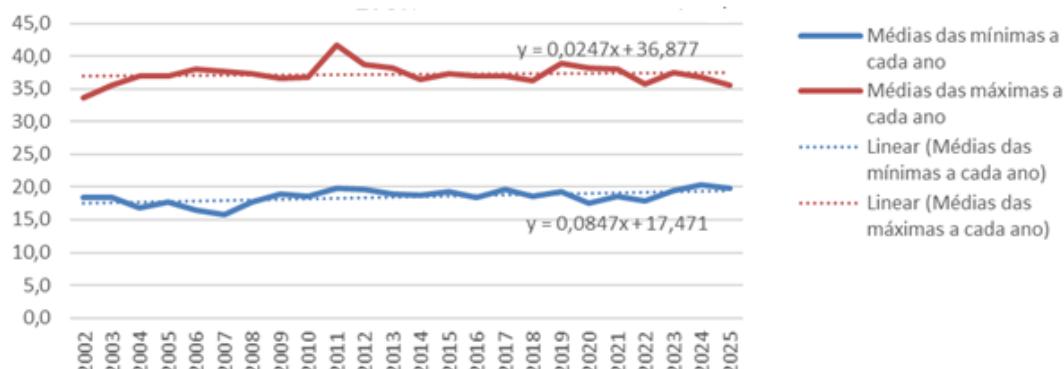
Ao se calcular as médias absolutas da figura 2 conclui-se que quase todas estão acima das calculadas para o período 1961-1990. A figura 2 permite mais uma análise: tem havido, entre 2014 e 2024, extremos de temperatura, tanto aumentando as máximas quanto diminuindo as mínimas em toda a cidade do Rio de Janeiro.

No entanto, na Zona Norte as temperaturas se comportam de maneira diferente, usualmente mais altas do que a média da cidade e das Zonas Sul e parte da Zona Oeste. Para avaliar este



comportamento procedeu-se à coleta dos dados de todas as estações meteorológicas disponíveis na Zona Norte entre 2002 e 2025 – tanto do Sistema Alerta Rio [13], quanto do Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA) [14], obtendo-se o gráfico expresso na fig. 3:

Figura 3: Evolução das temperaturas médias anuais, máximas e mínimas. na Zona Norte da Cidade do Rio de Janeiro entre 2002 e agosto de 2025



Fonte: Os autores a partir de dados do Sistema Alerta Rio e do INEA

Observam-se na figura 3 as linhas de tendência indicando aumento das temperaturas médias na Zona Norte, com valores de 0,0885 °C e de 0,0177 °C a cada ano, nas temperaturas máximas e mínimas respectivamente, resultando em acréscimos de 0,59 °C e de 2,03 °C entre 2002 e 2025 (24 anos). Estas taxas são maiores do que aquela admitida para o aumento da temperatura média global, que é de 1,5°C [15] desde a pré-industrialização (aproximadamente 125 anos). O aumento da temperatura impacta o ciclo hidrológico, pois a cada 1° C de aumento na temperatura ambiente aumenta-se, em média, 7% o teor de umidade atmosférica [16]. Há uma forte correlação entre o aumento da temperatura e a formação de grandes nuvens convectivas provocando as chuvas torrenciais e as inundações repentinas, cada vez mais comuns na área de estudo.

Ponderando que esta área tem ocupação e traçado urbano bem definidos desde, pelo menos, 1965 [17], perguntou-se o que estaria causando este aumento. A literatura aponta que é devido, principalmente, a fatores antrópicos, como densidade de ocupação do solo, emissão de calor antropogênico, geometria dos edifícios e tipo de materiais de revestimento das edificações e do solo. Este trabalho considera a hipótese de que o modo pelo qual está em curso a modificação do uso e ocupação do solo, na área de estudo, tem contribuído para o agravamento da ilha de calor, através da perda de vegetação e de impermeabilização do solo, uma vez que a Zona Norte da Cidade do Rio de Janeiro é considerada pelo Plano Diretor [18] como área de adensamento construtivo e populacional através da substituição de casas por edifícios.



1.2 O PROCESSO DE VERTICALIZAÇÃO DA ZONA NORTE DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

A Zona Norte da Cidade do Rio de Janeiro, especialmente os subúrbios e seu contínuo metropolitano ainda são ocupados, na maior parte, por residências unifamiliares, sobrados e poucos edifícios não muito altos, estes localizados principalmente nas ruas principais de centros de bairros. Aí ainda é frequente encontrar-se alto Fator de Visão do Céu e um percentual importante de vegetação intralote em jardins e quintais [19].

