ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise

Thayssa Barbosa da Silva Neves (1); Eleonora Sad Assis (2);

Daniele Gomes Ferreira (3); Rejane Magiag Loura (4).

(1) Doutoranda em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável (PPG-ACPS), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Arquiteta e Urbanista, thayssaneves@ufmg.br

(2) Professora (PPG-ACPS), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), elsad@ufmg.br

(3) Doutora em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável (PPG-ACPS), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Arquiteta e Urbanista, dani.gferreira@yahoo.com.br

(4) Professora (PPG-ACPS), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), rejane79@ufmg.br

Resumo

A população dos núcleos urbanos tende a crescer nas próximas décadas, tornando-se necessário o desenvolvimento de processos para um monitoramento mais sistemático das condições ambientais urbanas, considerando que as cidades impactam fortemente no sítio no qual estão inseridas. Este artigo tem como objetivo apresentar um breve panorama de pesquisas nacionais e internacionais sobre o clima urbano, com enfoque nos métodos e técnicas utilizados para a mensuração de ilhas de calor urbanas. O levantamento bibliográfico identificou a aplicabilidade dos métodos e técnicas em cidades de médio e pequeno portes, bem como apontou algumas lacunas para o avanço do conhecimento na área.

Palavras-chave: ilha de calor urbana; temperatura de superfície terrestre; sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The population of the urban centers tends to grow in the coming decades, making it necessary to develop processes for a more systematic monitoring of urban environmental conditions, considering that cities have a strong impact on the site they are located. This article aims to present a brief overview on national and international research on urban climate, focusing on the methods and techniques used to measure urban heat islands. The bibliographic survey identified the applicability of the methods and techniques in medium and small cities, as well as pointing out some gaps for the advancement of knowledge in the area.

Keywords: urban heat island; land surface temperature; remote sensing.

1. INTRODUÇÃO

A população dos núcleos urbanos tende ainda a continuar crescendo nas próximas décadas, tornando-se necessário o desenvolvimento de processos para um monitoramento mais sistemático das condições ambientais urbanas, considerando que as cidades impactam fortemente o sítio no qual estão inseridas. Do ponto de vista climático, o adensamento dos núcleos urbanos produz o aumento gradativo da temperatura e da poluição do ar, o que altera outros parâmetros, tais como a umidade, a dinâmica dos ventos, o índice pluviométrico e a qualidade do ar (IPCC, 2018). Aumenta-se, com isto, a vulnerabilidade a efeitos adversos do clima urbano e das mudanças climáticas em cidades e assentamentos onde a capacidade de adaptação é limitada, incluindo assentamentos informais em comunidades de baixa renda e em núcleos urbanos pequenos e médios (IPCC, 2022).

Os valores de temperatura e a concentração de poluentes são considerados indicadores expressivos de degradação ambiental. Espera-se, em geral, que ocorra um incremento significativo das temperaturas nas regiões mais densamente construídas dos núcleos urbanos, devido à presença de materiais de grande inércia térmica, à carência de vegetação e de corpos d’água superficiais, além da dissipação de calor das atividades humanas e das máquinas (LOMBARDO, 1988). Áreas urbanas densamente construídas e a excessiva impermeabilização das superfícies contribuem para a alteração do balanço de energia local, comprometendo substancialmente o fluxo turbulento de calor latente, que é o principal parâmetro do balanço relativo à perda térmica. Isto influencia também as condições de infiltração e escoamento da água, resultando em enxurradas e enchentes (ACIOLY e DAVIDSON, 1998).

A diferença do comportamento do clima entre a cidade e o campo próximo possui seus primeiros registros com os estudos realizados por Luke Howard no início do século XIX. A definição do termo Ilha de Calor Urbana (ICU), segundo Lombardo (1988), corresponde a uma área na qual a temperatura do ar é mais elevada do que nas áreas rurais ou adjacentes não urbanizadas, o que propicia o surgimento de uma circulação local do ar. A intensidade de ocorrência das ICUs pode variar de acordo com as características da superfície urbana, podendo ser identificadas ao se observar os parâmetros espaciais, aerodinâmicos, radiométricos e sazonais dos tecidos urbanos (OKE *et al.*, 2017).

