



Article

Planejamento Ambiental Urbano: a Relação entre a Cobertura Vegetal e Temperatura Superficial na Cidade de São Carlos, São Paulo, Brasil

Vitor Augusto Luizari Camacho ¹, Luiz Eduardo Moschini ²

¹ Graduação em Geografia (Bacharel e Licenciatura) FCT/UNESP Presidente Prudente – SP, especialização em Geoprocessamento pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Mestrando em Ciências Ambientais. ORCID: 0000-0002-9754-4674, e-mail: vitorluizaricamacho@gmail.com.

² Graduação em Ciências Biológicas pelo Centro Universitário de Araraquara, mestrado em Ecologia e Recursos Naturais pela Universidade Federal de São Carlos e doutorado em Ecologia e Recursos Naturais pela Universidade Federal de São Carlos. Servidor Público, Enquadramento Funcional: Professor Associado II. ORCID: 0000-0001-5829-7618, e-mail: lemoschini@ufscar.br.

Citation:

Camacho, V.; Moschini, L. Planejamento Ambiental Urbano: a Relação entre a Cobertura Vegetal e Temperatura Superficial na Cidade de São Carlos, São Paulo, Brasil. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science* 2021, v.10, n.2. <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2021v10i2.p116-131>

Received: 29/12/2020

Accepted: 29/07/2021

Published: 31/08/2021

Copyright: © 2021 by the authors. Submitted for open access publication under the terms and conditions of *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science* <http://periodicos.unievangelica.edu.br/fronteiras/>.

Abstract: The rapid urban expansion of cities has modified the natural landscape in Brazil changing the environmental and climatic conditions, from this the studies involving urban planning, environment and geotechnologies present solutions to current problems of cities, such as floods, heat islands and lack of green spaces. The objective of this work is to analyze the relationship between vegetation cover and surface temperature in the city of São Carlos, São Paulo, Brazil. Images from the Landsat-8 satellite were used, by means of digital image processing and remote sensing techniques. For the surface temperature band 10 (thermal) was used and for the vegetation cover bands 4 (red) and 5 (near infrared) of the Landsat 8 satellite, by means of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) vegetation index. The work was carried out in the QGIS software. As analysis were determined the correlation coefficients and determination between the indices from control points with both data in the urban perimeter. As a result, it was possible to observe a negative correlation between vegetation cover and surface temperature. Areas with the highest temperatures (37.4°C) were associated with the absence of vegetation, the high degree of construction densification and soil sealing. Studies like this one reinforce the importance of vegetation cover in urban areas for thermal control and well-being of resident populations in the face of the growing effect of climate change affecting urban centers. Proposals and mitigation actions should be part of a set of public policies applied to cities, thinking systemically and dynamically.

Keywords: Urban Climate; Landsat 8; Remote Sensing; Heat Island.

Resumo: A rápida expansão urbana das cidades modificou a paisagem natural no Brasil alterando as condições ambientais e climáticas, a partir disso os estudos que envolvem planejamento urbano, meio ambiente e geotecnologias apresentam soluções aos problemas atuais das cidades, como enchentes, ilhas de calor e falta de espaços verdes. O objetivo deste trabalho consiste em analisar a relação entre a cobertura vegetal e a temperatura da superfície da cidade de São Carlos, São Paulo, Brasil. Foram utilizadas imagens do satélite Landsat-8, por meio das técnicas de processamento digital de imagem e sensoriamento remoto. Para a temperatura da superfície foi utilizada a banda 10 (termal) e para a cobertura vegetal as bandas 4 (vermelho) e 5 (infravermelho próximo) do satélite Landsat 8, por meio do índice de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). O trabalho foi realizado no *software* QGIS. Como análise foram determinados os coeficientes de correlação e determinação entre os índices a partir de pontos de controle com ambos dados no perímetro urbano. Como resultado foi possível observar uma correlação negativa entre cobertura vegetal e temperatura da superfície. Áreas com as maiores temperaturas (37,4°C) estavam associadas à ausência de vegetação, ao alto grau de adensamento construtivo e impermeabilização do solo. Estudos como este reforçam a importância da cobertura vegetal em áreas urbanas para o controle térmico e bem-estar das populações residentes diante do crescente efeito das mudanças climáticas que afetam os centros urbanos. Propostas e ações de mitigação devem fazer parte de um conjunto de políticas públicas aplicadas às cidades, pensando de forma sistêmica e dinâmica.

Palavras-chave: Clima Urbano; Landsat 8; Sensoriamento Remoto; Ilha de Calor.

1. Introdução

Este artigo tem como influência estudos técnicos-científicos que envolvem planejamento urbano, meio ambiente e geotecnologias de maneira a apresentar soluções às novas demandas da sociedade. Demandas como a redução dos impactos das mudanças climáticas, oriundos dos eventos extremos que causam prejuízos sociais, materiais e ambientais, bem como na constante busca de melhoria da qualidade de vida no meio urbano. Segundo os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS, 2016) especificamente o item 11 – “Cidades e Comunidades Sustentáveis” - mais da metade da população do planeta vive em áreas urbanas. Em 2050, esse número chegará a 6,5 bilhões de pessoas, ou seja, podendo alcançar dois terços de toda a humanidade.

No Brasil de acordo com a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD, 2015) a maior parte da população brasileira, 84,72%, vive em áreas urbanas, o motivo para esta alta concentração segundo Milton Santos (1996) é que as cidades brasileiras tiveram um crescimento e um chamado fenômeno urbano tardio, acelerado e valorizando regiões específicas do território nacional, como o sul e sudeste. Em outro momento Milton Santos (1994, p.95) coloca que “com diferença de grau e intensidade, todas as cidades brasileiras exibem problemáticas parecidas” Os principais problemas urbanos citados pelo autor são: o desemprego, das faltas de: habitação, transportes, lazer, acesso a água, saúde e falta de saneamento.

Com a intensificação destes problemas a pressão dos centros urbanos sobre os recursos naturais tornaram-se cada vez maior, de modo que os problemas ambientais passaram a caracterizar as paisagens urbanas (Santos, 1996). Para Jatobá (2011, p. 141) os problemas ambientais estão ligados ao processo de urbanização pois apresentam uma relação direta, sendo:

[...] A urbanização, por implicar a concentração de pessoas e atividades produtivas sobre um espaço restrito, gera, necessariamente, impactos degradadores do meio ambiente com efeitos sinérgicos e persistentes. Embora outras atividades, como a agricultura, a pecuária, a mineração e a geração de energia, provoquem igualmente grandes impactos negativos sobre o meio ambiente, a urbanização, por gerar de forma concentrada seus impactos ambientais e difundi-los além dos limites urbanos, merece uma análise especial.

Um dos principais problemas relacionados à expansão urbana no Brasil é a geração de impactos ambientais. A transformação e alteração do ambiente natural se dá pela humanização dessa natureza e alcança “maior expressão nos espaços ocupados pelas cidades, criando um ambiente artificial” (Lombardo, 1985, p.17). Estas problemáticas somadas ao fenômeno de expansão urbana acelerado, no caso brasileiro, levou a transformação da paisagem dentro dos centros urbanos modificando as condições ambientais e climáticas, dando origem a um ambiente eminentemente antrópico, o que Milton Santos (1988) chamou de meio geográfico artificial, ocasionado pelo rápido processo de urbanização e expansão da cidade, culminando em uma modificação do clima local e da cobertura vegetal, no qual a geração de um clima específico para cada local pode ser um exemplo destas ações. (Amorim, 2000).