Uma vez esgotados os terrenos disponíveis para construção de torres, residenciais, de serviço ou de uso misto, nos bairros ‘nobres’ da cidade, a indústria da construção civil voltou-se para a Zona Norte. Entra em cena o processo de dinâmica imobiliária, conceito que expressa a modificação dos imóveis no tecido urbano, causada por diferentes motivos, sendo o principal a valorização fundiária. Às empresas do setor imobiliário interessa a construção de novos imóveis em locais onde o poder público investiu na oferta ou melhoria de serviços e buscam aproveitar ao máximo as permissões construtivas previstas em lei. Considerando-se a área de estudo, com seu tecido urbano consolidado e poucos terrenos livres, estas empresas buscam a compra de casas, sobrados, depósitos e galpões que já não atendem aos interesses de seus proprietários. Desta forma, um imóvel é demolido e em seu lugar surge outro, ocupando densamente o terreno a partir de índices de ocupação do solo muito maiores do que o anterior. Modificando drasticamente as condições encontradas no interior do lote – tipologia, altura, áreas livre e edificada, revestimentos e vegetação, a dinâmica imobiliária pode potencializar os fatores que causam a ilha de calor.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho foi criar um método que permitisse avaliar as mudanças na cobertura do solo da área de estudo e seu impacto no microclima da região. Como objetivos secundários buscou-se adotar dados abertos de sensoriamento remoto (sem custo monetário), a partir de um recorte temporal definido pela disponibilidade de dados públicos de uso e ocupação do solo, de temperatura e de imageamento.

2 MÉTODOS E INSUMOS UTILIZADOS

Para examinar a distribuição da Temperatura de Superfície Terrestre (*LST*) da área de estudo, principal pilar da análise do microclima e do conforto térmico em ambientes urbano, decidiu-se por um recorte temporal de 25 anos, entre 1999 e 2025. Foram adotadas as imagens de banda térmica da série Landsat, a única que forneceu imagens térmicas de 1999 com o benefício da gratuidade. Entretanto, esta série fornece imagens termais de satélites de média resolução, limitadas devido à escala dessas imagens (60 metros a 120 metros), insuficiente para compreender fenômenos em escalas



compatíveis com o desenho urbano e o planejamento no nível de bairros. A fim de superar esta limitação, desenvolveu-se um método de refinamento espacial (*downscaling*), para gerar produtos de *LST* com alta resolução espacial (10 metros). Este método foi desenvolvido junto à empresa GISCURSOS¹. A abordagem adotada transcendeu os modelos estatísticos lineares tradicionais, pois empregou uma aplicação avançada de Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*), que permite modelar complexas interações entre a energia da superfície e as múltiplas facetas do ambiente construído e natural [20] [21] [22]. É importante ressaltar que a *LST* não é o mesmo que a temperatura do ar, embora ambas se influenciem mutuamente.

2.1 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E INSUMOS DE DADOS

2.1.1 Área de estudo

O recorte espacial para a aplicação e validação do método desenvolvido foi a Área de Planejamento 3 (AP-3) [23], pois esta área situa-se na ilha de calor, compreende os bairros da Zona Norte do município e dispõe de imagens consistentes para a pesquisa. Um arquivo vetorial com um retângulo compreendendo a AP-3 e mais 1km para cada lado foi utilizado como máscara nos procedimentos até os cálculos de *LST* dos cenários, garantindo que a análise e a modelagem fossem específicas às características geoambientais da área de estudo e do entorno. Posteriormente, as *LST*'s foram recortadas com os limites da AP-3 para realizar a reclassificação específica para a área de estudo.

2.1.2 Insumos de sensoriamento remoto

Foram utilizados dados de múltiplos sensores para viabilizar uma análise multitemporal, comparando o cenário histórico (1999) com um contemporâneo (2025), conforme detalhado na Tabela 1, sendo as imagens de 1999 georreferenciadas de acordo com a localização das imagens Sentinel-2. Quanto à Topografia, foi gerado um Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistido (MDEHC) a partir da base cartográfica contínua de 1:25.000 do IBGE [24], que foi incluído para representar as variáveis topográficas. A tabela 1 apresenta os insumos coletados para a análise proposta:

Tabela 1. Insumos de dados utilizados no método

Cenário de Análise	Dados termais (baixa resolução)	Dados preditores (alta resolução)
Contemporâneo (2025)	Landsat 9 (Sensor TIRS) - 100m de 16/02/2025	Sentinel-2 (Sensor MSI) - 10m de 16/02/2025
Histórico (1999)	Landsat 5 (Sensor TM) - 120m de 01/02/1999	SPOT-4 (Sensor HRVIR) - de 02/02/1999 (multiespectral de 20m) e 13/08/1999 (pancromática de 10m)

Fonte: os autores, 2025

¹ GISCURSOS - <https://www.giscursos.com.br/index.html>



2.2 PADRONIZAÇÃO CARTOGRÁFICA

Para garantir a total compatibilidade espacial entre os diferentes insumos, todos as camadas vetoriais e matriciais foram sistematicamente reprojetadas para o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (*SIRGAS* 2000), projeção Universal Transversa de Mercator (*UTM*), fuso 23S (EPSG:31983). Esta padronização foi executada como uma etapa inicial e automatizada do fluxo de trabalho.