Oke *et al.* (2017) propõem que há quatro tipos de ICU: (a) de superfície, (b) de sub-superfície, (c) de camada do dossel e (d) de camada limite. Cada um destes tipos é gerado por diferentes processos físicos dominantes e exibe padrões temporais e espaciais distintos, embora todos sejam produzidos principalmente pela transformação do ambiente natural pela ocupação urbana. Amorim (2019), por outro lado, define apenas três tipos de ICU: (a) ilha de calor de superfície (ICUS), mensurada pela estimativa da temperatura dos alvos superficiais registrados por meio de técnicas de sensoriamento remoto; (b) ilha de calor atmosférica inferior (camada do dossel), cuja temperatura do ar é registrada entre o nível do solo e o nível médio dos telhados; (c) ilha de calor atmosférica superior (camada limite), sobreposta à anterior e estendendo-se até a atmosfera livre.

Na figura 1, é possível notar o comportamento distinto que há entre a temperatura do ar e a temperatura de superfície, portanto havendo diferenças entre a ilha de calor atmosférica e a ilha de calor de superfície, tanto durante o dia quanto à noite. Durante o dia, identifica-se a T0 (Temperatura de Superfície) com valores superiores a Ta (Temperatura Atmosférica) e, durante a noite, os valores de T0 eTa são mais aproximados. De acordo com Oke *et al.* (2017), a T0 é diretamente influenciada pelas características geométricas, radiativas, térmicas, de umidade e aerodinâmicas da morfologia urbana. A variabilidade dessas propriedades explica a maior oscilação da temperatura da superfície em comparação com a temperatura do ar, principalmente durante o dia.

Diante do processo de urbanização, o fenômeno das ICUs também pode ser registrado em cidades de pequeno porte e a dimensão da população pode ser considerada como um sinal de influência sobre o clima local (KOPEC, 1970). A literatura pertinente à questão do clima urbano, em específico sobre Ilhas de Calor aponta que grande parte das pesquisas são realizadas em cidades de grande porte (LOMBARDO, 1988; GARTLAND, 2010; OKE *et al.*, 2017). Entretanto, alguns autores (VARDOULAKIS *et al*, 2014; KOTHAWALE *et. al*, 2016; ALVES e LOPES, 2017; AMORIM e DUBREUIL, 2017; CHIEPA e MITRA, 2018; ESPÍNDOLA e RIBEIRO, 2020; CARDOSO e AMORIM, 2020; AMORIM, 2020), assinalam a necessidade do estudo em cidades de pequeno e médio portes, pois estas também podem sofrer da mesma forma com as alterações do clima local tanto quanto núcleos urbanos com dimensões espaciais maiores.

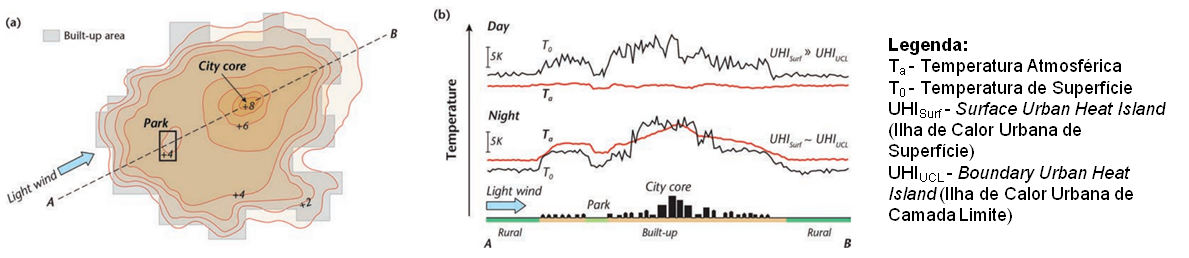


Figura 1 - Representação esquemática de uma ilha de calor urbana típica na escala da Camada Limite (UCL - *Urban Canopy Layer*) à noite em condições calmas e de céu claro em uma cidade em terreno relativamente plano. a) Mapa de isotermas ilustrando características típicas da ICU e sua correspondência com o grau de adensamento urbano; b) Corte Esquemático AB da temperatura de superfície e da temperatura do ar na altura padrão (Adaptado de OKE *et al.*, 2017).

O estudo de Zhou *et al.* (2018), realizado em 5.000 mil cidades europeias, identificou que as ICUs registradas encontram pontos de alívio em cidades pequenas, espraiadas e extensas. Os autores afirmam que cidades grandes e com alto grau de compacidade apresentam ICUs mais intensas do que cidades menores e mais espraiadas. Entretanto, Chieppa *et al.* (2018) e Cardoso e Amorim (2020) encontraram em cidades brasileiras médias e pequenas ICUs da mesma magnitude de cidades de grande porte do país.