As modificações locais da cobertura vegetal que afetam o clima pautam o problema desta pesquisa, considerando as mudanças quantitativas, e também qualitativas, segundo Santos (1988, p.46):

“Se até mesmo no início dos tempos modernos as cidades ainda contavam com jardins, isso vai se tornando mais raro: o meio urbano é cada vez mais um meio artificial, fabricado com restos da natureza primitiva, crescentemente encobertos pelas obras dos homens.”

Com o passar dos anos as intervenções das populações no espaço urbano e as mudanças que lhe conferem alteraram profundamente a dinâmica ecológica da cidade (Monteiro, 1998). Em meio a este processo de transformação, a cobertura vegetal assume posição de destaque. Segundo Lombardo (1985) o crescimento desordenado das cidades e o aumento crescente do consumo de espaço colaboram diretamente para carência de áreas verdes e a conseqüente degradação das condições de vida.

O clima urbano é uma temática recente que tem sido estudada por diversos pesquisadores, inclusive com a formulação de teorias com a teoria sistema clima urbano (SCU) (Monteiro, 1976; 2003), que trata da dinâmica climática no espaço geográfico. Nos estudos de climatologia urbana, o sensoriamento remoto, por meio da aquisição de dados sobre a temperatura da superfície, tem auxiliado na compreensão da distribuição das fontes de calor dentro de uma área urbana que contribuem para a formação das ilhas de calor urbanas – ICU (Figura 1).

No Brasil as pesquisas das ilhas de calor urbanas por meio do sensoriamento remoto começaram particularmente nas regiões metropolitanas e em cidades de grande porte (Lombardo, 1985; Sousa e Baptista, 2005; Dumke, 2007). Em cidades médias e de menor porte, Amorim et al. (2009), Amorim & Monteiro (2011) efetuaram análises utilizando imagens termais do satélite Landsat 7 ETM+ para comparar o clima urbano entre a cidade de Presidente Prudente (SP – Brasil), Rennes (França) e Porto (Portugal). Em outro momento Amorim (2017) utilizou imagens termais do satélite Landsat 8 na identificação de ilhas de calor de superfície em cidades de porte médio e pequenas por

meio das características das temperaturas superficiais e a distribuição espacial da cobertura vegetal arbórea.

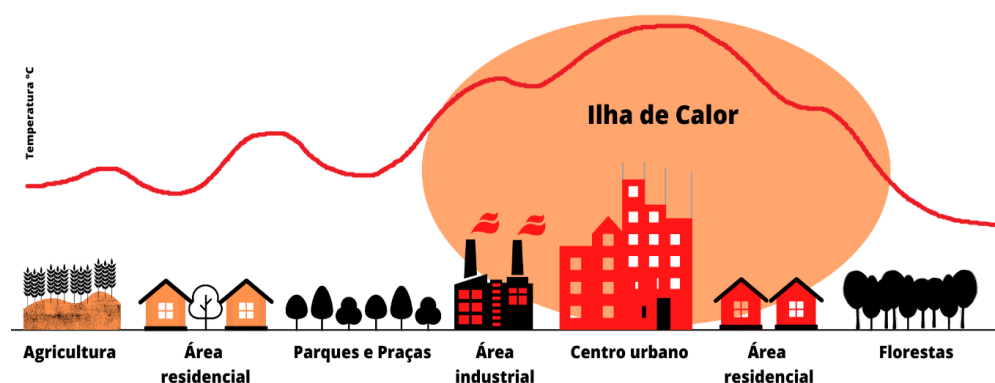


Figura 1. Perfil esquemático da ilha de calor para diferentes tipos de ocupação. Fonte: Autores (2020).

Para o local desta pesquisa foi escolhida a cidade de São Carlos, localizada no centro do estado de São Paulo em uma região dinâmica e adensada do ponto de vista populacional e econômico, apresentando os processos e problemáticas citados acima, onde a transformação do espaço é evidenciado pela constante expansão urbana de áreas anteriormente rurais ao longo dos anos.

Desta forma este artigo tem como o objetivo analisar, por meio de imagens do satélite Landsat 8 a cobertura vegetal e a temperatura da superfície cidade de São Carlos, bem como identificar as relações entre as áreas com maiores e menores parâmetros ambos os parâmetros, a fim de contribuir para o debate do planejamento ambiental urbano e políticas públicas da cidade.

2. Planejamento ambiental urbano no Brasil

O planejamento urbano é um instrumento de ordenamento do espaço, surgiu a partir da preocupação sobre os impactos produzidos pelo Homem nos primeiros núcleos urbanos (Santos, 2004). O planejamento urbano está presente nas sociedades modernas e segundo Ribeiro (2012, p. 72) “se propõe a coordenar a organização das cidades, de forma a garantir as melhores condições de habitabilidade possíveis para a população”. Para autores como Souza (2010) o planejamento, significa tentar simular os desdobramentos de um processo, no intuito de precaver-se dos problemas e de aproveitar da melhor forma os benefícios. Estas são ferramentas imprescindíveis para a promoção do desenvolvimento socioespacial, cuja expressão se dá a partir da “[...] melhoria de vida e um aumento da justiça social” (Souza, 2010 p. 75).

Segundo Villaça (1999) os períodos do planejamento urbano no Brasil podem ser divididos em três: o primeiro inicia-se no final do século XIX, por volta de 1875 e vai até o ano de 1930. O segundo vai de 1930 até por volta de 1992, ano em que se inicia o terceiro período e que perdura até o fim do século XX. A partir destes marcos podemos acrescentar um quarto período que se inicia em 2001, com a aprovação do Estatuto da Cidade, legislação que dispõe sobre o uso do solo urbano, a proteção e a recuperação do meio ambiente urbano, trazendo o planejamento ambiental urbano em pauta.

No tocante ao planejamento ambiental, Santos (2004) menciona que todo ambiente necessita de um plano para desenvolver-se de maneira sustentável. Visando criar condições de atender aos objetivos de um desenvolvimento, que considere as funções sociais, ambientais e dê garantia de

bem-estar para a população que habita e/ou visita os centros urbanos (Salles et al., 2013) Para atender os propósitos da organização das cidades garantindo o bem-estar às populações urbanas, o planejamento urbano e o planejamento ambiental urbano utilizam cada vez mais as geotecnologias, trazendo novas perspectivas para nossa sociedade, como as cidades sustentáveis, cidades verdes, cidades inteligentes entre outras.

De acordo com Mendonça (2004, p. 197), no planejamento do ambiente urbano devem ser considerados os fatores naturais, como o relevo, o clima, o solo, a vegetação e os cursos d'água, pois quando os espaços não são projetados para serem adequados a esses fatores, podem interferir na qualidade ambiental das cidades. O conhecimento do sítio urbano é uma informação primordial, sem o reconhecimento das características sociais, econômicas e ambientais da cidade se tornando um empecilho para a administração pública realizar um planejamento adequado. Assim, o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), principal ferramenta do geoprocessamento tem se apresentado bastante eficaz no sentido de possibilitar aos gestores uma visão mais completa e detalhada sobre os municípios, auxiliando nas tomadas de decisões.