2.3 DOWNSCALING DA LST

2.3.1 Cálculo da temperatura de superfície terrestre (LST)

A *LST* foi derivada de formas distintas para cada cenário, de acordo com o nível de processamento dos dados. Para o cenário histórico (Landsat 5), um algoritmo de canal único foi aplicado, envolvendo a conversão de níveis digitais para radiância e, subsequentemente, para temperatura de brilho, com a correção final baseada na Emissividade da Superfície Terrestre (*LSE*). Para o cenário contemporâneo (Landsat 9), utilizou-se o Produto de Ciência de Nível 2 (*L2SP*), no qual o processo consiste na aplicação dos fatores de escala e *offset* fornecidos nos metadados para converter os valores digitais diretamente para graus Kelvin, antes da conversão final para graus Celsius. Este processo, fundamentado em princípios de transferência radiativa, envolveu três etapas principais:

- a) Conversão dos níveis digitais (*DN*) da imagem para radiância espectral no topo da atmosfera, utilizando os coeficientes de calibração fornecidos nos metadados de cada cena;
- b) Conversão da radiância para temperatura de brilho do satélite;
- c) Correção da temperatura de brilho para os efeitos da Emissividade da Superfície Terrestre (*LSE*), resultando na *LST* final, com conversão dos valores para graus Celsius.

A *LSE*, que descreve a capacidade de um material emitir energia termal, foi estimada a partir do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*NDVI*), aplicando-se o método da Proporção de Vegetação (PV). Esta abordagem [25] permite modelar a emissividade de pixels mistos, uma característica onipresente no mosaico urbano.

2.3.2 Modelagem preditiva com aprendizado de máquina

O algoritmo Random Forest [26] foi selecionado para a modelagem preditiva. Trata-se de um método de ensemble que constrói múltiplas árvores de decisão durante o treinamento, destacando-se pela sua alta precisão, robustez a ruídos e capacidade de determinar a importância relativa das variáveis preditoras.

O modelo foi treinado para aprender a função $LST = f_{(preditores)}$, uma abordagem estatística de



downscaling que se provou mais eficaz que métodos tradicionais, especialmente em paisagens heterogêneas como as urbanas [27]. Foram utilizadas como variáveis preditoras um conjunto de índices espectrais e dados topográficos que, conforme amplamente documentado na literatura, governam o comportamento térmico da superfície [28]. Os preditores incluem:

- a) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*NDVI*): Relacionado à atividade fotossintética e ao resfriamento por evapotranspiração;
- b) Índice de Diferença Normalizada de Área Construída (*NDBI*): Associado a áreas impermeáveis que tendem a apresentar maior absorção de calor. Somente utilizado no cenário contemporâneo devido às limitações espectrais do sensor HRVIR do SPOT-4. Assim, o cálculo do *NDBI* não foi viável para o cenário histórico, sendo o modelo treinado com os demais preditores disponíveis;
- c) Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (*MNDWI*): Para identificar corpos d'água, que atuam como reguladores térmicos. A partir do *MNDWI* foi gerada uma máscara de água, que foi subsequentemente aplicada para corrigir valores anômalos de *NDVI* sobre superfícies líquidas, garantindo a qualidade dos preditores inseridos no modelo [29];
- d) Elevação: Derivada do MDEHC.

2.3.3 Validação do modelo e análise de incerteza

A performance e a capacidade de generalização do modelo foram avaliadas rigorosamente por meio de uma validação cruzada k-fold ($k=10$). Este procedimento divide os dados amostrais em 10 subconjuntos, treinando e validando o modelo 10 vezes, o que resulta em uma métrica de desempenho (coeficiente de determinação, R^2) muito mais estável do que uma única divisão treino-teste. Adicionalmente, como produto final, foi gerado um mapa de incerteza da predição. Este mapa, derivado do desvio padrão das previsões de todas as árvores no modelo para cada pixel, espacializa a confiança do modelo. Ele é uma ferramenta diagnóstica fundamental para identificar áreas onde a estimativa da LST foi menos consistente, permitindo uma análise mais crítica e aprofundada dos resultados.