A maior parte das pesquisas de ICU em cidades brasileiras ocorrem nas principais capitais do país, porém, a grande maioria dos municípios brasileiros são de pequeno e médio portes. Tais municípios carecem de estrutura administrativa, contingente técnico qualificado e enfrentam a escassez de recursos para lidar com a governança ambiental, apesar da gradativa melhoria das estruturas municipais e da descentralização das competências no processo de implementação de políticas públicas ligadas ao meio ambiente, ao clima e às mudanças climáticas (LEME, 2016).

Desse modo, a produção de conhecimento sobre o clima urbano desses municípios precisa contar com materiais e métodos acessíveis, que permitam o monitoramento e atualização periódica. Nesse sentido, as geotecnologias destacam-se como soluções ágeis, dinâmicas e de baixo custo que podem subsidiar tais estudos, podendo, além disso, ser integrados a outras bases de informações municipais (ROSA, 2005). O uso do sensoriamento remoto aliado a geotecnologias poderia, portanto, contribuir para o estudo do clima urbano nos municípios de pequeno porte.

Atualmente, o sensoriamento remoto terrestre conta com uma série de satélites que podem detectar, dentro da gama de frequências de onda da radiação solar, uma pequena e significativa porção do espectro eletromagnético. Os satélites podem ser definidos por 6 características fundamentais: a) órbita (polar ou não-polar); b) fonte de energia (passiva vs. ativa); c) espectros solares e terrestres (visível, UV, IR, Microondas); d) técnicas de medição (escaneamento, não-escaneamento, imagens, sondagem); e) tipo e qualidade de resolução (espacial, temporal, espectral, radiométrica); f) tipo de objeto de estudo: água, cor do oceano, mapeamento do solo, qualidade do ar, balanço de radiação (NASA, 2023). Dentre os sensores e instrumentos que compõem o corpo do satélite, algumas séries são construídas com banda termal, que auxilia na recuperação do valor da Temperatura de Superfície Terrestre (TST). Como exemplos, têm-se as séries *Landsat* (USGS) e o *Terra/Acqua-MODIS* (NASA) que possuem cobertura global completa, e o *Ecostress LST Data* (USGS) que abrange apenas algumas regiões limitadas no globo terrestre.

Diante do exposto, presume-se que a pesquisa sobre o clima urbano no Brasil ainda necessita ser bastante expandida, para que se possa desenvolver uma visão ampla da situação das cidades brasileiras e contribuir com o planejamento urbano sensível ao clima na escala adequada a cada tipo de núcleo urbano.

2. OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo apresentar um levantamento e comparação entre métodos e técnicas utilizados para a pesquisa de ilhas de calor urbanas, estabelecendo um breve panorama de pesquisas nacionais e internacionais, visando identificar metodologias mais apropriadas para lidar com o estudo do clima urbano em municípios de pequeno e médio portes no país.

3. MÉTODO

As produções técnico-científicas selecionadas foram categorizadas para análise de acordo com seus objetivos, métodos, técnicas e a escala de abordagem. Em seguida, as mesmas foram tabeladas de maneira a auxiliar na visualização do padrão de análise.

Dos 60 artigos escolhidos pela leitura do resumo, inicialmente foram selecionados vinte artigos a partir das seguintes palavras, expressões-chave e suas associações: “ilha de calor urbana”; “ilha de calor de superfície”; “sensoriamento remoto do clima urbano”; “métodos e técnicas em ICU”; “cidades de pequeno porte”; *“urban heat island”*; *“surface urban heat island”*; *“thermal remote sensing of urban climate”*; *“urban heat island methodology”*; *“small cities”*. A base pesquisada nesta abordagem inicial foi o *Google Scholar*.

Dentre os tipos de ICU, elegeu-se a ICUS devido à possibilidade de inferência climática remota (por meio de técnicas de geoprocessamento). Em seguida, como principal critério de seleção foi escolhido o parâmetro Temperatura de Superfície (TST), devido a sua importância na identificação de ICUS (AMORIM, 2019; ROMERO, 2019) em paralelo ao parâmetro vegetação, pois verificou-se na literatura levantada que a presença da vegetação traz benefícios no que tange à sua capacidade de amenização das temperaturas urbanas (LIMA e AMORIM, 2015; SANTOS *et al*., 2017; SILVA *et al*., 2019).

Feito isso, selecionou-se dez produções tendo como foco identificar os métodos e técnicas mais viáveis para serem empregados em uma metodologia de identificação e análise de ICU em cidades de pequeno e médio portes.