4. Geoprocessamento, processamento digital de imagens e sensoriamento remoto

A aplicação das geotecnologias nesta pesquisa envolveram a escolha de critérios quantitativos e qualitativos, conciliadas à utilização das técnicas de geoprocessamento, em seu aspecto mais amplo da interdisciplinar, que permite a convergência de diferentes disciplinas científicas para o estudo de fenômenos ambientais e urbanos, chamando a de “o espaço é uma linguagem comum” (Câmara e Davis, 2014 p. 2-1). Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional. (Câmara et al., 2001)

Outro conceito importante é o de sensoriamento remoto “que é uma ferramenta ou técnica similar a matemática” (Jensen, 2000, p. 04), possui interação com outras ciências da informação geográfica, incluindo, de acordo com o autor, a cartografia, sistemas de informações geográficas, entre outras. Já o conceito de Sensoriamento Remoto, segundo Florenzano (2011, p. 9) é:

[...] A tecnologia que permite obter imagens – e outros tipos de dados – da superfície terrestre, por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície. O termo sensoriamento refere-se à obtenção de dados por meio de sensores instalados em plataformas terrestres, aéreas (balões e aeronaves) e orbitais (satélites artificiais). O termo remoto, que significa distante, é utilizado porque a obtenção é feita a distância, ou seja, sem o contato físico entre o sensor e objetos na superfície terrestre. O processamento, a análise e interpretação desses dados também integram o sensoriamento remoto

Uma das principais aplicações do sensoriamento remoto no estudo de planejamento ambiental urbano consiste em examinar relações entre a estrutura espacial dos padrões térmicos urbanos e as características da superfície urbana, além de permitir um maior grau de detalhamento e uma visão espacial das temperaturas da superfície de uma determinada região com o seu entorno (Dorigon, 2015). A principal vantagem de se utilizar o sensoriamento remoto é sua capacidade de permitir a visualização de temperaturas da superfície em grandes áreas (Amorim, 2017).

As alterações provocadas pelo ambiente urbano e a formação do clima urbano provocam a formação das ilhas de calor que, de acordo com Jensen (2009, p. 288), “são causadas pelo

desflorestamento e substituição da superfície do solo por materiais não-evaporativos e não porosos, como asfalto e concreto”. De acordo com este autor, esse processo condiciona uma redução na evapotranspiração e um aumento geral da temperatura da paisagem urbana. Por meio de algumas avaliações realizadas em pesquisas que utilizaram essas técnicas, Jensen (2009, p. 288) exemplifica que, durante o dia, as áreas comerciais podem apresentar temperaturas mais altas, e as mais baixas ficam restritas aos corpos d’águas, vegetação e terras de uso agrícola. Entretanto, salienta que áreas residenciais podem apresentar temperaturas intermediárias pela composição heterogênea de casas, grama e coberturas arbóreas.

5. Materiais e Métodos

O município de São Carlos (Figura 2) localiza-se na região administrativa central do estado de São Paulo entre as coordenadas 22° 09' 39" e 21° 35' 50" de latitude sul e 48° 05' 27" e 47° 43' 09" de longitude oeste. O município possui uma população estimada de 251.983 habitantes (IBGE, 2019) e densidade demográfica de aproximadamente 203 habitantes por km², com grau de urbanização de 96,00% e taxa de crescimento anual da população em 1,02% (SEADE, 2015). Nos últimos 50 anos a cidade de São Carlos praticamente triplicou sua demografia (Tabela 1), saltando de 85.425 habitantes em 1970 a 251.983 em 2019 segundo dados do IBGE.

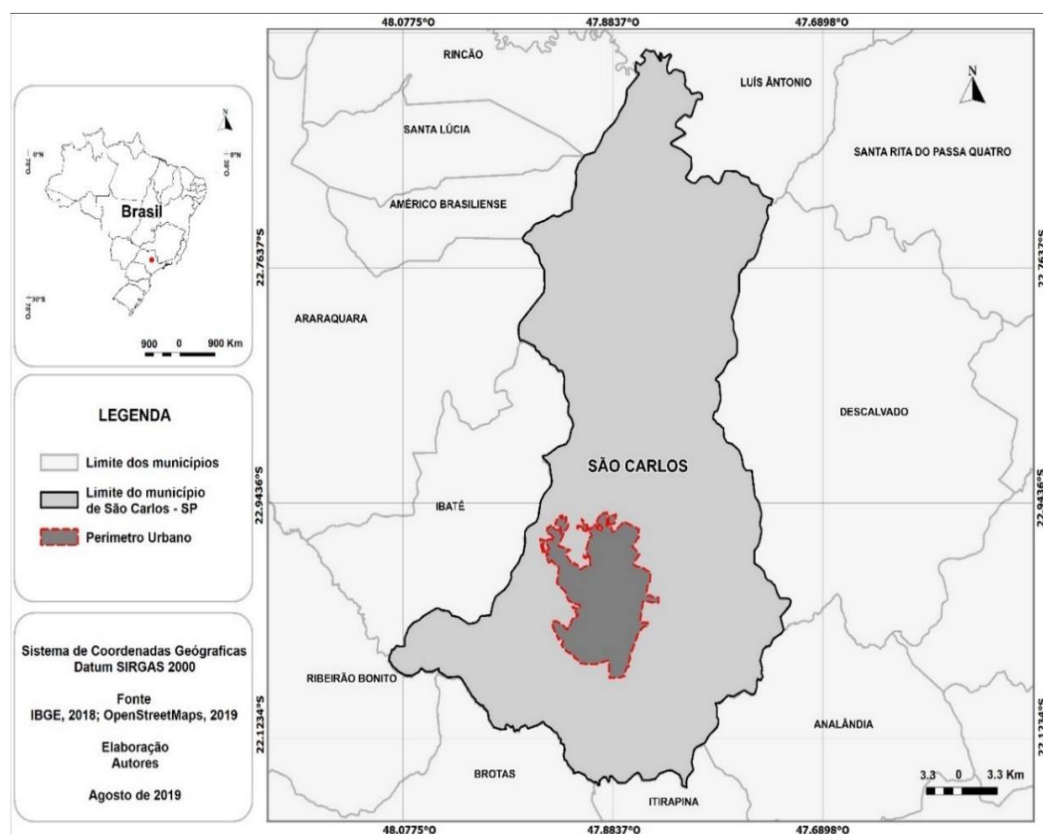


Figura 2. Mapa de localização do município de São Carlos, São Paulo, Brasil. Fonte: Autores (2019).

Tabela 1. Evolução do crescimento populacional do município de São Carlos – SP.

| Ano | População total |
|------|-----------------|
| 1970 | 85.425 |

| | |
|------|---------|
| 1980 | 119.535 |
| 1990 | 158.221 |
| 2000 | 192.998 |
| 2010 | 221.950 |
| 2019 | 251.983 |

Fonte: IBGE (2019). Elaborado pelos autores (2019)

As características físicas predominantes são: relevo de planalto com altitude média de 856m, vegetação marcada por fragmentos do bioma e da mata atlântica. Com temperatura média aproxima-se de 21,12°C, média mensal pluviométrica de 118,56mm num total de 1.422,80mm anuais (CEPAGRI, 2015), segundo a classificação Köppen-Geiger o clima é tropical semiúmido com verão quente-úmido e inverno frio-seco (Köppen: Aw). A cobertura vegetal no município de São Carlos pode-se destacar a presença de fragmentos de vegetação nativa que conta com diversas Áreas de Preservação Permanente (APPs), somando a uma arborização urbana com índice de 89,2 % (IBGE, 2010).

