

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

RODRIGO PASSOS FERNANDES

**ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS E ILHAS DE CALOR URBANAS DA SUPERFÍCIE
EM PORTO ALEGRE (RS – BRASIL) ENTRE 2002 E 2023**

PORTO ALEGRE

2023

RODRIGO PASSOS FERNANDES

**ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS E ILHAS DE CALOR URBANAS DA SUPERFÍCIE
EM PORTO ALEGRE (RS – BRASIL) ENTRE 2002 E 2023**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Wellausen Dias de Freitas

Coorientador: Prof. Dr. Victor Fernandez Nascimento

PORTO ALEGRE

2023

CIP - Catalogação na Publicação

Fernandes, Rodrigo Passos
ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS E ILHAS DE CALOR URBANAS DA
SUPERFÍCIE EM PORTO ALEGRE (RS - BRASIL) ENTRE 2002 E
2023 / Rodrigo Passos Fernandes. -- 2023.
72 f.
Orientador: Marcos Wellausen Dias de Freitas.

Coorientador: Victor Fernandez Nascimento.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2023.

1. LCZ. 2. SUHI. 3. GEOBIA. 4. Brasil. I. Dias de
Freitas, Marcos Wellausen, orient. II. Nascimento,
Victor Fernandez, coorient. III. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais e minha madrinha por todo incentivo e ajuda para que meus estudos fossem possíveis.

AGRADECIMENTOS

À CAPES pela concessão da bolsa de pesquisa.

À Universidade Federal pelo espaço de formação e pelas experiências enriquecedoras.

Ao meu orientador Marcos Freitas e coorientador Victor Nascimento pelas contribuições inestimáveis na construção desse e outros trabalhos em minha formação.

Aos meus colegas de curso que participaram, em vários momentos, da construção desse estudo e me auxiliaram em momentos inestimáveis.

Aos meus amigos e namorada pelo incentivo e pela presença em todos os momentos da minha vida.

Os sonhos das pessoas
nunca tem fim.

Eiichiro Oda

RESUMO

A dissertação tem como foco a aplicação de uma metodologia usada globalmente, mas ainda pouco explorada no Brasil: o uso das Zonas Climáticas Locais (LCZ) para identificar as Ilhas de Calor na Superfície (SUHI) urbana. O objetivo é preencher essa lacuna no contexto brasileiro. O estudo é dividido em dois artigos. No primeiro é conduzida uma revisão sistemática que explora o uso das LCZs para estudar as temperaturas de superfície e o fenômeno SUHI. Nesse artigo, o método PRISMA é empregado, resultando em 51 artigos para análise aprofundada, quando são avaliados aspectos como relevância científica, contribuições, satélites e sensores predominantes, métodos de obtenção e cálculos mais utilizados nos estudos. Foi constatado que não existem publicações sobre o tema no Brasil até a data da pesquisa, evidenciando a necessidade de sua aplicação. No segundo artigo, é realizada uma aplicação em Porto Alegre, utilizando o sistema de classificação LCZ. Imagens de alta resolução da Planet, com dados de Modelagem Digital de Elevação, declividade e orientação de vertente, são usados para segmentação com a técnica GEOBIA. Além disso, imagens térmicas Landsat são integradas. A segmentação é realizada com o software *EcoGnition* e análises subsequentes são realizadas com algoritmos disponíveis em Sistema de Informação Geográfica (SIG) e linguagem R. O mapa LCZ de 2023 é gerado com acurácia global de 85,7%. A análise revela mudanças nas classes LCZ ao longo dos anos, destacando o crescimento da classe LCZ 6 de 5,1% no período de 2002 a 2010 e ocorrendo estabilidade de 2010 a 2023. As temperaturas da superfície são analisadas sazonalmente, com grandes variações nas LCZs ao longo dos anos entre as estações, quando a LCZ 2 no verão apresentou alta temperatura, de 38 °C, em 2002 e 2010, embora em 2023 a LCZ 3 tenha alcançado a temperatura de 40 °C. O inverno foi a estação com as menores médias de temperatura e amplitudes térmicas, com variações 2 °C. Testes estatísticos como Análise de variância e o Kruskal-Wallis, com nível de significância de 5%, validam diferenças significativas nas médias da temperatura da superfície (LST). A dissertação cumpre o seu objetivo, introduzindo uma metodologia no Brasil. A pesquisa procura estimular estudos adicionais sobre o clima urbano, especialmente diante das mudanças climáticas e do aquecimento global.

Palavras-chave: LCZ. SUHI. GEOBIA. Brasil.

ABSTRACT

The dissertation focuses on the application of a widely used methodology globally, yet still relatively unexplored in Brazil: the use of Local Climate Zones (LCZs) to identify Urban Heat Islands (UHI) on the urban surface (SUHI). The objective is to fill this gap in the Brazilian context. The study is divided into two articles. The first article conducts a systematic review exploring the use of LCZs to study surface temperatures and the SUHI phenomenon. In this article, the PRISMA method is employed, resulting in 51 articles for in-depth analysis. Aspects such as scientific relevance, contributions, predominant satellites and sensors, and commonly used methods of data acquisition and calculation are evaluated. Remarkably, it was observed that there were no publications on the topic in Brazil up until the research date, highlighting the need for its application. In the second article, a methodological application is carried out in Porto Alegre, utilizing the LCZ classification system. High-resolution images from Planet, with Digital Elevation Modeling data, slope, and aspect information, are used for segmentation using the GEOBIA technique. Additionally, Landsat thermal images are integrated. Segmentation is conducted using the EcoGnition software, followed by subsequent analyses using GIS tools and R programming. The 2023 LCZ map is generated with an overall accuracy of 85.7%. The analysis reveals changes in LCZ classes over the years, highlighting a growth of 5.1% in LCZ class 6 from 2002 to 2010, followed by stability from 2010 to 2023. Surface temperatures are analyzed seasonally, with notable variations in LCZs across years and seasons. LCZ 2, during summer, exhibited highs of 38°C in 2002 and 2010, whereas for 2023, LCZ 3 reached 40°C. Winter had the lowest averages and thermal amplitudes, registering a 2°C difference. Statistical tests such as Analysis of Variance and Kruskal-Wallis, at a 5% significance level, validate significant differences in LST means. The dissertation successfully achieves its objective by introducing the methodology to Brazilian territory. The research aims to stimulate further studies on the Brazilian urban climate, especially in the face of climate change and global warming, which directly impact urban populations.

Keywords: LCZ. SUHI. GEOBIA. Brazil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema dos temas dos artigos estudados	12
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GEOBIA	Geographic Object Based Image Analysis
LST	Temperatura da Superfície
LCZ	Zonas Climáticas Locais
SUHI	Ilha de Calor Urbana da Superfície
<i>TIRS</i>	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
UHI	Ilha de Calor Urbana
WUDAPT	<i>World Urban Database and Access Portal Tools</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	Primeiro artigo: Contexto e relação com a dissertação.....	16
2.2	Segundo artigo: Contexto e relação com a dissertação.....	17
3	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÃO FINAL.....	18
	FINANCIAMENTO.....	21
	REFERÊNCIAS.....	22
	APÊNDICE A – Artigo 1.....	25
	APÊNDICE B – Artigo 2.....	45

1 INTRODUÇÃO

Mudanças no ambiente das cidades estão correlacionadas ao aumento da urbanização e da população, agravando-se quando cada vez mais pessoas se mudam para áreas urbanas, resultando no fato de que, atualmente, mais da metade da população mundial mora em cidades. As cidades são locais fundamentais para atividades humanas, servindo como centros econômicos, sociais e culturais. Por conta disso, o futuro da raça humana depende do desenvolvimento sustentável das cidades (PURIO *et al.*, 2022; SHEN *et al.*, 2022).

O objetivo 11, um dos objetivos do desenvolvimento sustentável das nações unidas, é um que precisa ser alcançado pela humanidade para garantir que os assentamentos urbanos sejam inclusivos, seguros e resilientes. Entretanto, a sustentabilidade nas cidades não pode ser alcançada se a expansão urbana, consumo e atividades humanas não levem em consideração os elementos do meio ambiente e o clima urbano (KANGA *et al.*, 2022).