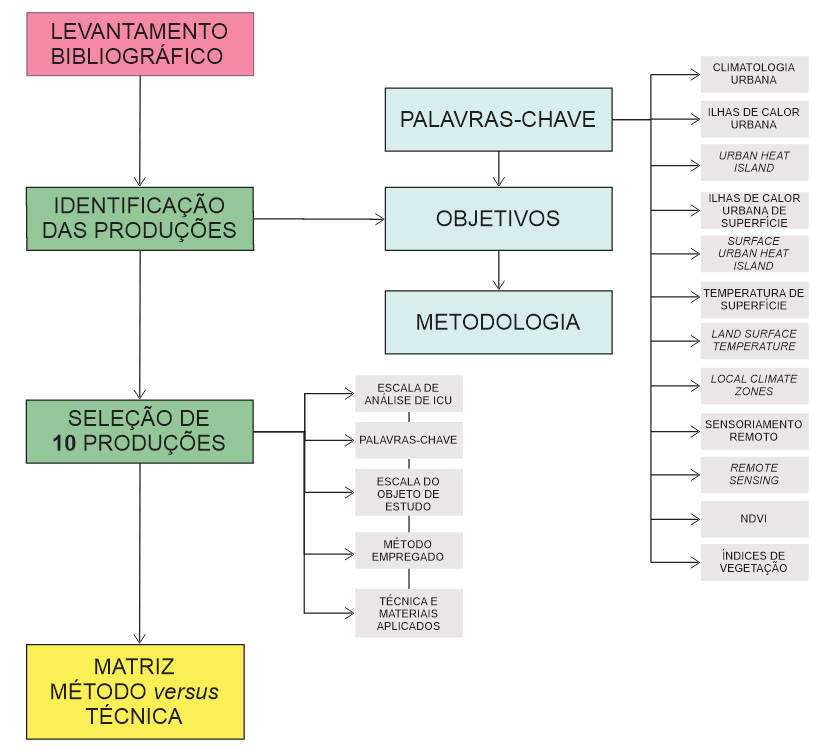


Figura 2 - Fluxograma simplificado da metodologia aplicada.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tendo em vista os dados tabelados com as produções acadêmicas escolhidas (Tabela 1), inicialmente é possível identificar um ponto comum entre os artigos, sendo a comprovação da existência de ilhas de calor urbanas a partir de correlações entre indicadores relacionados à vegetação e/ou uso do solo, por meio do uso de técnicas de sensoriamento remoto.

A maioria dos autores (YANG *et al.*, 2015; AMORIM, 2019; BECHTEL *et al.*, 2019; SANGIORGIO *et al.*, 2020;) apontam o uso do sensoriamento remoto como uma técnica viável para análise de ICU, como uma alternativa ao levantamento de dados de verdade terrestre, que demanda mais tempo e mão-de-obra para alcançar resultados. Além disso, os autores argumentam que os padrões espaciais das diferenças de temperatura não podem ser facilmente representados pela medição da temperatura do ar em pontos relativamente dispersos, de modo que observações sinóticas da TS usando dados de satélite podem contribuir para melhor compreensão da ICU.

Dos dez artigos listados, seis utilizaram imagens do Landsat das séries 5, 6, 7 e/ou 8 (SOUZA e FERREIRA, 2012; YANG *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2019; LIMA e AMORIM, 2019; BECHTEL *et al.*, 2019) e dois utilizaram imagens do satélite MODIS, banda MOD11 (SOUZA e FERREIRA, 2012; BECHTEL *et al.*, 2019).

A estimativa da TST usando as bandas termais dos satélites utilizados pelos autores apresenta-se como uma técnica para identificação de diferenças de temperatura das estruturas urbanas, por meio da análise da refletância dessas superfícies (SOUZA e FERREIRA, 2012). Além disso, a correlação desta variável e outros parâmetros que interferem nesta escala climática também foi usada na análise de ICUs.