A escala de recorte para esta pesquisa foi o espaço urbano de São Carlos baseado no que Steinberger (2001, p. 10), cita:

[...] adotar como referência o espaço urbano, pois esse pode comportar territórios maiores ou menores do que os limites da cidade. Maiores, quando o espaço urbano se espalha e se confunde com o regional ou com o rural e adquire contornos geográfico-administrativos, como o de uma bacia hidrográfica, uma região metropolitana ou um município; menores, quando o espaço urbano se relaciona a um bairro, uma comunidade, um assentamento habitacional ou uma “tribo”. Por essa razão, sugere-se que o “mote” da perseguida sustentabilidade não seja a cidade, mas sim o espaço urbano, entendido como resultante desse mosaico de territórios que está em constante mutação. Assim, não existe o ser sustentável, mas o estar sustentável, tão-somente como um estado temporário de determinados territórios que contêm e estão contidos em um meio ambiente predominantemente urbano

A replicabilidade para outras cidades médias é a principal premissa, que segundo Sposito (2010, p. 1): “As cidades médias são aquelas que desempenham papéis de intermediação em suas redes urbanas”, diferenciando-as de cidades de “porte médio”, que são aquelas que são assim definidas, exclusivamente, em função de seu tamanho demográfico. Em outras palavras, cidade de “porte médio” não é a mesma coisa que “cidade média” (SPOSITO, 2010).

Para realizar o mapeamento foram utilizadas as técnicas de processamento digital de imagens de sensoriamento remoto, das imagens de satélite Landsat 8, sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). Para temperatura superficial foi utilizado a banda 10/LWIR-1 do sensor TIRS e para a cobertura vegetal índice NDVI as bandas 4 e 5 do sensor OLI, no ambiente do software de Processamento digital de imagens e Sensoriamento Remoto QGIS – QGIS versão 3.2.2. O conjunto das técnicas foi desenvolvido em quatro etapas sintetizadas na Figura 3.

A primeira etapa de pré-processamento: foi a obtenção das imagens de satélite no sítio eletrônico do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2019), o mesmo permite uma interação entre usuário e o catálogo de produtos disponíveis assim possibilitando a escolha do local, da data e dos parâmetros da imagem. O satélite escolhido foi da plataforma do satélite Landsat-8 OLI/TIRS 1,

path: 220 e *row*:75, ambas datadas de 28 de janeiro, 02 de abril, 08 de agosto e 27 de outubro, ambas para o ano de 2019, contando com uma resolução espacial de 100m.

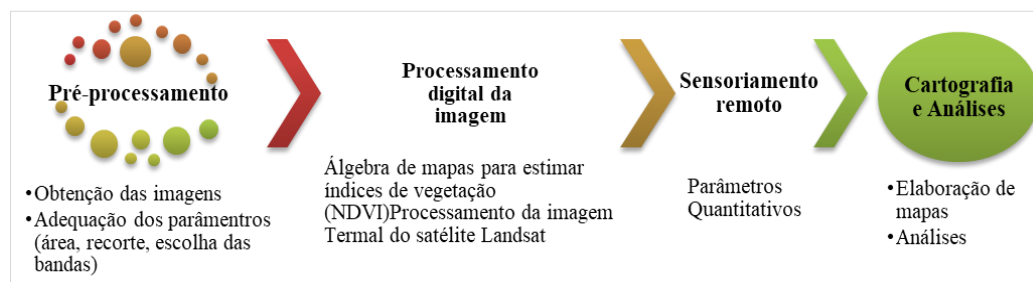


Figura 3. Fluxograma metodológico. Fonte: Autores (2019).

Nas etapas seguintes de processamento digital das imagens e sensoriamento remoto (Figura 4) foram selecionadas as bandas: 4 (vermelho), 5 (infravermelho próximo) e 10 (termal) para trabalhar a cobertura vegetal foram necessárias as bandas 4 e 5, ambas inseridas no ambiente SIG-QGIS, e por meio do *plugin* SCP - *Semi-Automatic Classification*, foram aplicadas as correções atmosféricas pela bem como os valores de níveis de cinza (NC) convertidos para radiância espectral. Os valores obtidos foram, então, transformados em reflectância aparente pelo mesmo *plugin*.

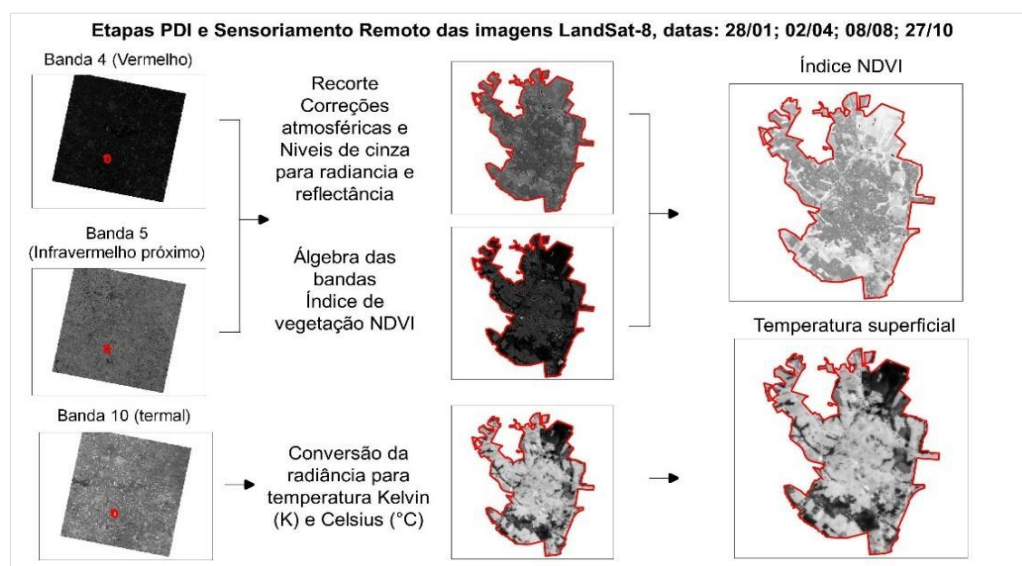


Figura 4. Descrição das etapas de classificação e tratamento das imagens de satélite. Fonte: Autores (2019).

Para esta pesquisa foram utilizadas as técnicas descritas por Dumke (2007) que estabelece uma sequência explicativa das etapas de processamento da imagem termal para obtenção da temperatura de superfície dos alvos no aglomerado urbano da região metropolitana de Curitiba utilizando imagens de satélite Landsat 8. Nesta pesquisa foi utilizado além da temperatura o índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) que segundo Jensen (2009) é um importante índice de vegetação para monitoramento das mudanças sazonais e interanuais de desenvolvimento vegetacional, foi inicialmente desenvolvido por Rouse, et al., (1973) normalizando a Razão Simples para um intervalo de -1 a 1.