Um dos principais problemas gerados pela falta de sustentabilidade nos centros urbanos, é a existência de Ilhas de calor urbanas, que em inglês são conhecidas como *Urban Heat Island* (UHI). Esse fenômeno é originado devido aos materiais utilizados nos assentamentos humanos serem geralmente compostos por concreto, asfalto, tijolo, e também devido a supressão vegetal, para dar espaço às atividades humanas (LI *et al.*, 2022). Na literatura, como elucida Fernandes *et al.*, (2023) e Xia *et al.*, (2022), existem 3 tipos mais comuns de Ilhas de calor urbanas, entre as quais duas são identificadas por meio de dados *in situ* de estações meteorológicas, essas sendo a Ilha de calor do dossel urbano e a Ilha de calor da camada limite, e a terceira, chamada de Ilha de calor da superfície, é identificada por meio de dados de sensores remotos termais disponíveis em satélites, como os da série Landsat, em operação desde 1982, com a banda do termal no Landsat 4 do sensor *Thematic Mapper*, com resolução espacial de 120 metros, e atualmente o Landsat 8 e 9 operando para o termal na resolução de 100 metros do sensor *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) e TIRS 2, respectivamente (USGS, 2020).

Pensando nesse fenômeno, que tem sido uma preocupação crescente por afetar a economia, a saúde humana e os elementos do ambiente, metodologias de identificação da SUHI foram propostos na literatura, para se contraporem com os

procedimentos tradicionais de diferenciação da zona urbana e da zona rural, pois apesar das cidades apresentarem materiais que acumulam mais temperatura, também é possível que centros urbanos possuam regiões com coberturas que dissipam e não retenham tanta energia (DONG et al., 2022). Pensando nisso, surgiram as Zonas Climáticas Locais, que em inglês se denomina *Local Climate Zones* (LCZ), desenvolvidas por Stewart e Oke (2012). Esse é um sistema que classifica as áreas urbanas em 17 diferentes tipos de classes, divididas em duas categorias: i) classes de construção (LCZ 1 – 10), essas caracterizando classes com materiais construídos e são diferenciadas de acordo com a forma geométrica, tamanho e espaçamento das construções; e ii) classes de cobertura (LCZ A – G), essas diferenciadas de acordo com o tipo de cobertura do solo, com variedades de distribuição de árvores, presença solo exposto ou corpos hídricos (ZHU et al., 2022). Portanto, estudos que focam em utilizar as LCZs na identificação das diferenças de temperatura entre vários tipos de classes LCZs nos centros urbanos têm aumentado, conforme comentam Fernandes et al. 2023.

Entretanto, nem só os materiais construtivos utilizados nas cidades e a falta de cobertura vegetal, contribuem com o fenômeno da SUHI, mas a geometria das construções também exerce grande influência para a formação de ilhas de calor.

Diante do exposto, a técnica *Geographic Object-Based Image Analysis* (GEOBIA), aplicada em imagens aéreas ou orbitais com alta resolução espacial, como as imagens da constelação de nanossatélites da Planet, do sensor SuperDove (PSB.SD), atingindo resolução espacial de 3 metros, pode ser uma alternativa para melhor identificar a SUHI, possibilitando a identificação da LCZ em áreas urbanas com melhor precisão, por ter a capacidade de distinguir os objetos imageados levando em conta elementos como cor, textura, forma e tamanho (RUIZ et al., 2021).

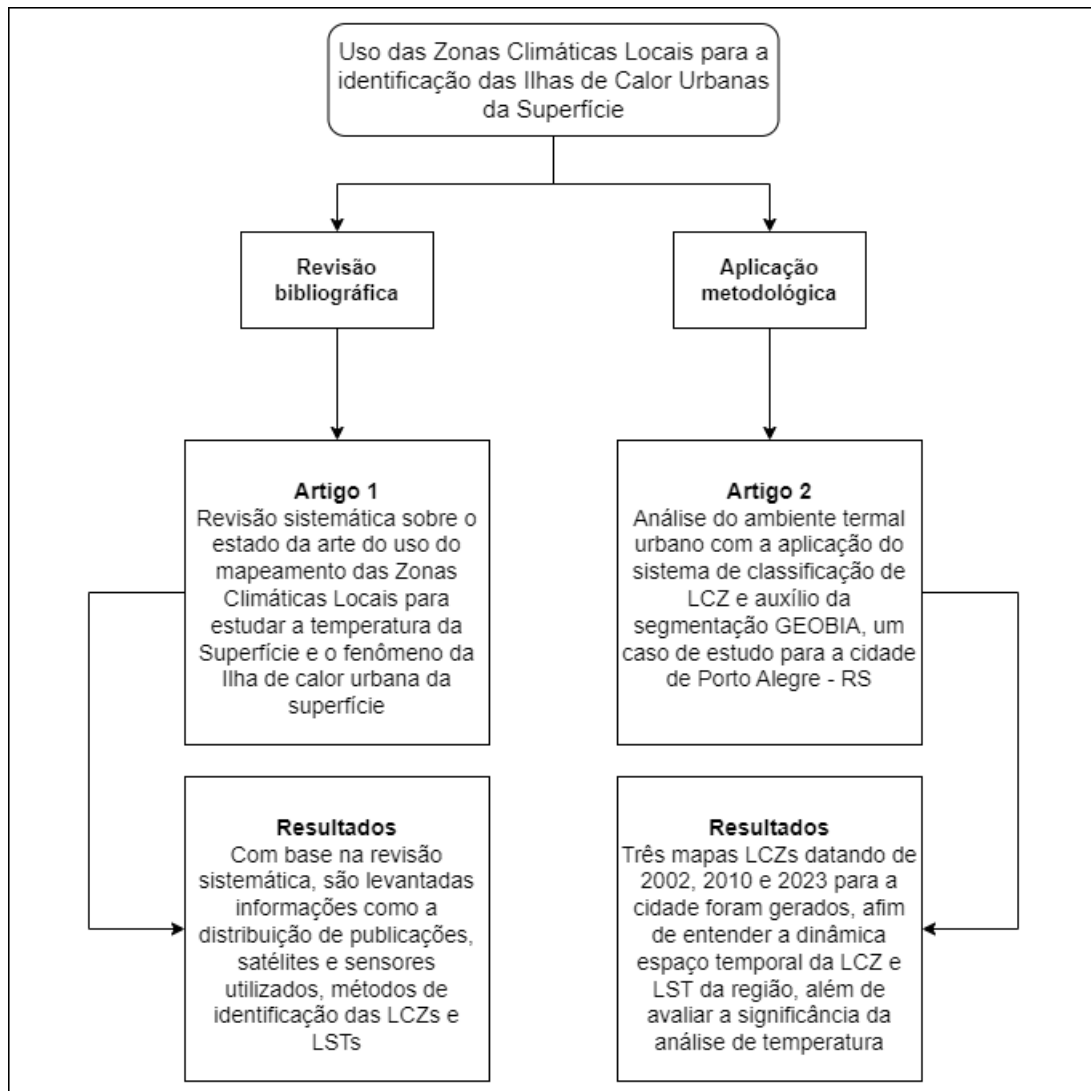
Na literatura, existem muitos estudos sobre a SUHI e a identificação da LCZ (SHI et al., 2021). Fernandes et al. (2023) consultaram sobre a existência de aplicações da SUHI e LCZ no Brasil, e não encontraram nenhum trabalho sobre o tema, pelo menos até a data em que a esta pesquisa foi realizada, em junho de 2022.

Portanto, a presente dissertação busca entender as alterações no ambiente termal urbano de Porto Alegre, ou seja, como as anomalias de SUHI, estão

correlacionadas com a dinâmica da LCZ, através do uso de técnicas de sensoriamento remoto e de análise espaçotemporal. Esse é um estudo pioneiro no Brasil, seguindo assim uma tendência mundial de uso de dados termais em centros urbanos.