2.3.4 Operação e cenários de aplicação

A metodologia descrita foi encapsulada em duas ferramentas de geoprocessamento customizadas para o software QGIS, utilizando a linguagem de programação Python e suas bibliotecas geopandas, rasterio e scikit-learn. Para a análise histórica, que utilizou dados do satélite SPOT-4, uma etapa de fusão de imagens (*Pansharpening*) foi necessária para combinar as bandas multiespectrais (20m) com a pancromática (10m), gerando os preditores na resolução espacial alvo de 10 metros, antes da aplicação do mesmo framework de modelagem.



2.4 RECLASSIFICAÇÃO DAS *LST*'S E COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS

Para a análise comparativa multitemporal, os mapas contínuos de *LST* foram reclassificados em zonas térmicas discretas. Foi empregado o método estatístico da média e do desvio padrão, uma abordagem consolidada e amplamente validada na literatura para a delimitação de anomalias térmicas, como Ilhas de Calor Urbanas [30]. A principal vantagem deste método reside em sua capacidade de normalizar os dados de cada cena individualmente, permitindo uma comparação robusta da estrutura espacial do campo térmico ao longo do tempo. Isso minimiza os efeitos de variações atmosféricas e sazonais pontuais entre as datas de aquisição das imagens, focando a análise na mudança da condição térmica relativa das superfícies. Assim, a metodologia não apenas quantifica a temperatura, mas transforma os mapas de *LST* em mapas de anomalias térmicas, identificando 'ilhas de calor' (pixels com valores significativamente acima da média) e 'ilhas de frescor' (pixels significativamente abaixo da média) de forma estatisticamente defensável, sendo uma técnica validada para o monitoramento espaço-temporal do ambiente térmico urbano [31].

A comparação final se deu a partir dos valores médios de *LST* para polígonos de tipos de cobertura do solo definidos a partir de imagens históricas do Google Earth Pro de fevereiro de 2000, setembro e novembro de 2003 e maio de 2004, dependendo da área amostrada, além do levantamento aerofotogramétrico de 1999 [23], para a cena histórica; e imagens do Google Earth Pro de fevereiro e março de 2025 para a cena contemporânea. Para normalizar as imagens de *LST* das cenas, foi aplicada a conversão para a lógica *fuzzy* do tipo linear crescente (valor 0 e valor 1 para a maior *LST* da área, para cada imagem). A *LST* de 0 a 1 foi reclassificada em 5 intervalos iguais e nomeadas em escala crescente de: ilha de frescor 2, ilha de frescor 1, intermédia, ilha de calor 1 e ilha de calor 2. Por fim, a transição entre os tipos de cobertura vetorizados foi comparada quanto à classe de calor urbano.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

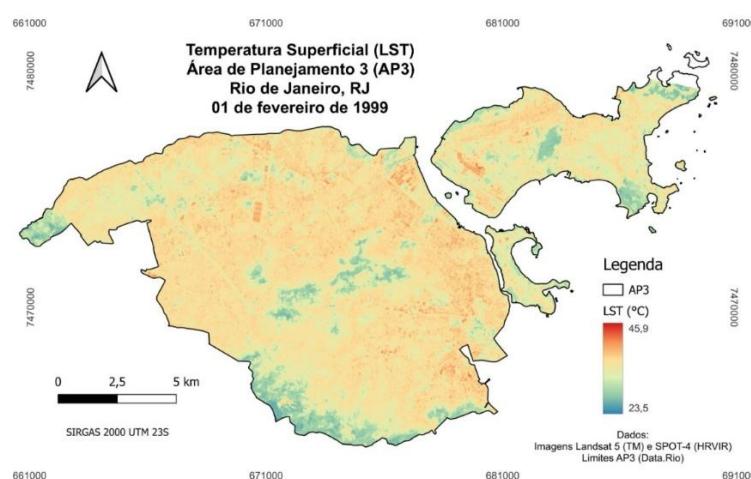
O uso de sensoriamento remoto mais uma vez mostrou-se capaz de permitir análises adequadas das condições urbanas. Muitas pesquisas já mostraram tal característica, mas a maior parte delas apoia-se em imagens termais de alta ou altíssima resolução, não disponíveis de modo gratuito, o que inviabiliza a aplicação por pesquisadores sem recursos para aquisição de tais imagens. As imagens termais mais antigas também não são facilmente encontradas em alta resolução, o que limita as pesquisas a cenários temporais mais recentes. A análise da importância relativa das variáveis, gerada pelo modelo Random Forest, revela uma mudança significativa nos fatores que governam a *LST* entre os cenários histórico e contemporâneo.