Tabela 1 - Características dos trabalhos selecionados.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Fonte** | **Tipo de ICU** | **Local** | | **Escala de Análise** | **Porte do Local** | **Clima1** | **Método** | | **Técnica** | | |
| **Parâmetros** | **Período** | **SR2**  **(Satélite)** | **Método Estatístico** | **Medição** |
| Santos et al., 2017 | Superfície | Vila Velha, ES  Brasil | Municipal | | Médio | Aw | LST;  NDVI;  NDBI | 2008 - 2011 | GeoEye Satellite; LANDSAT 5 | Correlação de Pearson; Algoritmo "mono-window" | Estação Fixa) |
| Assis et al., 2007 | Camada do dossel | Paracatu; Catagua-ses; Sete Lagoas, MG Brasil | Municipal | | Pequeno | Aw,  Am, Cwa | Temp. do Ar, Umidade Relativa, Velocidade do Vento | 2007 | – | Krigagem | Estação Fixa |
| Souza; Ferreira, 2012 | Superfície | Goiânia, GO Brasil | Municipal | | Grande | Aw | LST;  Temp. do Ar | 2002 e 2011 | LANDSAT 5, 7; MODIS 11; Quickbird | Spectral Radiance Scaling Method | Estação Fixa |
| Lima; Amorim, 2015 | Superfície | Nova Andradi-na, MS Brasil | Municipal | | Pequeno | Aw | LST;  NDVI;  Temp. do Ar | 2002 | LANDSAT 7 | – | Transecto Móvel |
| Silva et al., 2019 | Superfície | Natal , RN Brasil | Municipal | | Médio | As | Albedo; NDVI;  NDBI | 2001 | LANDSAT 7 | Regressão Linear; Probabilística | – |
| Bechtel et al., 2019 | Superfície | 50 distritos urbanos | Global | | Médio a Grande | Vários | TST;  LCZ | 2003 à 2014 | LANDSAT 8;  Terra e Aqua/MODIS | Interpolação B-Spline;  Correlação de Pearson | – |
| Joshi et al., 2022 | Superfície | Líege, Bélgica | Municipal | | Grande | Cfb | LCZ; SVF; AR; GSI; ISF; PSF; HRE; OSR; MA; NB; SH; SA; DB; DCR Ratio; SF; FAI; AH; Po | 2021 | SENTINEL 2A | PCA + *k means*;  CCC + *pseudo F;* ANOVA | – |
| Yang et al., 2015 | Superfície | Hong Kong ,  China | Municipal | | Grande | Cfa | TST;  SVF | 2013 | LANDSAT 8; Airborn LiDAR | UEM-SCM;  Algoritmo “split window” | – |
| Sangiorgio et al., 2020 | Superfície | 41 Distritos Urbanos | Municipal | | Pequeno à Grande | Vários | Albedo; Vegetação;  Densidade;  Largura e Orientação das ruas; Altura dos edifícios; Dias de céu claro;  Dias de calmaria;  T média máxima no verão; TST média no verão. | 2020 | LANDSAT 7; LANDSAT 8 | Análise multicritério  (MCDM); Processos Analíticos Hierárquicos (AHP) | Estação Fixa |
| Chieppa et al., 2018 | Camada do dossel | Auburn, Opelika (EUA) | Municipal | | Pequeno | Cfa | LCZ;  Temp. do Ar | 2017  Durante 1 mês | LANDSAT 8 | ANOVA;  *pseudo F* | Estação Fixa |

(1) Classificação De Köppen-Geiger; (2) Sensoriamento remoto.

A correlação com o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index -* Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) mostrou-se uma das abordagens mais comuns (LIMA e AMORIM, 2015; SANTOS *et al.*, 2017; BECHTEL *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2019).

A revisão apontou convergências entre os trabalhos analisados ao correlacionar o registro valores altos de TST em áreas com pouca ou ausência de vegetação. Pesquisas que relacionam a TST a indicadores representativos da geometria urbana, tais comoSVF *(Sky View Factor),* NDBI *(Normalized Difference Built-up Land Index),* OSR *(Open Space Ratio),* FSI *(Floor Space Index),* GSI *(Ground Space Index)* também mostram a tendência de aumento da temperatura com o adensamento construtivo.

Souza e Ferreira (2012) investigaram o padrão de distribuição da TST em uma cidade de médio a grande porte (Goiânia, GO) por meio da combinação de imagens de dois satélites diferentes, Landsat 7 (banda termal) e MODIS (banda 11). Essa metodologia apresentou a possibilidade de reforçar a acurácia do uso de imagens de satélite para análise de TST, pois a resolução espacial e a correção atmosférica podem influenciar no valor final da temperatura registrada pelo sensor termal.

Santos *et al.* (2017) correlacionaram o padrão de distribuição da TST com o NDVI e o NDBI, por meio do uso de imagens do satélite Landsat 5. Os autores encontraram uma relação positiva entre a TST e o NDBI nas áreas densamente construídas, bem como identificaram que áreas com presença de vegetação atenuaram o efeito da ICUS. Apontaram como medida legislativa a arborização urbana para efeito de mitigação da ICUS e a melhoria do conforto térmico em áreas urbanas.