Nesse sentido, a Figura 1 apresenta um esquema dos dois artigos que foram desenvolvidos e as relações entre os resultados para alcançar a aplicação proposta na pesquisa. O primeiro artigo reuniu o estado da arte por meio de uma revisão sistemática realizada e o segundo artigo é a aplicação de uma metodologia proposta para a cidade de Porto Alegre, localizada no Estado de Rio Grande do Sul, região Sul do País.

Figura 1 – Temas dos artigos produzidos.



Fonte: Elaboração Própria (2023).

A contextualização de cada artigo será apresentada no Referencial Teórico deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Primeiro artigo: Contextualização e relação com a dissertação

O primeiro artigo é intitulado *Local Climate Zones to Identify Surface Urban Heat Islands: A Systematic Review*. Este artigo de revisão tem como objetivo analisar os trabalhos publicados na literatura que utilizam os mapas de classificação das Zonas Climáticas Locais (LCZ) para estudar a temperatura da superfície (LST) e o fenômeno da ilha de calor urbana da superfície. Pois, na literatura científica, há uma escassez de estudos que tenham realizado uma revisão sistemática abordando a influência das LCZs sobre a LST e SUHI. Logo, este artigo de revisão tem como objetivo preencher essa lacuna. Utilizamos o *VosViewer*, sendo uma ferramenta que facilita a construção e a visualização de redes bibliométricas, permitindo observar a evolução do número de publicações ao longo dos anos, identificar autores e artigos mais citados, destacar áreas de pesquisa em evidência e analisar as palavras-chave mais frequentemente utilizadas (VAN ECK; WALTMAN, [s.d.]. Além disso, o método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) foi aplicado para acompanhar o estado atual dessa temática sugerida, servindo para auxiliar os revisores a relatar de forma transparente e coesa, o porquê e como a revisão é feita, quais métodos foram empregados e o que os autores encontraram na revisão sistemática (PRISMA, 2023).

Logo, com essas ferramentas, foram selecionados 51 artigos para uma revisão detalhada, 45 obtidos na base de dados da Scopus e os seis restantes de diferentes bases de dados, por apresentarem relação com o tema em análise. Posteriormente, foram considerados os seguintes elementos: (1) relevância da produção científica, (2) contribuição regional e global, (3) análise de satélite e sensores, (4) método de obtenção da LST, (5) cálculo da SUHI, (6) método de obtenção das LCZs, (7) variáveis associadas com a SUHI e LCZs e (8) softwares mais utilizados.

O papel do artigo foi fornecer os levantamentos mais importantes da aplicabilidade da LCZ para o estudo das Ilhas de Calor Urbana da Superfície. Além disso, serve como uma base teórica sólida para o desenvolvimento do segundo artigo presente da dissertação, por apresentar aplicações metodológicas mais utilizadas na literatura atualmente. Esse primeiro artigo foi publicado na revista internacional ***Remote Sensing*** da editora MDPI, revista com alta relevância para a área de Geociências e para o Sensoriamento Remoto, com Qualis A1. A versão completa do artigo, formatada de acordo com as diretrizes da revista, encontra-se no apêndice deste documento (APÊNDICE A – Artigo 1).

2.2 Segundo artigo: Contextualização e relação com a dissertação

O segundo artigo é intitulado **Análise espaço temporal da Ilha de calor urbana da superfície utilizando Zonas Climáticas Locais obtidas por segmentação orientada a objeto em uma cidade de zona temperada**. Esse artigo é uma análise do ambiente térmico urbano de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, com o uso do sistema de classificação de LCZ, por meio da segmentação GEOBIA. Além disso, analisa as características espaçotemporais da SUHI nos anos de 2002, 2010 e 2023, analisando a hipótese de que as alterações no ambiente térmico urbano da cidade, como as anomalias de SUHI, estão correlacionadas com a dinâmica da LCZ.

As imagens termais dos satélites Landsat 5 e 8, sensor *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), foram obtidas pela rotina fornecida por Ermida et al. (2020), e foram utilizadas para definir as ilhas de calor da cidade, com as médias de temperatura das quatro estações do ano de cada ano analisado. Além disso, foram utilizadas imagens do sensor SuperDove (PSB.SD), da constelação de nanosatélites Planet, referentes aos comprimentos de onda entre 443 e 865 nm, e um Modelo Digital de Elevação, no formato raster, da cidade de Porto Alegre, para realizar a segmentação GEOBIA.

Os mapas LCZs de 2002 e 2010 foram elaborados a partir do censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística nesses anos, enquanto os mapas de 2023 foram elaborados por meio do software *eCognition developer* 64 versão 9.0, com o qual foi efetuada a segmentação da imagem e retiradas amostras de treinamento. Após esse procedimento, com o software Qgis versão 3.22.5, foram

selecionadas amostras para validação da segmentação, e por fim, em ambiente R, com o algoritmo classificador *Random Forest*, foi gerado o mapa LCZ de 2023.

As classes construídas LCZ, definidas para a cidade, foram 2, 3, 6 e as classes de cobertura foram A, B, C, E e G. No primeiro grupo, a LCZ 6 teve um aumento de 6,2% de 2010 para 2023, enquanto para o grupo de cobertura, a LCZ A ficou em destaque, registrando uma perda de área de 5,1%, de 2002 para 2010 e ficou inalterada de 2010 para 2023. Além disso, a classificação do mapa da LCZ de 2023 pelo classificador *Random Forest* obteve uma acurácia global de 85,7%, com o *Kappa* de 83,3%, resultado satisfatório para a classificação. Quanto às imagens de temperatura média da superfície, a estação do verão registrou os maiores valores em todos os anos analisados, com as classes LCZ 2 de 2002 e 2010 registrando temperatura de 38 °C, embora em 2023 a LCZ que teve maior média de temperatura foi a 3, com 40 °C. Em contrapartida, a estação que registrou as menores temperaturas, foi o inverno, com variações de 2 °C na sua amplitude térmica.

A Análise de Variância e o teste de Kruskal-Wallis, com um nível de significância de 5%, foram aplicados, e foram constatadas diferenças significativas entre as médias das temperaturas. Portanto, a classificação da LCZ é uma metodologia válida para detectar com mais exatidão as LSTs de regiões da cidade com características distintas.

A contribuição deste artigo foi utilizar uma metodologia ainda pouco usada no Brasil para realizar um estudo térmico urbano com a identificação das Zonas Climáticas Locais. A versão completa do artigo, encontra-se no Apêndice B.

3 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÃO FINAL

A presente dissertação aplica uma metodologia que já vem sendo utilizada na literatura, mas são escassas suas aplicações em território Brasileiro, consistindo no Uso das Zonas Climáticas Locais para a identificação das Ilhas de Calor Urbanas da superfície. Para isso, foi realizado dois estudos para dar base a essa aplicação. No primeiro, é realizada uma revisão sistemática sobre o uso das Zonas Climáticas Locais para estudar a temperatura da Superfície e o fenômeno da SUHI. Com o auxílio do método PRISMA e do software *VosViewer* foram selecionados 51 artigos

para análise aprofundada do estado da arte, sendo considerados aspectos como, relevância científica; contribuição regional e global; satélites e sensores mais utilizados; métodos de obtenção da LST, identificação da SUHI, cálculo das LCZs; variáveis e softwares mais utilizados, servindo de referência para novos estudo para a detecção do fenômeno urbano termal, através da LCZ. Também, com esse estudo é possível identificar até a data analisada, Junho de 2022, o Brasil não possui publicações sobre o assunto elucidado, fortalecendo a proposição de uma aplicação metodológica em território Brasileiro.