Em ambos os períodos, a elevação se manteve como um preditor de menor impacto, porém estável, contribuindo com aproximadamente 7,9% e 7,3% da capacidade preditiva do modelo, respectivamente. A principal transformação, no entanto, foi observada nos índices espectrais. No



cenário histórico (1999), o *NDVI* foi a variável esmagadoramente dominante, respondendo por mais de 71,0% da importância do modelo, seguido pelo *MNDWI* com cerca de 20,5%. Isso sugere que, no passado, o principal contraste térmico na área estudada era ditado pela presença ou ausência de vegetação, mostrado na fig. 4:

Figura 4: Perfil térmico da AP-3 na cena de 1999

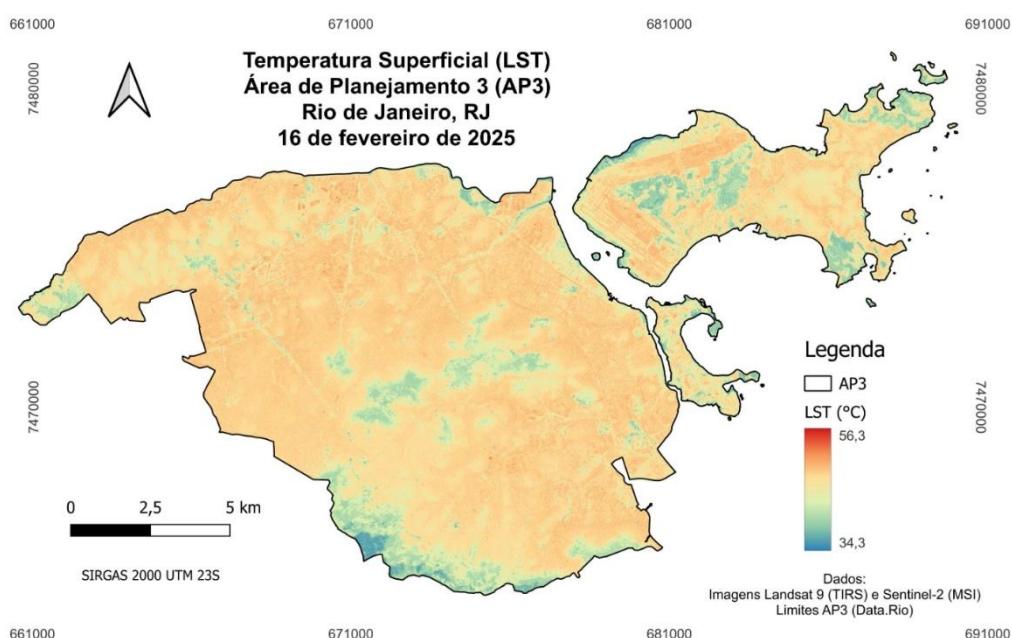


Fonte: Os autores (2025)

Em contrapartida, no cenário contemporâneo (2025), ocorreu uma notável inversão: o *MNDWI* emergiu como o preditor mais importante, com mais de 77% de influência, seguido pelo *NDBI* com 14,4%. De forma surpreendente, a importância do *NDVI* foi reduzida a um nível residual de apenas 1,0%. Esta transformação sugere uma alteração estrutural nos fatores térmicos da paisagem. Enquanto o simples "verdor" era o principal modulador da temperatura, o cenário atual parece ser mais complexamente governado pela umidade da superfície (capturada pelo *MNDWI*) e pelas características das áreas construídas (*NDBI*). A informação que antes era capturada pelo *NDVI* pode agora estar mais bem representada pela combinação dos outros índices, indicando evolução de uma dinâmica "vegetado versus não-vegetado" para um mosaico mais complexo de superfícies urbanas com diferentes respostas térmicas. Esta mudança reflete possivelmente um processo de adensamento e impermeabilização do solo na AP-3, onde as características dos materiais construtivos e a gestão dos recursos hídricos se tornaram fatores tão ou mais importantes que a cobertura vegetal para a determinação do microclima local, como mostrado na figura 5:



Figura 5: Perfil térmico da AP-3 na cena de 2025



Fonte: Os autores (2025)

A avaliação da performance dos modelos de *downscaling*, realizada através de uma rigorosa validação cruzada k-fold ($k=10$), demonstrou um alto poder preditivo e estabilidade para ambos os cenários temporais. O modelo contemporâneo, utilizando dados dos sensores Landsat 9 e Sentinel-2, alcançou um coeficiente de determinação (R^2) médio de 0,8944, com um desvio padrão notavelmente baixo de 0,0056, indicando que o modelo é capaz de explicar aproximadamente 89,4% da variação da *LST* de forma consistente. De maneira similar, o modelo histórico, baseado nos dados dos sensores Landsat 5 e SPOT-4, obteve um R^2 médio de 0,8472 e um desvio padrão de 0,0062, confirmando a robustez da metodologia mesmo com dados mais antigos.