O padrão dos tipos de agrupamentos edilícios também pode interferir na forma como o calor é refletido e dissipado dentro do dossel urbano. Yang *et al.* (2015) estudaram as TST estimadas com e sem o efeito da geometria em uma cidade de grande porte (Hong Kong, China), usando dois procedimentos diferentes cujos resultados foram convergentes. Os resultados mostram que os LSTs sem efeito de geometria são geralmente maiores do que os LSTs com efeito de geometria. A diferença de temperatura ocorre porque a emissividade do material é sempre menor que a emissividade efetiva causada por múltiplos espalhamentos e reflexões em áreas urbanas (efeito de *canyon*). Desse modo, a radiância que deixa a superfície é diferente da emitância por pixel e, assim, os autores concluíram que a exitância dos alvos é mais apropriada para representar a superfície urbana e derivar a estimativa da TST. A diferença de temperatura com e sem efeito de geometria chegou a 2K no caso estudado por Yang *et al*. (2015) e pode variar, de acordo com a revisão destes autores, entre -5K a +7K, sendo também significativas as diferenças entre o período diurno e o noturno.

A classificação LCZ *(Local Climate Zones -* Zonas Climáticas Locais*)*, um sistema de descrever padrões gerais de uso e ocupação do solo em áreas urbanas e seu entorno (STEWART e OKE, 2012), tem sido também usada nos estudos de ICU e ICUS (CHIEPPA *et al.*, 2018; BECHTEL *et al.*, 2019). Chieppa *et al.* (2018) estudaram duas cidades de pequeno porte nos EUA dentro de um mesmo domínio climático, com aferições da temperatura do ar por meio de transectos móveis, em sítios urbanos e naturais adjacentes similares e com a mesma classificação LCZ nas duas cidades. Embora reconhecendo a facilidade de uso da classificação LCZ e do seu potencial de aplicação, os autores não encontraram semelhança entre as diferenças de temperaturas urbana-rural calculadas para as áreas urbanas de mesma classificação nas duas cidades. Chieppa *et al.* (2018) concluíram que a classificação LCZ não deve ser usada para predizer a intensidade da ICU, mesmo que os tecidos urbanos tenham a mesma classificação e as cidades estejam próximas e no mesmo domínio climático. Além disso, considerando uma urbanização mais fragmentada e menos homogênea como nas cidades de pequeno porte, recomendaram o uso de resolução mais alta na grade de classificação de LCZ para áreas urbanas desse porte.

Bechtel *et al.* (2019) analisaram a adequação da classificação LCZ para estudos de ICUS, com base em resultados gerados para 50 cidades ao redor do mundo. A TST média multianual extraída de imagens Landsat e a TST média anual extraída de imagens em várias horas de passagem do satélite MODIS foram combinadas com as classificações LCZ destas cidades. As estimativas de LST usando produtos dos dois satélites tiveram alta correlação em horários similares. Os resultados, porém, mostraram diferenças significativas na estimativa intra-urbana de ICUS para diferentes tipos de LCZ, uma grande variabilidade de intensidade de ICUS dentro de uma mesma classe e entre cidades, bem como grande variabilidade dos padrões de ICUS com a hora do dia. Os autores recomendaram filtrar efeitos da topografia, incluir as condições fenológicas na seleção de imagens e, principalmente, identificar a escala de correspondência entre a TST e a classificação LCZ, o que ainda não está claro nos estudos.

Há, também, trabalhos que usam resultados da pesquisa sobre ilhas de calor urbanas para compor índices ou desenvolver aplicações que podem auxiliar no planejamento urbano. Sangiorgio *et al.* (2020) apresentaram a calibração de um novo indicador, UHII (*Urban Heat Island Index –* Índice de Ilha de Calor Urbana),que abrange 11 parâmetros urbanos que podem influenciar os valores de temperatura do ar e da superfície. Utilizou-se a combinação interdisciplinar de dados de meteorologia, conhecimento do fenômeno ICU, estatística, otimização e análise multicritério, mineração de dados, processamento de dados de satélite e análise de imagens. Os autores aplicaram o estudo em 41 distritos urbanos e identificaram que o albedo e a presença de vegetação representavam as características mais importantes, com influência de 29% e 21%, respectivamente. A densidade populacional, a largura das ruas, a orientação do *canyon* urbano e a altura dos edifícios têm uma influência média na geração de ICU de 12%, 10%, 9% e 8%, respectivamente. Os parâmetros restantes tiveram uma influência conjunta de 11%.

Silva *et al.* (2014), apresentaram a proposta de um Índice de Vulnerabilidade para o Clima Urbano (IVCU) para uma cidade de médio a grande porte (Natal, RN) a partir da correlação do NDVI, NDBI e dos valores de albedo das superfícies predominantes, por meio de técnicas de regressão linear. Os autores identificaram que o processo de urbanização de Natal está diretamente relacionado à presença de anomalias térmicas que podem afetar o conforto térmico e a qualidade de vida da população, pois estas tendem a se acentuar justamente onde o uso e a ocupação do solo são mais intensos e consolidados na cidade.