Pensando nisso, o segundo artigo iniciou-se um estudo de caso para a cidade de Porto Alegre, localizada na região Sudeste do Brasil, no estado do Rio Grande Sul, com a hipótese de que as LCZs influenciam as alterações do ambiente termal urbano. Para a realização do estudo, esse contou com o auxílio de imagens de alta resolução espacial da Planet do sensor *SuperDove* e dados complementares como *raster* MDE de 3 metros de resolução espacial. A técnica GEOBIA foi usada para extrair melhor das classes LCZ. Foram identificadas na cidade as classes LCZs de construções 2, 3 e 6, e as A, B, C, E e G tratando-se das classes de cobertura, dessas, destacando-se a LCZ 6 com um crescimento de 6,2% entre 2010 e 2023, enquanto a LCZ A perdeu 5,1% entre 2002 e 2010, com estabilidade de área entre 2010 a 2023. Com relação a temperatura da superfície, a estação do verão dos três anos analisados apresentou as maiores temperaturas, com as LCZs de construção armazenando os maiores valores registrados. Além disso, a análise de variância e o teste Kruskal-Wallis, comprovaram diferença significativa entre as médias da LST. Dessa forma, a classificação da LCZ com auxílio da técnica GEOBIA para detectar com mais exatidão a dinâmica espacial termal de centros urbanos é eficaz, tornando uma aplicabilidade essencial dos tomadores de decisões para mitigações de respostas termais abruptas em centros urbanos.

Portanto, a dissertação cumpre o seu objetivo de uma realização e investigação metodológica do estudo das Ilhas de Calor Urbana da Superfície em território Brasileiro, focada em uma região de clima temperado do país. Além disso, a presente pesquisa procura incentivar estudos sobre o clima urbano brasileiro, pois as mudanças climáticas estão cada vez mais perceptíveis nas regiões urbanas, nas quais além da poluição termal, temos também impactos em decorrência de poluição

atmosférica, com a ocorrência dos fenômenos chamados de cânions urbanos e inversão térmica, por exemplo.

Para trabalhos futuros, a metodologia utilizada no segundo artigo dessa dissertação permite a aplicação para diferentes regiões do Brasil com diferentes enfoques climáticos, como por exemplo a região Nordeste do país, na qual possui um clima semiárido, caracterizado por baixa pluviosidade e altas temperaturas, além dessa região possuir uma carência de estudos do ambiente termal das cidades nordestinas com auxílio da classificação das Zonas Climáticas.

FINANCIAMENTO

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 88887.645454/2021-00.

REFERÊNCIAS

- DONG, P. et al. Diurnally continuous dynamics of surface urban heat island intensities of local climate zones with spatiotemporally enhanced satellite-derived land surface temperatures. *Building and Environment*, v. 218, p. 109105, jun. 2022.
- ERMIDA, S. L. et al. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. *Remote Sensing*, v. 12, n. 9, p. 1471, 6 maio 2020.
- FERNANDES, R. et al. Local Climate Zones to Identify Surface Urban Heat Islands: A Systematic Review. *Remote Sensing*, v. 15, n. 4, p. 884, 5 fev. 2023.
- KANGA, S. et al. Understanding the Linkage between Urban Growth and Land Surface Temperature—A Case Study of Bangalore City, India. *Remote Sensing*, v. 14, n. 17, p. 4241, 28 ago. 2022.
- LI, X.; STRINGER, L. C.; DALLIMER, M. The role of blue green infrastructure in the urban thermal environment across seasons and local climate zones in East Africa. *Sustainable Cities and Society*, v. 80, p. 103798, maio 2022.
- PRISMA (org.). TRANSPARENT REPORTING of SYSTEMATIC REVIEWS and META-ANALYSES. Disponível em: <http://www.prisma-statement.org>. Acesso em: 21 jul. 2023.
- PURIO, M. A.; YOSHITAKE, T.; CHO, M. Assessment of Intra-Urban Heat Island in a Densely Populated City Using Remote Sensing: A Case Study for Manila City. *Remote Sensing*, v. 14, n. 21, p. 5573, 4 nov. 2022.
- RUIZ, L. F. C. et al. Object-based classification of vegetation species in a subtropical wetland using Sentinel-1 and Sentinel-2A images. *Science of Remote Sensing*, v. 3, p. 100017, jun. 2021.
- SHEN, C. et al. Prediction of the future urban heat island intensity and distribution based on landscape composition and configuration: A case study in Hangzhou. *Sustainable Cities and Society*, v. 83, p. 103992, ago. 2022.
- SHI, Y.; XIANG, Y.; ZHANG, Y. Urban Design Factors Influencing Surface Urban Heat Island in the High-Density City of Guangzhou Based on the Local Climate Zone. *Sensors*, v. 19, n. 16, p. 3459, 8 ago. 2019.
- 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, 1 dez. 2012.
- USGS (Estados Unidos). United States Government. **Landsat Project Documents**. 2020. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-project-documents>. Acesso em: 25 jul. 2023.
- VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. VOSviewer Manual. p. 53, [s.d.].

XIA, H. et al. Analysis of surface urban heat islands based on local climate zones via spatiotemporally enhanced land surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, v. 273, p. 112972, maio 2022.

ZHU, R.; DONG, X.; WONG, M. S. Estimation of the Urban Heat Island Effect in a Reformed Urban District: A Scenario-Based Study in Hong Kong. *Sustainability*, v. 14, n. 8, p. 4409, 7 abr. 2022.

APÊNDICE A – Artigo 1

O artigo de revisão sistemática completo está logo abaixo, mas também podendo ser acessado no seguinte link <https://doi.org/10.3390/rs15040884>.

Article

Local Climate Zones to Identify Surface Urban Heat Islands: A Systematic Review

 Rodrigo Fernandes ^{1,*}, Victor Nascimento ², Marcos Freitas ³ and Jean Ometto ⁴
¹ Postgraduate Program in Remote Sensing (PPGSR), Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre 91501-970, RS, Brazil

² Center for Engineering, Modeling and Applied Social Sciences, Federal University of ABC (UFABC), Santo André 09210-580, SP, Brazil

³ PPGSR/UFRGS, Porto Alegre 91501-970, RS, Brazil

⁴ National Institute for Space Research (INPE), São José dos Campos 12227-010, SP, Brazil

* Correspondence: passos.fernandes@ufrgs.br

Abstract: The Land Surface Temperature (LST) obtained by remote sensing data is an essential indicator for analyzing the Surface Urban Heat Island (SUHI). A factor contributing to its occurrence is the reflections of the different materials in urban and rural areas, which significantly affect the energy balance near the surface. Therefore, recent studies have increasingly used the Local Climate Zones (LCZs) classification system to discriminate those urban areas. Therefore, our study aims to perform a systematic review using the PRISMA method of LCZ classification applied to understand the LST and the SUHI phenomenon. At first, 10,403 related articles were found in the scientific literature which, after passing through filtering stages, resulted in 51 that were further analyzed. Our results showed that these articles were very recent, beginning in 2016, and present an increasing trend. Even though all articles reviewed somehow try to understand the Urban Heat Island phenomenon, in more than half of them, the SUHI calculation method was not mentioned. China was the country with the most studies. Images from Landsat and TERRA/AQUA sensors appeared in 82% of the studies. The method that appears the most to LCZ definitions is from the World Urban Database. Finally, we conclude that LCZ mapping methodologies were accurate enough for SUHI studies considering the current climatic changes. Therefore, this systematic review can help new studies on SUHI identification through LCZ in different world areas using remote sensing data to estimate the LST.

Keywords: SUHI; LST; LCZ; PRISMA; VosViewer



Citation: Fernandes, R.; Nascimento, V.; Freitas, M.; Ometto, J. Local Climate Zones to Identify Surface Urban Heat Islands: A Systematic Review. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 884. <https://doi.org/10.3390/rs15040884>

Academic Editors: Alexandru-Ionuț Petrișor, Dailliang Peng and Roxana Bojariu

Received: 12 December 2022

Revised: 31 January 2023

Accepted: 31 January 2023

Published: 5 February 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Cities have been the main human settlements in the world since 2007 when they overtook rural regions. Currently, about 55% of the population lives in urban areas, and it is expected to reach 68% in 2050 [1]. This increase in urbanization causes urban climate problems. One of the best known is the Urban Heat Island (UHI) phenomenon, referred to in the literature as the increase in the city's center temperature concerning their rural surroundings.