A superioridade do modelo contemporâneo, embora ambos apresentem resultados excelentes, pode ser atribuída a uma combinação de fatores técnicos inerentes aos sensores mais modernos. A maior resolução radiométrica (12 bits no Landsat 9/Sentinel-2 vs. 8 bits no Landsat 5) e a melhor relação sinal-ruído (*SNR*) dos dados mais recentes fornecem ao algoritmo de *Machine Learning* informações mais detalhadas e de maior qualidade para o treinamento. Adicionalmente, a presença de bandas espectrais mais refinadas no sensor Sentinel-2 permite o cálculo de um *NDBI* mais eficaz, um preditor de grande relevância em ambientes urbanos que não estava disponível com a mesma qualidade nos dados do SPOT-4. Apesar desta pequena diferença, ambos os R^2 são considerados elevados e validam a metodologia de *downscaling* como eficaz.

Uma análise crítica dos resultados foi viabilizada pelo mapa de incerteza da predição, gerado a partir do desvio padrão entre as árvores de decisão do modelo Random Forest. Este mapa espacializa

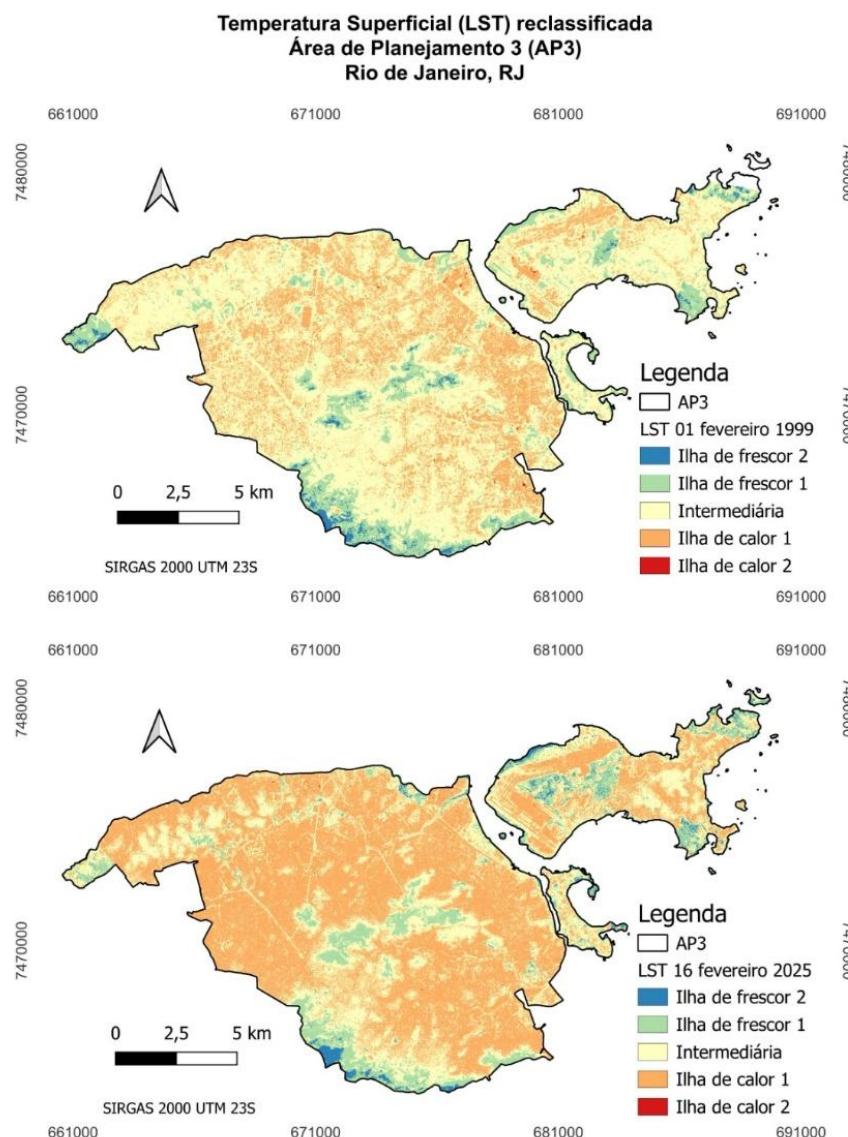


a confiança do modelo, revelando que as maiores incertezas (valores mais altos) se concentram em áreas de alta complexidade e heterogeneidade da paisagem, como em zonas de transição entre assentamentos informais (favelas) e vegetação de encosta, ou em áreas industriais com materiais de cobertura atípicos. Em contrapartida, as áreas de menor incerteza correspondem a superfícies homogêneas, como grandes corpos d'água ou extensas áreas de vegetação densa. Esta análise não apenas valida a robustez do modelo em áreas homogêneas, mas também aponta para a complexidade intrínseca de se modelar o comportamento térmico em mosaicos urbanos extremamente fragmentados, uma característica marcante da área de estudo.