Para o mapa de cobertura vegetal foi confeccionado por meio da álgebra das bandas, o índice de vegetação NDVI (Rouse, et al., 1973) sendo o índice um amplamente utilizado e muito explorado em abordagens de vegetação (Ponzoni, et al., 2012). Para a construção do índice foi utilizando a calculadora *raster* do QGIS, com base na fórmula:

$$\text{NDVI} = (\text{IVP} - \text{V}) / (\text{IVP} + \text{V})$$

Onde:

- NDVI é *Normalized Difference Vegetation Index*, o índice de vegetação
- IVP é o Infravermelho próximo (banda 5)
- V é o vermelho (banda 4)

Para confecção do segundo mapa da estimativa de temperatura da superfície foi utilizada a calculadora *raster*, para transformar os valores de radiância em Kelvin, baseados nas Leis de Stefan–Boltzmann e Lei de Planck, a partir dos valores estimados de emissividade obtêm-se a temperatura da superfície mediante a inversão da equação de Planck para corpos radiadores. Para o processamento da banda 10 foram utilizados os parâmetros e algoritmos disponibilizados no sítio eletrônico do USGS por meio do arquivo de metadados que acompanha as imagens, a primeira fórmula foi a obtenção da radiância:

$$\text{Eq. 1: } L\lambda = \text{ML} * \text{Qcal} + \text{AL}$$

Onde:

- $L\lambda$ é a radiância espectral em sensor de abertura em Watts,
- ML é o fator multiplicativo de redimensionamento da banda 10; 3.3420E-04,
- Qcal é o valor quantizado calibrado pelo pixel em DN; Imagem banda 10.
- AL é o fator de redimensionamento aditivo específico da banda 10; 0.10000,

Em seguida os valores de radiância foram convertidos em Temperatura Kelvin (K) pela fórmula:

$$\text{Eq. 2: } T = \text{K2} / \ln ([\text{K1} / \text{Eq. 1}] + 1)$$

Onde:

- T é a temperatura efetiva em Kelvin Valor a ser obtido
- K1 é a constante de calibração 1: 774,89
- K2 é a constante de calibração 2: 1321,08 (K)
- $L\lambda$ é a radiância espectral em (Watts/ (m² *srad * μm)): Banda 10 (radiância)

Em seguida os valores em Kelvin foram transformados em graus Celsius a partir da subtração de (273,15 k) dos valores da imagem anterior para geração da nova grade de temperatura da superfície dos alvos em °C a partir da fórmula:

$$\text{Eq. 3: } T = \text{Eq. 2} - 273,15$$

Por fim para a preparação dos mapas as imagens de cada data foram somadas e a partir disso elaboradas duas imagens das médias de cada parâmetro, datadas de 28 de janeiro, 02 de abril, 08 de agosto e 27 de outubro, ambas para o ano de 2019.

6. Resultados e discussões

Foram elaborados os mapas de temperatura da superfície (Figura 5) e de índice de vegetação NDVI que representa a cobertura vegetal (Figura 6), ambos do perímetro urbano da cidade de São Carlos. É possível observar, a diferenciação de áreas pela variação dos parâmetros, indicando que

certas localidades apresentam especificidades seja por ausência ou presença de cobertura vegetal, as diferentes temperaturas observadas estão relacionadas à propriedade de emissividade dos materiais presentes nas superfícies, os sensores do infravermelho termal registram a intensidade da radiação equivalente à temperatura radiante aparente do terreno (Amorim, 2017).

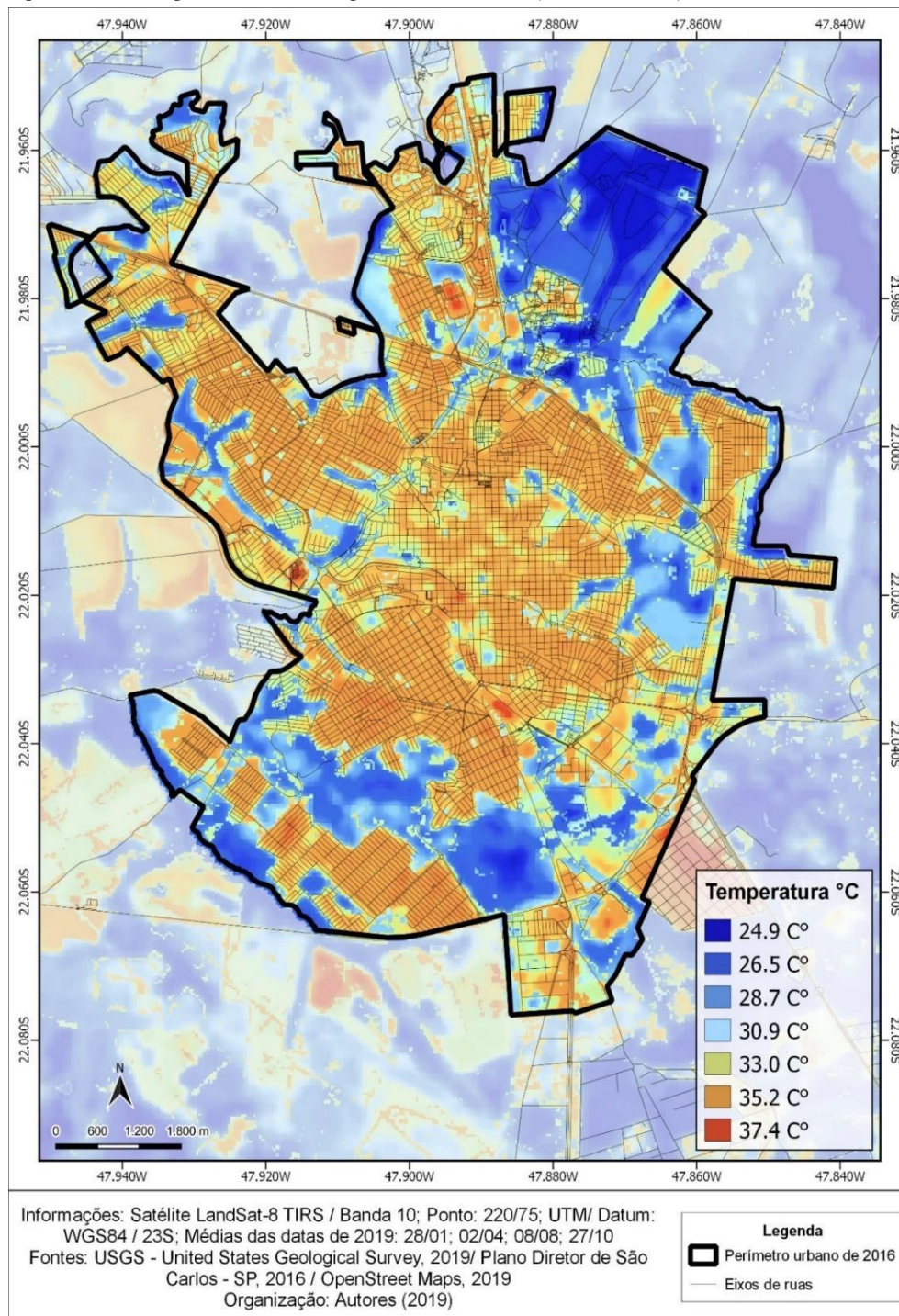


Figura 5. Mapa da temperatura da superfície da cidade de São Carlos, São Paulo. 2019. Fonte: Autores (2019).

Assim como evidenciado em Amorim (2017) as áreas urbanas se apresentaram mais aquecidas do que as do entorno do perímetro, sendo esta característica decorrente da substituição dos

elementos naturais como a vegetação, por materiais construtivos que armazenam maior quantidade de energia, tendo, portanto, albedo mais baixo.

No mapa de temperatura da superfície é possível observar uma amplitude de 12,5°C, sendo que a resposta térmica dos alvos apresentou um gradiente de variação nos locais com menor temperatura de 24,9°C e para os locais com maiores temperaturas de 37,4°C. As menores temperaturas estiveram presentes em grandes áreas no Norte e no Sul da cidade, justificado pela baixa ocorrência ou ausência de objetos artificiais, como asfaltamento e concreto, que reduzem e alteram radicalmente as propriedades de impermeabilidade, radiativas e térmicas.

Já as maiores temperaturas apresentadas no mapa, encontram-se onde o adensamento urbano é maior, especificamente nas áreas onde há arruamento e construções, podendo ser observadas em pontos específicos no centro e no sudoeste da cidade, alguns pontos se destacam por serem objetos com alto grau de área edificada e impermeabilizada. Dentre estes pontos estão áreas de grandes galpões, estacionamentos de supermercados e lojas atacadistas, bem como pátios de veículos.