According to [2], there are three UHI types: (i) The Canopy Layer Urban Heat Island (CLUHI), (ii) The Urban Boundary Layer (UBL), and (iii) The Surface Urban Heat Island (SUHI). This last one was considered in this study. This phenomenon is critical because it disturbs the urban system, which is more enhanced by climate change, affecting the population psychologically and physiologically. In addition, it also impacts economic activities and increases morbidity and mortality, energy consumption, and violent behaviors [3].

The SUHI can be obtained using several Land Surface Temperature (LST) remote sensing data. The LST is an important indicator to measure the SUHI phenomenon since it measures the energy balance near the surface, affecting the surface heat distribution process, which significantly alters the urban climate [4].

As a result, the land urbanization effects in SUHI are well-discussed in Land Use and Land Cover (LULC) maps. In this context, a new LULC classification system called Local Climate Zones (LCZs) arranges the different urban and rural areas in more detail. In addition, the LCZ has been increasingly used in Urban Heat Islands studies [5]. It was initially proposed in 2012 when regional climate zones were divided into several Local Climate Zones within cities according to different LULC surface types, consequently allowing the correlation between climate information and urban planning [6]. The LCZ classification system consists of two main categories, the built and the land cover type, based on building density shape geometry and surface characteristics, including 17 subcategories, as seen in Figure 1 [7].



Figure 1. LCZ classification scheme [7].

In the scientific literature, we only found a few articles which made a systematic review considering the LCZ, such as [8–10]. However, they have not focused on understanding the LST differences inside each LCZ class or the SUHI phenomenon, which is essential considering the population increase in urban areas and climate change and is the main novelty of our article. Therefore, the scientific literature that uses the Local Climate Zones classification to study the Land Surface Temperature and the Surface Urban Heat Island phenomenon was systematically reviewed with VosViewer and PRISMA method in this study to follow the state of the art of this scientific theme. Consideration was dedicated principally to the following goals: (i) scientific production’s relevance and regional and global contribution; (ii) satellites and sensor analysis; (iii) methods to obtain LST, LCZ, and SUHI; (iv) and variables associated with SUHI and LCZ and the most used software. Thus, this is a pioneering study in this type of analysis, serving as a reference for future SUHI studies using LCZ and LST obtained by remote sensing data.

2. Materials and Methods

Few studies make a systematic review to understand the Local Climate Zones application to analyze Urban Heat Islands, such as [8–10]. However, these studies have not focused on the Surface Urban Heat Islands. Therefore, a systematic review was conducted using the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews (PRISMA) method to identify the remote sensing research trends applied to Surface Urban Heat Islands identification considering the Local Climate zones classification. Each review step was described in more detail and synthesized in the flowchart shown in Figure 2.

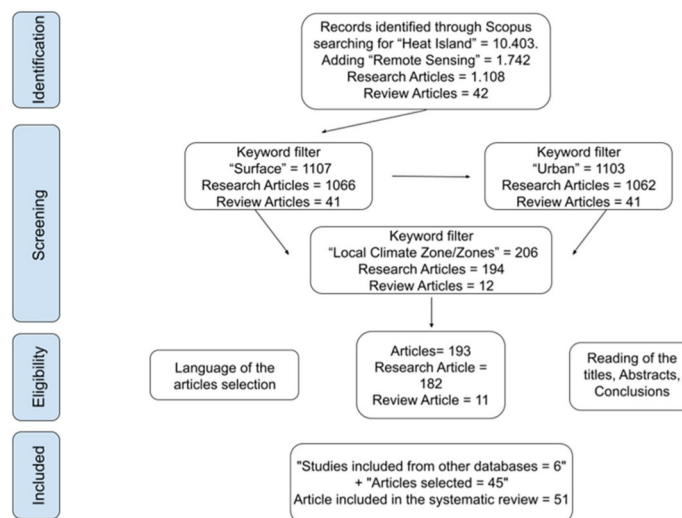


Figure 2. PRISMA flowchart of the phases of the research methodology.

2.1. Step 1: Identification

In the identification phase, the approach adopted for consulting the literature consisted of a search for words that best represented the subject of interest. The keywords were used to filter the Scopus library (www.scopus.com, accessed on 30 June 2020). Scopus is one of the world’s most extensive peer-reviewed scientific literature databases [11]. Using “heat island”, 10,403 articles were found in this first step. However, after using the “remote sensing” keyword, 1174 documents remained. Of these, 1108 were research articles, and 42 were review articles.

2.2. Step 2: Selection

The articles found in the previous step were subsequently extracted to the selection stage. The keywords “Surface” and “Urban” were applied through a filtering tool, but it did not reduce the number of articles found. Then, they were passed through a new filter using the keyword “local climate zone/zones”, and the number of articles was significantly reduced to 206. Of these, 194 were research articles, and 12 were review articles.

2.3. Step 3: Eligibility

For the eligibility step, it is essential to highlight that only research and review articles in Portuguese or English were chosen. In addition, titles, abstracts, and conclusions of these 206 documents were read, and only the ones whose content was directly related to Surface Urban Heat Islands using remote sensing data within the Local Climate Zones LULC classification were selected.

2.4. Step 4: Inclusion

In this final step, inclusion, 45 articles were selected, none being review articles. In addition, six articles cited by the articles read and found in databases other than Scopus were added to the analysis. Therefore, 51 articles were included in this systematic review and had their information cataloged.

2.5. Step 5: Data Analysis

All the articles selected in the inclusion stage were read and had their information cataloged. Some aspects considered were: (i) the relevance of scientific production; (ii) regional and global contribution; (iii) the satellites and sensors used, as well as their frequency; (iv) the methods used to obtain the Land Surface Temperature (LST); (v) the methods used to identify the Surface Urban Heat Island (SUHI); (vi) the methods used to obtain the Local Climate Zones (LCZs); (vii) the variables associated with SUHI and LCZ; and (viii) the most frequent software used. In addition, the VosViewer was used to identify the article’s reviewed relevance, regional and global contributions, main keywords used, year of publication, and trends among the authors.

3. Results and Discussion

This section is divided into subheadings to provide an organized, concise, and precise description of the results and their interpretation and discussion.

3.1. Relevance of Scientific Production

Of the 10,403 articles found in the scientific literature Scopus database, during the applications of the filters shown in Figure 1, only 51 articles remained to be analyzed in more detail. These reviewed articles were published between 2016 and 2022 (Figure 3). The oldest one was published in September 2016, and the most recent was in June 2022, the month in which the data were collected. Therefore, the influence factor of each factor was calculated on the same date considering their citations and year of publication.

Excluding the year 2017 from the period because there was no publication on the subject, we noticed a growing trend in publications beginning in 2019 with nine publications. The most prominent years were the most recent ones, 2020 and 2021, with 12 and 18 publications, respectively. Quite possibly, the last year of analysis, 2022, can easily exceed the previous ones since nine publications were found in the literature related to the subject studied only in the first semester. It is worth highlighting that the LCZs were only created in 2012 [6]. In addition, their approach focused only on Atmospheric Urban Heat Islands, explaining why publications on Local Climate Zones related to Surface Urban Heat Islands began to appear only in 2016.



Figure 3. Distribution of publications from September 2016 to June 2022.

In addition to the publications distributions analysis, each article's citations were counted, thus serving to evaluate its influence. However, even if the articles are all recent, a normalization was used to adjust their citation number over time and define their influence using (Equation (1)).

$$\text{Influence} = \text{Citations} / (\text{Year basis} - \text{Year of publication}) \quad (1)$$

where *Citations* are the article citations number; *Year basis* is the year that the systematic review is being performed, in this case, 2022; and *Year of publication* is the year in which the article was published.

Therefore, after applying this equation, the articles were ranked from most to least influential, and the six most influential found in this systematic review are presented in Table 1. Furthermore, all the other articles reviewed are presented in chronological order in Appendix A, Table A1.