A análise estatística dos mapas de *LST*, devidamente recortados para os limites da área de estudo, revela uma alteração expressiva no perfil térmico da AP-3 entre uma cena de 1999, mostrada na figura 4 e outra de 2025, mostrada na figura 6.



Figura 6: Comparação dos perfis térmicos entre cenas de 1999 e 2025



Fonte: Os autores (2025)

O cenário contemporâneo apresentou uma temperatura média (μ) de 46,7 °C com um desvio padrão (σ) de 2,7 °C. Em contrapartida, o cenário histórico registrou média consideravelmente inferior, de 35,2 °C, e um desvio padrão de 2,5 °C. Este aumento de 11,5 °C na temperatura média da superfície ao comparar as duas cenas, pode indicar uma diferença de temperatura do ar média entre os dias, que pode estar relacionada a fenômenos climáticos de maior escala, assim como representar o impacto térmico do processo de urbanização, que pode levar ao fenômeno de Ilha de Calor Urbana estudada.

4 CONCLUSÃO

Os resultados carregam implicações diretas para o planejamento urbano e o desenho de cidades mais resilientes às mudanças climáticas. A descoberta de que o *MNDWI* se tornou o principal preditor



da *LST* no cenário contemporâneo, superando até mesmo o *NDVI*, reforça a necessidade de políticas urbanas que transcendam a simples criação de 'espaços verdes'. A predominância do fator 'umidade' sugere que a 'infraestrutura azul' – a proteção e renaturalização de corpos d'água, a criação de lagos urbanos, e a implementação de superfícies permeáveis e jardins de chuva – pode ser uma estratégia de mitigação de ilhas de calor ainda mais eficazes do que a arborização isolada, o que é de se esperar em função da alta capacidade térmica da água. Em áreas densamente construídas, como a estudada, é comum encontrar-se vegetais em déficit hídrico, emitindo mais radiação solar do que outro indivíduo mais bem hidratado. Portanto, a integração de infraestruturas verdes e azuis deve ser um pilar central no planejamento futuro, visando não apenas a estética e a biodiversidade, mas também o conforto térmico e a qualidade de vida da população.

Como contribuição metodológica, esta pesquisa resultou no desenvolvimento de um fluxo de trabalho computacional robusto e adaptável para o downscaling de *LST* em ambientes urbanos complexos. A metodologia encapsulada nos scripts desenvolvidos demonstrou ser capaz de lidar com as especificidades de diferentes sensores de satélite (Landsat 5 e 8 ou 9, SPOT-4 e Sentinel-2) e níveis de processamento de dados (Nível 1 e Nível 2), integrando técnicas de pansharpening, aprendizado de máquina e análise de incerteza. Esta ferramenta se apresenta como um recurso valioso para futuras pesquisas, permitindo a replicação e a expansão da análise para outras áreas metropolitanas com características similares.



REFERÊNCIAS

- [1] ARUP, “Urban Heat Snapshot,” 05 2024. [Online]. Available: <https://www.arup.com/insights/urban-heat-snapshot/>. [Acesso em 2025].
- [2] P. B. Corrêa, L. A. Candido, R. A. F. de Souza, R. V. Andreoli e M. T. Kayano, “Heat Islands in Manaus City: Study with Remote Sensing Data, Modeling and Meteorological Data,” Revista Brasileira de Meteorologia, vol. 31 (2), 2016.
- [3] J. Silva, “São Paulo tem grande ilha de calor agravada pelo declínio de áreas verdes.,” Jornal da USP, 01 11 2024.
- [4] A. J. d. LUCENA, A ilha de calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro., vol. Tese (doutorado), COPPE/UFRJ, Ed., Rio de Janeiro: Programa de Engenharia Civil, 2012.
- [5] S. A. S. Almeida, L. R. A. da Silva e F. C. Mandarino, “Mudanças climáticas e as ilhas de calor: estudo de caso da cidade do Rio de Janeiro,” Coleção Estudos Cariocas, vol. 1201, Dezembro 2016.
- [6] W. L. Silva e C. P. Dereczynski, “Climatological Characterization and Observed Trends in Climatic Extremes in the State of Rio de Janeiro,” Anuário do Instituto de Geociências., p. 123–138, 2017.
- [7] F. d. A. Mendonça, Mudanças Climáticas Globais: controvérsias, participação brasileira e desafios à ciência, vol. 1, Rio de Janeiro: Humboldt, 2021.
- [8] J. Nichi, “Negacionismo climático e outras controvérsias da retórica científica sobre o clima,” Climapcom - Diante dos negacionismos (online), abril 2021.
- [9] Nações Unidas Brasil, O ano em que os alarmes do clima dispararam, Brasília, 2022.
- [10] W. Köppen, “II. Teil. Das geographische System der Klimate,” em Die Klimate der Erde: Grundriss der Klimakunde, Berlim, Boston, De Gruyter, 1923, pp. 98-167.
- [11] Instituto Nacional de Meteorologia, “Território e meio ambiente,” 26 09 2018. [Online]. Available: <https://datariov2-pcrj.hub.arcgis.com/documents/2f2e05ecf5d34abe9748a0e54857558f/about>. [Acesso em 14 08 2025].
- [12] Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, “Relatório de Climatologia Anual (1997-2024),” Rio de Janeiro, 2025.
- [13] Prefeitura do Rio de Janeiro, “Sistema Alerta Rio,” Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, 11 2025. [Online]. Available: <https://www.sistema-alerta-rio.com.br/download/dados-meteorologicos/>.
- [14] Instituto Estadual do Ambiente, “SIGQAr,” 11 2025. [Online]. Available: <https://qualidadedoar.inea.rj.gov.br/INEAPublico/AMSTabularData>.
- [15] Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, “Aquecimento Global de 1,5°C - Sumário para Formuladores de Políticas,” 2018.
- [16] Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OECD, “Financial Management of Flood Risk.,” OECD Publishing, Paris, 2016.
- [17] M. T. S. Soares, “Fisionomia e Estrutura do Rio de Janeiro,” Revista Brasileira de Geografia, vol. 3, pp. 3-37, Julho-Setembro 1965.
- [18] Cidade do Rio de Janeiro, “Lei Complementar nº 270, de 16 de janeiro de 2024,” Rio de Janeiro.