Eduvirgem et al. (2018) evidenciou nos resultados que as temperaturas de superfície encontradas em Lisboa, Portugal são elevadas, devido à densa urbanização, materiais utilizados e sua morfologia urbana, ou seja, as estruturas e formas da cidade.

Em São Carlos, Rampazzo (2019, p. 150) analisando a temperatura de superfície chamou as áreas com elevadas temperaturas de “núcleos distribuídos espacialmente no conjunto da malha urbana” apresentando que o padrão de adensamento e uso do solo comercial, de serviços e o posicionamento da malha urbana favorece a incidência da insolação e interfere no fluxo de vento, ocasionando elevadas temperaturas.

As propriedades dos materiais de construção também interferem nos valores cobertura dos telhados predominante de telhas fibrocimento e mistas (cerâmica e fibrocimento) apresentam temperaturas elevadas como observado em Rampazzo (2019).

Já a cobertura vegetal representada pelo índice NDVI (Figura 6), é possível observar padrões locais semelhantes ao da Figura 4 que foram agrupados baseados nas classes sugeridas por Kaiser et al., (2019), onde ressaltam que há uma sobreposição de intervalos, onde os valores podem ser os mesmos observados para locais distintos, isso se dá pela resolução da imagem e pelas características de cada local. Com isso as áreas urbanizadas apresentaram valores de 0,025 a 0,469, áreas com pouca vegetação de 0,366 a 0,634, áreas com uma relativa presença de vegetação de 0,521 a 0,694 e áreas com predominância de vegetação de 0,634 a 0,845.

Vale destacar que para estes intervalos, as áreas com maiores coberturas vegetais, vão de encontro com o que Ming et al., (1998) observaram onde a vegetação amplamente desenvolvida e pronunciada apresenta valores de NDVI superiores a 0,6, enquanto coberturas vegetais pouco densas e áreas subjacentes a resquícios verdes apresentam variação de NDVI entre 0,3 e 0,6. A partir disso a relação da cobertura vegetal com a temperatura no ambiente urbano de São Carlos estiveram associadas com alta densidade das construções, onde os terrenos são completamente impermeabilizados e carentes de cobertura vegetal arbórea, como é possível observar no centro da cidade, no interior de grandes lotes construídos como em bairros residenciais e galpões.

Para analisar os dois parâmetros complementando a informação dos mapas, foi realizada uma correlação, onde foram obtidos por meio de uma grade regular no perímetro urbano com 532 pontos de controle, correspondentes aos nós de uma malha quadriculada sobreposta ao mapa, com ambos

os parâmetros, a partir disso foi gerado um gráfico (Figura 7) a fim de realizar uma análise dos coeficientes de correlação de Pearson e determinação, de modo a verificar a relação.

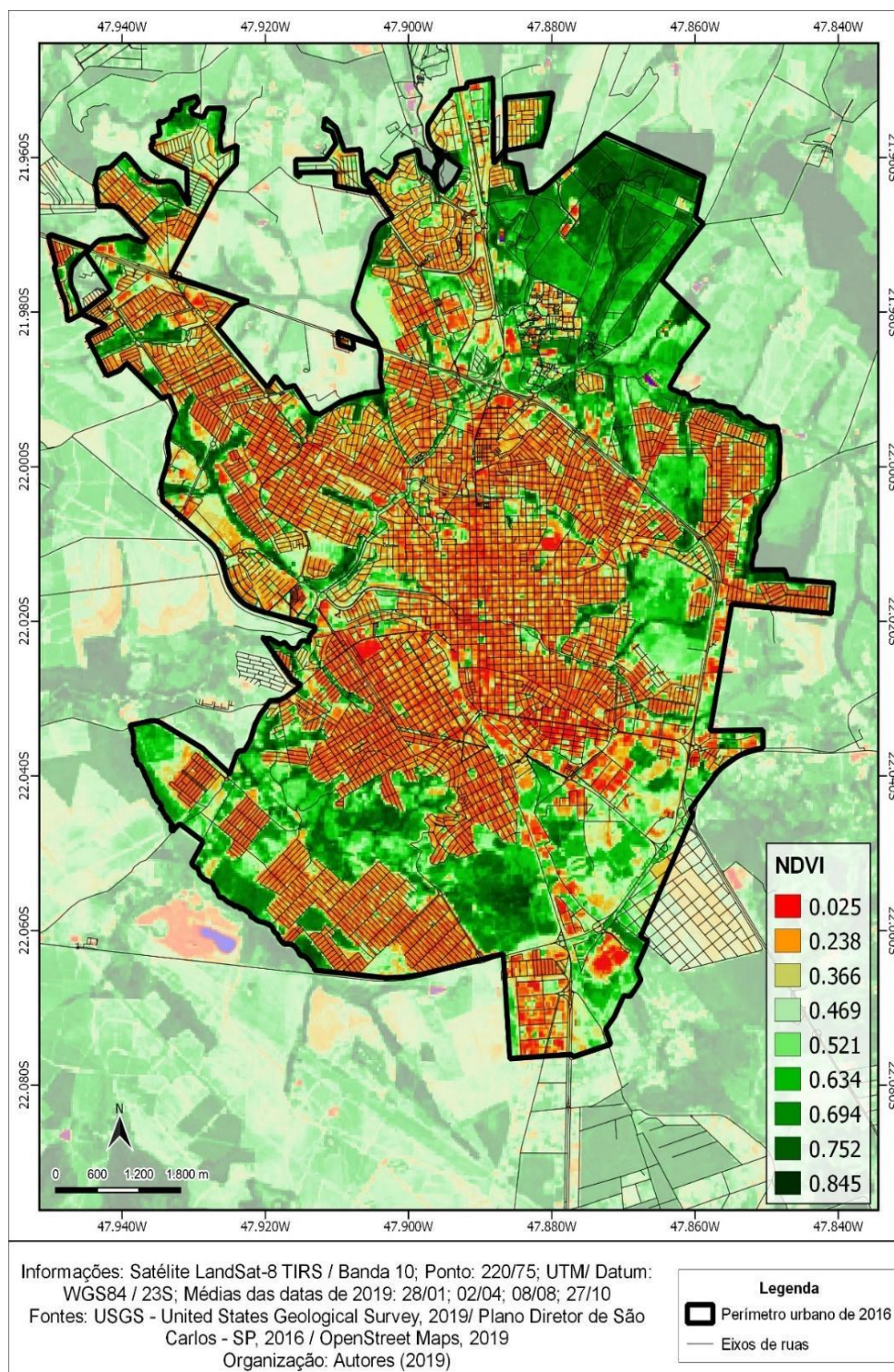


Figura 6. Mapa índice de vegetação NDVI da cidade de São Carlos, São Paulo. 2019. Fonte: Autores (2019).

Verificou-se a existência de uma forte correlação de Pearson negativa no valor de -0,856, ou seja, com a diminuição do parâmetro NDVI há um aumento da temperatura de superfície, indicando que com menos cobertura vegetal há um aumento da temperatura. Já o coeficiente de determinação

ou R^2 , utilizado como medida da proporção da variabilidade entre as variáveis, apresentou um R^2 de 0,734.