Table 1. Most influential articles.

Title	Year	Journal	Influence	Author
Optimizing local climate zones to mitigate urban heat island effect in human settlements	2020	Journal of Cleaner Production	49.5	[4]
Spatial variability and temporal heterogeneity of surface urban heat island patterns and the suitability of local climate zones for land surface temperature characterization	2021	Remote Sensing	37	[12]
Analyses of land surface temperature (LST) variability among local climate zones (LCZs) comparing Landsat-8 and ENVI-met model data	2021	Sustainable Cities and Society	19	[13]
Evaluation of urban heat islands using local climate zones and the influence of sea-land breeze	2020	Sustainable Cities and Society	17.5	[14]
Detecting multi-temporal land cover change and land surface temperature in Pearl River Delta by adopting local climate zone	2019	Urban Climate	14.6	[15]
Understanding Land Surface Temperature Differences of Local Climate Zones Based on Airborne Remote Sensing Data	2018	IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing	11.5	[16]

Among the most influential articles, some things in common are the regional scale study area and the Landsat sensors used in their research, except for [16], which used hyperspectral and thermal data aided by Light Detection and Ranging (LIDAR) to identify vegetation, constructions, soil, and water surfaces.

The most influential article tries to mitigate Urban Heat Island effects [4]. In this study, the authors identified human settlement in a city in China and analyzed the different LCZ classes' thermal characteristics to alleviate the SUHI effect and improve the citizens' quality of life. However, although this article is the most influential one, the author did not present a good connection between the authors reviewed, considering the cluster produced using the VosViewer software shown in Figure 4.

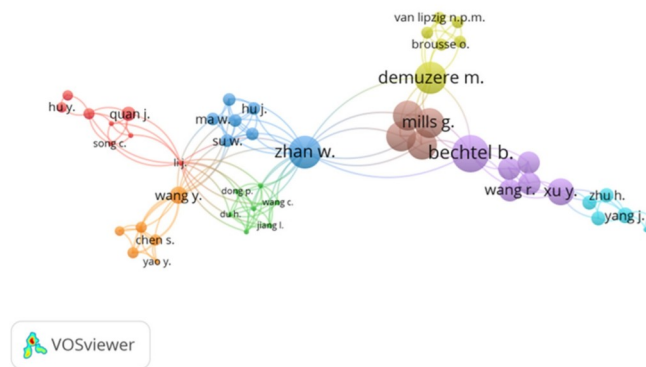


Figure 4. Authors' maps by citation.

3.2. Regional and Global Contribution

The connection between the country's collaboration network using VosViewer is presented in Figure 5 and Table 2.

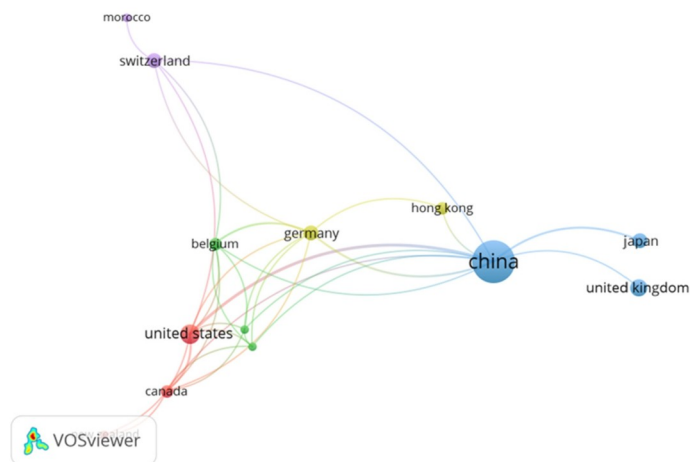


Figure 5. Cluster network analysis of the principal connections among the authors' countries of the reviewed articles.

Table 2. Originating countries of the reviewed authors' institutions.

Countries	Documents	Citations	Strength
China	24	337	82
United States (US)	5	123	31
United Kingdom	4	71	45
Serbia	3	82	17
Japan	3	61	23
Switzerland	3	40	8
Belgium	2	100	18

The connection network among the authors' countries has 13 nodes, 5 clusters, and 32 links. The link has a force and is represented by a positive numerical value; the higher the value, the stronger the power. Indicating, for example, the number of cited references that two nodes have in common, publications in which the authors are co-authors, or even the number of publications in which two terms coincide [17].

With VosViewer, the authors' country and institution origin were assessed and are presented in Table 2.

It is noticed that the highest contribution comes from China, with 48% of the articles and approximately 33% of the citations, followed by the US, with 10% of the articles and about 12% of the quotation. In the third place, the United Kingdom obtained a greater strength, even with one article less than the US. This fact may occur due to the connections between the authors of the respective countries with China. In addition, the other countries have less than four articles each, with strength below the average.

3.3. Analysis of Satellites and Sensors

In the articles reviewed, several sensors and platforms were used in different stages to obtain the LST thermal surface behavior and to identify the LCZ classes. Their frequency and information, such as the operator and temporal and spatial resolution, are shown in Table 3 and Figure 6.

Table 3. Information about satellites and sensors used in the reviewed articles.

Satellites	Sensors	Operators	Publications	Time Resolution	Spatial Resolution
Terra-Aqua	MODIS	NASA	18	1–2 days	250 m–1 km
Terra	ASTER	NASA	8	16 days	15–90 m
Landsat 8	OLI/TIRS	NASA/USGS	43	16 days	OLI: 15/30 m TIRS: 100 m
Landsat 7	ETM+	NASA/USGS	6	16 days	15–30–60 m
Landsat 5	TM	NASA/USGS	6	16 days	30–120 m
Sentinel 2 A-B	MSI	ESA	7	5 days	10 m
FY-2F	–	NSMC	2	–	–
Others	–	–	9	–	–

The Landsat series is managed by the National Aeronautics and Space Administration (NASA) and the US Geological Survey (USGS) and involved the launch of nine satellites, of which Landsat 5, 7, and 8 were used by the reviewed articles, covering 55% of the publications. The satellite of the series most used in the reviewed articles was Landsat 8, which was launched in 2013, and operates with the Operational Land Imager (OLI) instruments and the Thermal Infrared Sensor (TIRS). The OLI sensor has spectral bands that collect data in the visible range, near infrared and infrared of short waves, and a panchromatic band, with spatial resolution from 15 to 30 m and 16 days of temporal resolution. The thermal sensor has two bands, with 100 m spatial resolution [18].

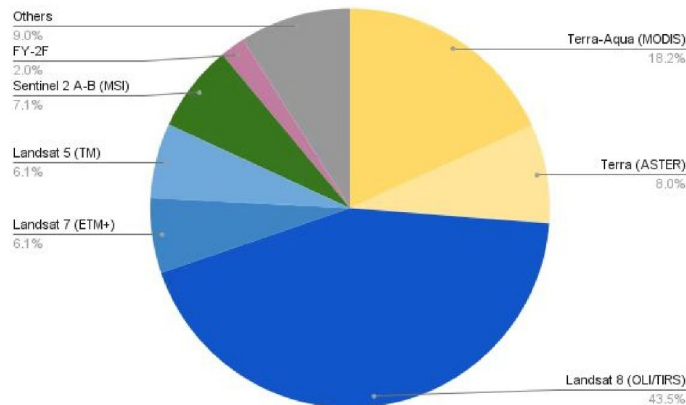


Figure 6. Satellites and sensors by publication.

In addition to the Landsat satellites, the AQUA and TERRA satellites are part of the Earth Observation System (EOS), a program founded by NASA and developed in partnership with Japan and Brazil, launched in 2002. The TERRA satellite was launched in 1999, involving aerospace agencies from Canada and Japan. The MODIS sensor is on board these two satellites, which can acquire Earth images from 1 to 2 days, with a spatial resolution of 250, 500, and 1000 m. This sensor was used in approximately 18% of all reviewed articles. In addition, the TERRA satellite has in its instruments the ASTER sensor, which offers better spatial resolution, reaching 15 m for the visible and near-infrared region, 30 m for the short-wave infrared region, and 90 m for the thermal bands [19–21].