- [19] V. J. RUFFATO-FERREIRA, “Uma Nova Variável no Planejamento para o Desenvolvimento Urbano Sustentável: Áreas Verdes Em Quintais No Subúrbio Da Cidade Do Rio De Janeiro,” Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético. Tese (doutorado), Rio de Janeiro, 2016.
- [20] K. OnaČillová, M. Gallay, D. Paluba, A. Pélová, O. TokarČík e D. Laubertová, “Combining Landsat 8 and Sentinel-2 Data in Google Earth Engine to derive higher resolution land surface temperature maps in urban environment.,” *Remote Sensing*, Vols. %1 de %2v. 14, n. 16, 2022.
- [21] M. Liang, L. Zhang, S. Wu, Y. Zhu, Z. Dai, Y. Wang, J. Qi, Y. Chen e Z. Du, “A High-Resolution land surface temperature downscaling method based on geographically weighted neural network regression.,” *Remote Sensing*, Vols. %1 de %2v. 15, n. 7, 2023.
- [22] J. Wang, B.-H. Tang, X. Zhu, D. Fan, M. Li e J. Chen, “A comparative analysis of five land surface temperature downscaling methods in plateau mountainous areas.,” *Frontiers in Earth Science*, Vols. %1 de %2v. 12,, 2024.
- [23] Instituto Pereira Passos, “Limite Áreas de Planejamento (AP),” 2023. [Online]. Available: https://www.data.rio/datasets/b9e30861acfe4bea947e6278a6b30ce3_1/about. [Acesso em 14 07 2025].
- [24] IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística., “Base cartográfica contínua 1:25.000 versão EDGV 3.0.,” 2018. [Online]. Available: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. [Acesso em 25 06 2025].
- [25] J. A. Sobrino, J. C. Jimenez-Muñoz e L. Paolini, “Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5.,” *Remote Sensing of Environment*, Vols. %1 de %290, n. 4, pp. 434-440, 2004.
- [26] L. Breiman, “Random Forests,” *Machine Learning*, Vols. %1 de %245, n. 1, pp. 5-32, out 2001.
- [27] S. Huteng, Y. Li, T. Hu e D. Xu, “Downscaling land surface temperature in an arid area by using multiple remote sensing indices with Random Forest regression.,” *Remote Sensing*, Vols. %1 de %2v. 9, n. 8, p. 789, 2017.
- [28] S. Guha, H. Govil, N. Gill e A. Dey, “Analytical study on the relationship between land surface temperature and land use/land cover indices.,” *Annals of GIS*, Vols. %1 de %226, n. 2, pp. 201-216, 2020.
- [29] H. Xu, “Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery.,” *International Journal of Remote Sensing*, Vols. %1 de %2v. 27, n. 14, pp. 3025-3033, 2006.
- [30] X.-L. Chen, H.-M. Zhao, P.-X. Li e Z.-Y. Yin, “Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes.,” *Remote Sensing of Environment*, Vols. %1 de %2104, n. 2, pp. 133-146, 2006.
- [31] R. Amiri, Q. Weng, A. Alimohammadi e S. Alavipanah, “Spatial–temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran.,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, pp. 2606-2617, 2009.