Assis *et al.* (2007) estudaram três municípios mineiros, utilizando métodos da climatologia urbana para elaborar um diagnóstico das condições locais e subsidiar os trabalhos de planejamento e definição de macrozoneamento urbano. Foram medidos e mapeados dados em escala microclimática que foram cruzados com dados de topografia e ocupação do solo para que fosse possível estabelecer diretrizes de mitigação dos efeitos de ICU. Os resultados de mapeamento microclimático foram relacionados a aspectos sociais, de patrimônio histórico e geológicos, o que embasou a elaboração de diretrizes legislativas abarcando os parâmetros enfatizados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou um breve panorama bibliográfico acerca de métodos e técnicas utilizados para a análise de Ilha de Calor Urbana, com enfoque na escala da camada do dossel.

Na análise identificou-se que a maioria dos métodos de estimativa da TST utilizam o NDVI, pois a ausência de vegetação e o registro de temperaturas de superfície mais altas apresentam uma relação positiva. O uso de imagens de satélite que contenham banda termal com cobertura global é frequente utilizado para estudos de ICUS, buscando comparar um certo número de áreas urbanas, pois é um meio de identificar a TST de modo uniforme e de fácil atualização da informação diante da periodicidade da passagem dos satélites.

Algumas lacunas também puderam ser encontradas, tais como: (a) o satélite mais utilizado, a série Landsat, possui uma resolução espacial razoável (30 m), o acesso é gratuito, porém a resolução temporal (revisita em 16 dias) pode reduzir o número de imagens viáveis (sem nuvens) para a análise da temperatura de superfície; (b) mesmo com as correções atmosféricas e de altura dos alvos, a temperatura de superfície registrada pelo satélite tende a ser um pouco mais elevada que a registrada *in loco*; (c) as correlações entre os dados de TST e as variáveis de parâmetros urbanos poderiam ser mais significativas com a consideração do efeito da geometria urbana (YANG *et al.*, 2015) e a filtragem dos efeitos da topografia (BECHTEL *et al.*, 2019); (d) a relação entre TST e a classificação LCZ ainda demanda estudos mais aprofundados, principalmente para identificar em que escala haveria correspondência entre temperatura das superfícies urbanas e as classes de uso e ocupação do solo; (e) os estudos de ICU são majoritariamente realizados em cidades de médio a grande portes, podendo ser muito úteis para cidades menores, que estão em processo de adensamento e expansão urbana (CHIEPPA *et al*., 2018; AMORIM, 2020).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIOLY, C.; DAVIDSON, F. **Densidade urbana: um instrumento de planejamento e gestão urbana**. S.l.: Mauad Ed., 1998

ALVES, E. D. L.; LOPES, A. The Urban Heat Island Effect and the Role of Vegetation to Address the Negative Impacts of Local Climate Changes in a Small Brazilian City. **Atmosphere**, v. 8, n. 2, p. 18, 2017.

AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, V. Intensity of urban heat islands in tropical and temperate climates. **Climate**, v. 5, n. 4, p. 91, 2017.

AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. **Revista Brasileira de Climatologia**, 25, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.5380/abclima.v0i0.65136.

AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor urbano em cidades de pequeno e médio porte no Brasil e o contexto das mudanças climáticas. **Confins: Revue Franco-Brésilienne de Géographie/Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 46, 2020. Disponível em: https://journals.openedition.org/confins/31403

ASSIS, E. S.; RAMOS, J. G. L.; SOUZA, R. V. G.; CORNACCHIA, G. M. M. Aplicação de dados do clima urbano no desenvolvimento de planos diretores de cidades mineiras. In: **Encontro Nacional e Latino americano de Conforto no Ambiente Construído**, 9. e 5., 2007, Ouro Preto (Minas Gerais). **Anais**… Porto Alegre: ANTAC, 2007, p. 152-161.

BECHTEL, B.; DEMUZERE, M.; MILLS, G. *et al.* SUHI analysis using Local Climate Zones — A comparison of 50 cities. **Urban Climate**, v. 28, p. 100451, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.01.005.

CARDOSO, R. S.; AMORIM, M. C. C. T. Intensidade das ilhas de calor em Presidente Prudente (SP) através de zonas climáticas locais (LCZ). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 1685-1696, 2017.