In general, Landsat and TERRA/AQUA sensors were more often used due to the long historical series and the free acquisition cost. However, although Landsat 8 provides the thermal data at a good spatial resolution of 100 m, their 16 days revisit time is too long. However, with Landsat 7, 8, and 9 in operation, this temporal resolution can decrease to five days. In contrast, the MODIS sensor provides its data in a shorter revisit period, although the thermal data spatial resolution is rougher, with 1 km. Therefore, one of the remote sensing challenges is acquiring surface temperature data in high spatial and temporal resolution, which is currently not possible [22].

The satellites and sensors highlighted as “others” are those that had only one occurrence in the reviewed articles, such as Worldview 3 used in [23], Meteosat Seviri in [24], Sentinel 1 A-B Multispectral Instrument (MSI) used by [25], PROBA-V: Copernicus Global Land Cover Layers (CGLS-LC) 100 in [26], ECOSTRESS used in [27], Copernicus Global Cover maps (C-GLOPS) also in [27], NECP-GR data by [28], Gaofen-1 in [29], and Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) by [30].

In addition to satellite images, one alternative is non-orbital data use, such as that obtained by unmanned aerial vehicles (UAVs) and aerodynamic twin engines. Their main advantage is the high spatial and temporal resolution, which is very useful for obtaining land surface temperature and their analysis in specific local climate zones. However, the operational cost of these tools is relatively high [31].

3.4. Method to Obtain the Land Surface Temperature (LST)

Land Surface Temperature (LST) is essential for Surface Urban Heat Island studies. Usually, it is not measured directly by remote sensors, requiring mathematical methods to be estimated. Therefore, the methods used in the LST calculations used by the articles reviewed were cataloged and presented in Figure 7.

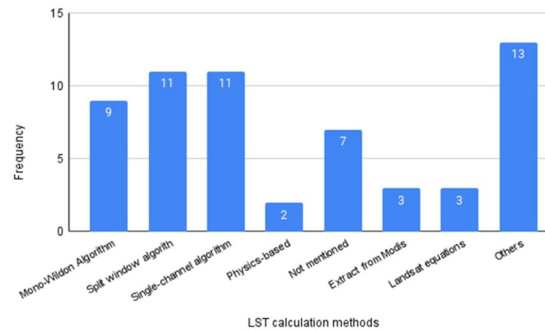


Figure 7. Land Surface Temperature (LST) calculation methods.

Many LST estimation algorithms have been proposed and can be classified, according to [32], into three categories: Single-Channel Algorithms (SCAs), Multi-Channel, and Split-Window Algorithms (SWAs). Together they account for 52% of the methods used in the articles reviewed to obtain LST.

The SCA advantage is that it estimates the LST with only one thermal channel. Thus, this method is the only one that can be applied to the Landsat platform with a thermal channel, such as the Landsat 4, 5, and 7 TM bands [33]. However, according to [34], the SWA is the best for calculating the LST from satellite data to understand SUHI. This method requires simultaneous data from at least two sensor channels, requiring only the atmospheric moisture content and surface emissivity as the parameters. The Statistical Mono-Window Algorithm (MWA) uses the thermal band brightness temperature, mean, and surface emissivity difference to estimate the LST [35]. The equations of the three algorithms mentioned can be seen in Table 4.

Table 4. Equations of LST estimation algorithms.

Index	Equations	Authors
Split-Window Algorithm (SWA)	$T_s = C + (A1 + A2 (1 - e/e) + A3 (\Delta e/e^2)) T4 + T5/2 + (B1 + B2 (1 - e/e) + B3 (\Delta e/e^2)) T4 - T5/2$	[36]
Single-channel Algorithm (SCA)	$T_s = y1e(\psi 1 L_{sen} + \psi 2) + \psi 3 + \delta$	[33]
Mono-Window Algorithm (MWA)	$LST = B(LST) / (\ln e(\lambda, B(LST)/p+1))$	[37]

T_s : surface temperature; e : band average emissivity by spectral emissivity; ψ : spectral response function of the sensor in a band B ; y and δ : are two parameters dependent on Planck's function.

The LST calculation methods obtained through algorithms were already implemented in several software such as ENVI-met, Google Earth Engine, ArcGIS, and QGIS classification plugins in the reviewed articles. Using friendlier software to obtain LST has become increasingly common and generally increases the number of users. In addition, it is worth highlighting they were used not only to obtain the LST but also to calculate the SUHI and the LCZ, among others.

The method classified as "others" is the most often found in our review, reaching 13 in this category. It is worth noting that among them, some are used only once, such as the Two-Channel Algorithm [30], Algorithm Practical Single-channel [28], and the Normalized Emissivity Method (NEM) [16]. Furthermore, 12% of the studies do not inform the method to classify the LST, which is a problem for replicating the methodology.

3.5. Surface Urban Heat Island (SUHI) Calculation

The Surface Urban Heat Islands (SUHIs) are commonly calculated as the difference between the LST in urban and rural areas according to [31], as illustrated in Figure 8.

However, there are several proposals for calculating SUHI because not every urban cluster is the same, and the urban and rural border areas are sometimes difficult to discriminate [30].

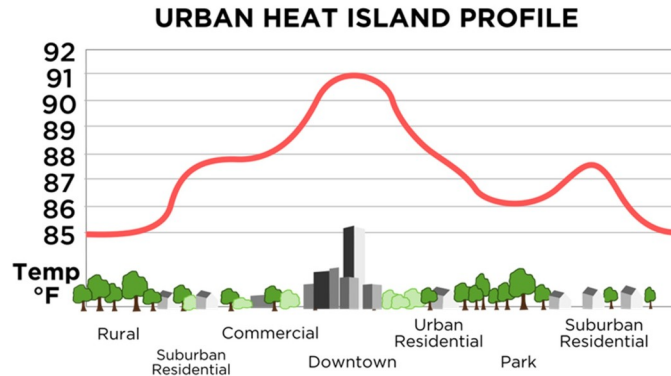


Figure 8. Urban Heat Island representation.

Therefore, all SUHI calculation methods found in the articles reviewed were cataloged and shown in Figure 9.

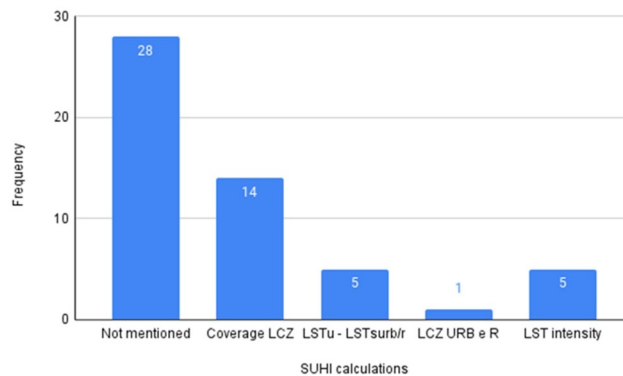


Figure 9. SUHI calculation methods. LSTu: LST of the urban area; LSTsub/r: LST of the suburban and rural areas.

Even though all articles reviewed somehow try to understand the Urban Heat Island phenomenon, in more than half of them, the SUHI calculation method was not mentioned. In addition, only 20 articles used the term SUHI directly, which is a serious problem since it is essential in the methodology to describe how the Urban Heat Island was obtained. One explanation is that not all research focuses on identifying the heat islands, only verifying the LST effects on each LULC class.

From the articles in which the SUHI method was mentioned, the majority, about 56%, used the difference between the LST average of LCZ built and land cover types. This last one is usually class D, representing low vegetation such as grasslands or herbaceous plants/crops (see Figure 1). In addition, only [38] used another LCZ land cover class as a reference, which used class B, which means scattered trees with mostly pervious land. However, only using LCZ classes to improve the SUHI calculation is considered an improvement in the research's articles [5,39] mainly for two reasons: First to improve

the identification accuracy of urban and rural areas, since it is difficult to establish what would currently be rural or urban in certain areas using remote sensing data. Second, to improve the LST comparison inside several LCZ classes considering different urban types and land cover.