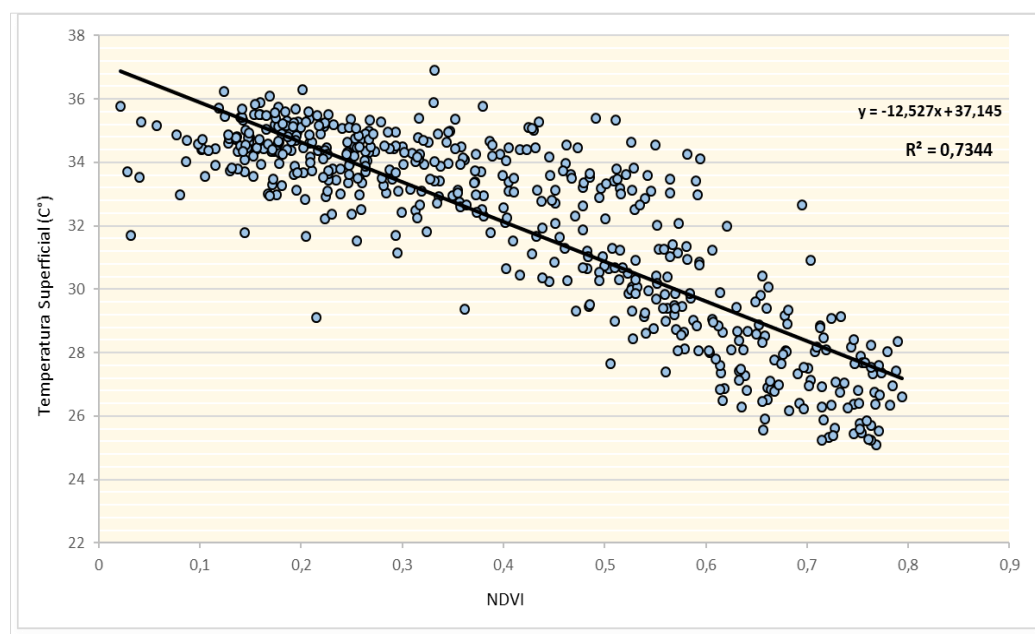


Figura 7. Gráfico de dispersão entre temperatura da superfície e NDVI. Fonte: Autores (2019).

Desta forma, é possível verificar que há um grande número de correlações significativas entre as variáveis e as localidades. Pode destacar-se, por exemplo, a associação que áreas edificadas se relaciona positivamente com as temperaturas, isto é, quanto maior a percentagem de área edificada, maior o valor da temperatura. Também o grau de impermeabilização apresenta correlações semelhantes com a temperatura, numa relação positiva (Joaquim, 2011).

Fica evidenciado que há uma correlação entre as áreas com cobertura vegetal e temperaturas amenas na cidade de São Carlos. Esta pesquisa se aproxima dos resultados obtidos por Rampazzo (2019) onde as análises e resultados da temperatura superficial e índices de vegetação NDVI foram similares, as áreas com maiores índices de NDVI de 0,50 a 0,87 coincidiram com as áreas de temperaturas amenas caracterizados pela presença de abundante vegetação. As áreas localizadas ao norte da cidade são do campus da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), contanto com a presença de um fragmento florestal e uma monocultura de eucalipto. Já a outra área ao sul da cidade, destaca-se por contar com uma densa área de cobertura vegetal caracterizada pela APP – Áreas de Preservação Permanente do córrego Água Quente.

Na região com baixos valores de NDVI entre 0,02 e 0,23 estão associados às áreas urbanizadas, em áreas mais densamente construídas, contudo, comparando com as áreas de maiores temperaturas não foi observado relação entre estes. Isto se dá por dois motivos observados no espaço urbano, o primeiro é de que a região central da cidade contempla diversas praças e alguns parques arborizados somando ao fato de ocorrer trechos de fragmentos de APPs ao longo do trajeto não aterrado do córrego do Gregório (Leste – Oeste) apresentando uma variação entre 28,2°C a 32, 8°C. O segundo motivo está relacionado a localização das áreas com temperaturas mais elevadas, chegando a 37,4°C, destaca-se a sul da cidade nos bairros cidade Aracy, Vila Medeiros, uma área específica na Avenida

Getúlio Vargas que apresenta diversos galpões para fins comerciais e uma área comercial altamente impermeabilizada ao oeste da cidade com temperatura de 35,6°C.

6. Conclusões

As técnicas de processamento digital de imagem e sensoriamento remoto das imagens de satélite cobertura vegetal por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e para a temperatura da superfície da cidade de São Carlos, São Paulo mostraram ser um dispositivo eficaz para municiar o planejamento ambiental urbano. Permitindo identificar as áreas que apresentam maiores e menores índices dos parâmetros de maneira satisfatória, revelando que uma estrutura ou uma área artificializada, dependendo de sua morfologia pode reconfigurar por completo o clima local.

A importância da cobertura vegetal em áreas urbanas para o controle térmico e bem-estar das populações residentes faz se necessário diante do crescente efeito das mudanças climáticas que afetam os centros urbanos. Propostas e ações de mitigação devem fazer parte de um conjunto de políticas públicas aplicadas às cidades, pensando de forma sistêmica e dinâmica.

Desta maneira políticas públicas, ações individuais e coletivas para manutenção dentro do espaço urbano, de localidades que possam regular a temperatura, como praças, parques, áreas de preservação e fragmentos florestais, bem como ações pontuais e locais que estimulem tais condições como telhados verdes, arborização urbana, quintais residenciais e comerciais.

Em vista dos argumentos apresentados os autores recomendam como mitigação dos efeitos das ilhas de calor urbanas a constante manutenção dos espaços públicos com presença de cobertura vegetal como praças e parques, replantio de novas mudas arbóreas para garantir a sucessão das espécies nos locais, a não canalização fechada de córregos e rios urbanos, bem como aplicação de leis municipais que estimulem a conservação de percentuais de áreas verdes em lotes construídos privados.

Considera-se neste trabalho uma contribuição para a os gestores e tomadores de decisões acerca das questões ambientais emergentes, de saúde e qualidade de vida nas cidades, dentre as principais vantagens de estudos como este ressaltamos a replicabilidade das técnicas para demais cidades e regiões, bem como na aplicação em outras áreas do conhecimento como planejamento ambiental, territorial, engenharias, biologia, ecologia entre outras.

Deve se considerar que sempre há limitações, como muitas vezes as generalizações resultantes dos procedimentos técnicos do geoprocessamento, que podem ser superadas com a ampliação e variação temporal dos dados e amostras coletadas.

Neste estudo o fator de verificação em campo não foi aplicado para validação das temperaturas dos objetos, portanto recomenda-se que para estudos aprimorados de objetos específicos se realize a validação em campo com das temperaturas.

Sugere-se em outros trabalhos a realização de comparações intertemporais e entre sazonalidade de estações, ainda como sugestão o uso de demais técnicas das geotecnologias como o uso de *drones* e imagens de satélite de maior e melhor resolução espacial e temporal.