CHIEPPA, J.; BUSH, A.; MITRA, C. Using “Local Climate Zones” to detect urban heat islands on two small cities in Alabama. **Earth Interactions**, v. 22, n. 16, p. 122, 2018.

CHING, J.; MILLS, G.; BECHTEL, B. *et al.* WUDAPT: An urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the anthropocene. **Bulletin of theAmerican Meteorological Society**, v. 99, n. 9, p. 1907-1924, 2018.

SANTOS, A. R.; OLIVEIRA, F. S.; SILVA, A. G. *et al.* Spatial and temporal distribution of urban heat islands. **Science of the Total Environment**, v. 605, p. 946-956, 2017.

ESPÍNDOLA, I. B.; RIBEIRO, W. C. Cidades e mudanças climáticas: desafios para os planos diretores municipais brasileiros. **Cadernos Metrópole**, v. 22, p. 365-396, 2020.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

FOISSARD, X.; QUÉNOL, H.; DUBREUIL, V. Analyse et spatialisation de l’ilot de chaleur urbain dans l’agglomération rennaise. In: Colloque de l’Association Internacionale de Climatologie: Climat, Agriculture et Ressources en Eau d’hier à demain*,* 26.,2013,Cotonou (Bénin). **Actes**... Cotonou: AIC, 2013, p. 242-247.

IPCC, 2018. Summary for Policymakers. *In:* *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts *et al.,* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24.

IPCC, 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor *et al,*(eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.

JOSHI, M. Y.; RODLER, A.; MUSY, M. *et al.* Identifying urban morphological archetypes for microclimate studies using a clustering approach. **Building and Environment**, v. 224, p. 109574, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109574.

KOPEC, R. Further observations of the urban heat island in a small city. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 51, p. 602–606, 1970.

KOTHAWALE, D. R.; DESHPANDE, N. R.; KOLLI, R. K. Long term temperature trends at major, medium, small cities and hill stations in India during the period 1901-2013. **American Journal of Climate Change**, v. 5, n. 3, p. 383-398, 2016.

LEME, T. N. Governança ambiental no nível municipal. In: MOURA, A. M. M. (org.). **Governança ambiental no Brasil: instituições, atores e políticas públicas**. Brasília, IPEA, 2016, pp. 147-174. Disponível em https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9269.

LIMA, V.; AMORIM, M. C. C. T. A utilização de informações de temperatura da superfície, do NDVI e de temperatura do ar na análise de qualidade ambiental urbana. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 15., 2011, Curitiba (Paraná). **Anais**… Curitiba: TecArt Editora Ltda., 2011, p. 1028-1035.

LOMBARDO, M. A. A ilha de calor de São Paulo. **Revista Ambiente**, v. 2, n. 1, p. 14-18, 1988.

NASA. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto. ARSET - Applied Remote Sensing Trainning Program**. Disponível em https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-fundamentals-remote-sensing. Acesso em 23/06/2023.

OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, v.7, p.769-779, 1973.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban climates**. Cambridge University Press, 2017.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. **Rev. Dep. Geografia**, v. 16, 2005, p. 81-90. Disponível em: https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47288.

ROMERO, M. A. B.; BAPTISTA, G. M. D. M.; LIMA, E. A. D. *et al.* **Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas**. Brasília: ETB, 2019.

SANGIORGIO, V.; FIORITO, F.; SANTAMOURIS, M. Development of a holistic urban heat island evaluation methodology. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-13, 2020.

SILVA, F. M.; COSTA JUNIOR, N. P.; LIMA, Z. M. C. Avaliação microclimática de Natal/RN através de técnicas de sensoriamento remoto: uma contribuição aos estudos do clima urbano. **Sociedade e Território**, v. 26, n. 2, p. 163-180, 2014.

SOUZA, S. B.; FERREIRA, L. G. Análise da temperatura de superfície em ambientes urbanos: um estudo por meio de sensoriamento remoto no município de Goiânia, Goiás (2002–2011). **Confins: Revue Franco-Brésilienne de Géographie/Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 15, 2012. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/7631>

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

VARDOULAKIS, S.; DEAR, K.; HAJAT, S. *et al.* Comparative assessment of the effects of climate change on heat-and cold-related mortality in the United Kingdom and Australia. **Environmental Health Perspectives**, v. 122, n. 12, p. 1285-1292, 2014.

YANG, J.; WONG, M. S.; MENENTI, M.; NICHOL, J. Study of the geometry effect on land surface temperature retrieval in urban environment. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 109, p. 77-87, 2015.

ZHOU, D.; XIAO, J.; BONAFONI, S. *et al*. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 48-84, 2018.