Referências

- Amorim, M. C. C. T 2000. *O clima urbano de Presidente Prudente/SP*. Tese de Doutorado em Geografia Física. FFLCH - Universidade de São Paulo, São Paulo.
- AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, V.; QUENOL, H.; SANT'ANNA NETO, J.J. 2009. *Caractéristiques des îlots de chaleur urbains dans des villes de taille moyenne: exemples de Presidente Prudente (Brésil) et Rennes (France)*. CONFINS (PARIS), v. 7, p. 1-16.
- Amorim, M. C. C. T., e Monteiro, A 2011. *As temperaturas intraurbanas: exemplos do Brasil e de Portugal* [The intra- urban temperatures: examples from Brazil and Portugal]. *Confins*, (13): 1-18.
- Amorim, M. C. C. T 2017. *Deteção remota de ilhas de calor superficiais: Exemplos de cidades de porte médio e pequeno do ambiente tropical, Brasil*. Finisterra, Lisboa, 105: 111-133. Disponível em: http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0430_50272017000200007&lng=pt&nrm=iso.
- Câmara, G. e Davis JR 2014. *A introdução à ciência da geoinformação*. INPE. Available from: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap1-introducao.pdf>.
- Câmara, G.; Davis. C.; Monteiro, A.M.; D'Alge, J.C 2001. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. (On-line, 2a. edição, revista e ampliada). INPE. Available from: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>
- Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura – CEPAGRI 2015. *Municípios paulistas*. Available from: www.cpa.unicamp.br/outrasinformacoes/cli-ma_muni_224.html.
- Dorigon, L. P 2015. *Clima urbano em Paranavai/PR: análise do espaço intraurbano. Presidente Prudente*. Dissertação de Mestrado em Geografia Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente.
- Dumke, E. M. S 2007. *Clima urbano/ conforto térmico e condições de vida na cidade – uma perspectiva a partir do aglomerado urbano da região metropolitana de Curitiba*. Tese de Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE 2015. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD*. Rio de Janeiro: IBGE. Available from: https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa_resultados.php
- Eduvirgem, R. V.; Pericato, A. J.; Santos, M. V.; Caraminan, L. M 2019. *Investigação da temperatura aparente da superfície e do índice de vegetação por diferença normalizada da zona urbana de Cascavel, Paraná, Brasil*. *Geofronter*, Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, (5): 51-71.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE 2010. *Perfil dos municípios*. Available from: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-carlos/panorama>.
- Fundação Sistema Estadual de Análise de dados – SEADE 2015. *Perfis Municipais*. Disponível em: www.seade.gov.br/produtos/perfil/perfil.php.
- Florenzano, T. G 2011. *Iniciação em Sensoriamento Remoto*. (3. ed ampliada e atualizada). Oficina de Textos, São Paulo.
- Jatobá, S. U. S 2011. *Urbanização, Meio Ambiente e Vulnerabilidade Social*. Boletim regional, urbano e ambiental. IPEA.
- Jensen, J. R 2000. *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall.
- Jensen, J. R 2009. *Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. 2 eds. Tradução: EPIPHANIO, José Carlos N., et al (INPE), Parênteses, São José dos Campos.
- Joaquim, F. G 2011. *Efeito Ilha de Calor na cidade de Lisboa – Proposta de medidas de mitigação*. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente.
- Lombardo, M. A 1985. *Ilha de Calor nas Metrôpoles: O Exemplo de São Paulo*. Hucitec, São Paulo.
- Kaizer, E. A.; Grondona, A. E. B.; Veettil, B. K.; Kafer, P. S.; Iglesias, M. L.; Diaz, L. R.; Silva, S. S.; Rocha, N. S.; Rolim, S. B. A 2019. *Caracterização da emissividade de superfície do município de Porto Alegre - RS a partir do uso e cobertura da terra*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19. (SBSR), Santos. Anais... São José dos Campos: INPE, 2019. p. 2600-2603. Available from: <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP6W34M/3U9HRLS>.
- Ming, T. C; Tse, Liu W.; T. H 1998. *Estimativa de albedo, temperatura e NDVI do Estado de São Paulo através de dados AVHRR do satélite NOAA*. Anais do Congresso Brasileiro De Meteorologia, São Paulo. Available from:

- https://www.researchgate.net/publication/267429904_ESTIMATIVA_DE_ALBEDO_TEMPERATURA_E_NDVI_DO_ESTADO_DE_SAO_PAULO_ATRVES_DE_DADOS_AVHRR_DO_SATELITE_NOAA
- Mendonça, F. S.A.U 2004. *Sistema Socioambiental Urbano: uma abordagem dos problemas socioambientais da cidade*. In: MENDONÇA, Francisco (org.) Impactos Socioambientais urbanos. Ed. UFPR. Curitiba.
- Monteiro, A 1976. *Teoria e clima urbano*. Série Teses e Monografias nº 25. IGEOG/USP, São Paulo.
- Monteiro, A 1998. *O Clima Urbano do Porto. Contribuição para a definição das estratégias de planejamento e ordenamento do território*. Fundação Calouste Gulbenkian.
- Monteiro, A 2003. *Teoria e Clima Urbano*. In: MONTEIRO, C. A. de F; MENDONÇA, F. (Org.) et al. Clima urbano. Contexto, São Paulo, 9-67.
- Organização das Nações Unidas – ONU 2016. *Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD*. Available from: <http://www.br.undp.org/>.
- Rampazzo, C. R 2019. *Clima urbano, risco climático e vulnerabilidade socioespacial mediados pela produção do espaço urbano em cidades paulistas (São Carlos, Marília e Presidente Prudente)*. Tese de doutorado em Geografia, Presidente Prudente, SP.
- Ribeiro, R. T 2012. *O Planejamento Urbano como Instrumento Garantidor do Direito à Cidade*. Revista de Direito da Cidade, vol.04. Rio de Janeiro. Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ.
- Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W 1973. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 I. 309–317.
- Salles, M. C. T.; Grigio, A. M.; Silva, M. R. F. DA 2013. *Expansão urbana e conflito ambiental: uma descrição da problemática do município de Mossoró, RN – Brasil*. Revista Sociedade e Natureza. v. 25 n. 2. Uberlândia - MG. Universidade Federal de Uberlândia.
- Santos, M 1988. *Metamorfoses do espaço habitado*. 6ª ed, Vol. 2, Editora Hucitec, São Paulo.
- Santos M 1996. *A natureza do espaço: técnica e tempo. Razão e emoção*. Editora Hucitec, São Paulo.
- Santos M 1994. *A urbanização brasileira*. Editora Hucitec, São Paulo.
- Santos, R. F. dos 2004. *Planejamento Ambiental: Teoria e prática*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Silva A. de B 2003. *Sistemas de Informações Georeferenciadas: conceitos e fundamentos*. Editora da Unicamp, São Paulo.
- Souza, M. L. de 2010. *Mudar a cidade: uma introdução crítica ao planejamento e gestão urbanos*. 6. ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro.
- Sousa, D.O., & Baptista, G.M.M 2005. *Análise da influência da resolução espacial na determinação das ilhas urbanas de calor em São Paulo, por meio dos sensores ASTER e MODIS* [Analysis of the influence of spatial resolution in determining the urban heat island in São Paulo, through ASTER and MODIS sensors]. In Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE, Goiânia.
- Sposito, M. E. B 2010. *Desafios para o estudo das cidades médias* In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE LA RED IBEROAMERICANA DE INVESTIGADORES SOBRE GLOBALIZACIÓN Y TERRITÓRIO, Anais. Mendoza: UNCUYO - Universidad de Cuyo. 01-18.
- Steinberger, M. A 2001. *(re) construção de mitos sobre a (in) sustentabilidade do (no) espaço urbano*. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais. Recife, Norma Lacerda, (n. 4). 9-32.
- Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E., Kuplich, T. M 2012. *Sensoriamento Remoto da Vegetação*. (2.ed atualizada e ampliada). Oficina de Textos, São Paulo.
- Villaça, F 1999. *Uma contribuição para a história do planejamento urbano no Brasil*. In: DEÁK, Csaba; SCHIFFER, Sueli Ramos (org.) *O processo de urbanização no Brasil*. EDUSP, São Paulo. 169–243.