Other methods used to differentiate SUHI in urban and suburban/rural areas appear in 20% of the articles reviewed. While [35,40] uses the traditional SUHI method, consisting of the difference between the urban and rural areas LST, other studies, such as [41,42], only analyze the study area using the LST intensity and heat maps.

3.6. Method to Obtain the Local Climate Zones

Some methods are used in the literature to obtain the local climate zones (LCZs). The most used among the articles reviewed is shown in Figure 10.

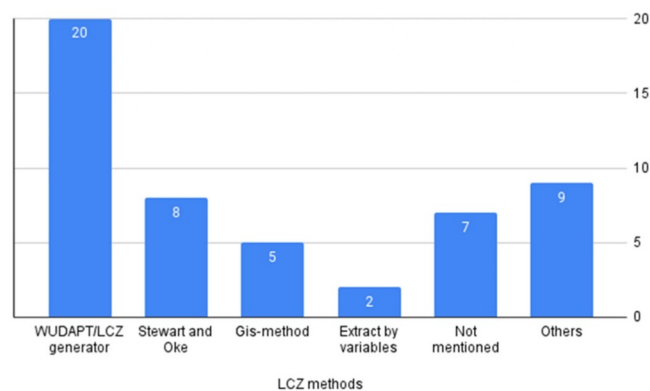


Figure 10. Methods of LCZ calculation.

The method that appears the most, 39% of the publications, is from the World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPTs). According to [5], it provides instructions for the LCZ classification using open access data and software, and the classification system consists basically of (1) data processing: including satellite image obtention, usually using Landsat; (2) selection of training and verification samples using a visual interpretation method with Google Earth images; (3) LCZ classification: based on the samples obtained previously using the Random Forest classifier in some Geographic Information System (GIS) software, such as the System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA); and finally the (4) accuracy assessment: using confusion matrix, the Kappa coefficient, and general precisions. After these steps, if the LCZ classification is not considered good, the training and verification samples should be collected again until a good map accuracy is reached.

Furthermore, according to [43], the WUDAPT collects, stores, and disseminates data at different levels, each representing an accuracy degree of the urban types. There are three LCZ levels: Level 0 is a raster of a city and surroundings, which are categorized according to LCZ types; Level 1 is the product of LCZ maps that provide more information about aspects and shapes; and Level 2 is the product of LCZ map that has the highest detail, with a greater specific spatial resolution. Furthermore, the study by [43] included an analysis of 50 cities around the planet, all of which were analyzed with the WUDAPT product Level 0, identifying significant differences in LST between the built and natural classes of cities considering differences in sizes, composition, and surrounding microclimates.

The “others” LCZ classification methods appear in 17% of the publications, corresponding to unique ways with an appearance in only one article each. These usually are

approaches developed by the authors of the works, such as [25] using field samples and data from Palsar-2 and [28] using object-based classification (OBIA) for the LCZ classification.

Stewart and Oke's procedure was used in about 15% of the articles reviewed, such as in the [44,45] articles. This LCZ classification method consists of (i) local data collection: where it is proposed to visit the site for data collection such as building geometries, land cover, and population density, among others. It is recommended to use secondary sources such as aerial photographs, satellite images, or land use and cover maps only if it is not possible to visit the studied area; (ii) the thermal source, which are usually weather stations but can be adapted for optical sensors; and finally, the (iii) selection of local climate zones based in the first step data. In addition, the authors also raised the possibility of adapting the LCZ classes by joining two or more of them or even creating new ones, such as the snow cover for cold places [6].

According to [13], the GIS method analyzes a dataset more accurately than manual samples and remote sensing methods. There are two types of GIS methods, raster, and vector-based. The first is suitable for classifying land surface properties and spatial analysis, while the second aims to show the upper edges of object shapes. The GIS method used in the [13] study was the vector method, and approximately 9% of the article reviewed used this method. It is also important to highlight that in about 13% of the articles reviewed in this study, the LCZ methodology was not mentioned.

Additionally, it is worth noting the study area's extension used in the LCZ maps among the articles reviewed, which vary from relatively small areas such as [46], in which the authors analyzed only a Hong Kong district of 47 km², and large regions extension, such as the [47] research performed in Wuhan city, reaching 8494 km².

3.7. Variables Associated with SUHI and LCZ

Some variables associated with SUHI identification used in conjunction with LCZs were cataloged in this systematic review and shown in Figure 11. Of these variables, three of them were based on spectral indices presented in Table 5.

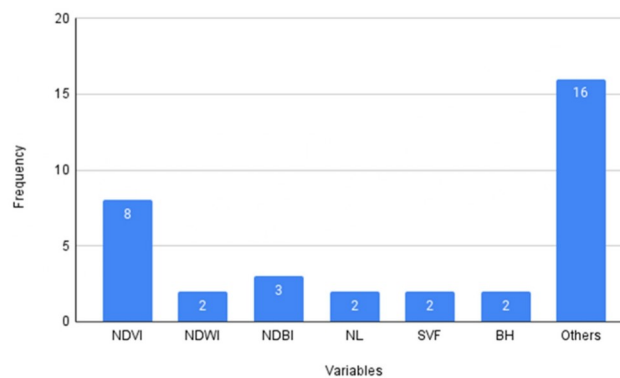


Figure 11. Variables associated with SUHI and LCZ used in the articles reviewed.

Table 5. Equations of principal spectral indexes used in the articles reviewed.

Index	Equations	Authors
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$	[48]
Normalized Difference Water Index (NDWI)	$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	[49]
Normalized Difference Building (NDBI)	$NDBI = (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR)$	[47]

The NDVI is one of the most well-known and used spectral indexes in the articles reviewed, present in 23% of the articles. It was proposed by [48], and it is obtained by a normalized equation of reflectance in the near infrared (NIR) and red (R) bands, with values ranging from -1 to $+1$. This index was used in studies such as [40], where the index allows for analyzing the vegetation spatial distribution difference in urban and rural areas.

Other spectral indices mostly used were the Normalized Difference Water Index (NDWI) and Normalized Difference Building Index (NDBI), which appeared in 14% of the studies. For example, [50] also used them with the NDVI as conditional arguments for pixel size reclassification and LST variables for the prediction model.

The category cited as “others” among the variables associated with SUHI and LCZ was the most frequent, present in 46% of the articles. However, all the variables are only used once considered in all the articles reviewed. Some are related to population, such as in [47], which was used to determine the urban thermal environment influence. Another one is the heat island ratio, an index generated by [51] that makes temperatures of different years comparable. Further, Night Lights (NLs), Sky View Factor (SVF), and Building Height (BH) appeared in almost 6% of studies, respectively.

In addition, although it is not a variable, many studies used statistical methods to improve their analysis and results among the articles reviewed and were also cataloged in this systematic review and presented in Figure 12.

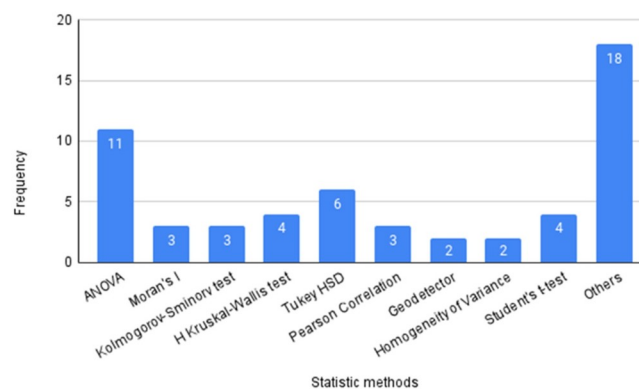


Figure 12. Statistic methods used in the articles reviewed.

The analysis of variance (ANOVA) was the most statistical method found in 20% of studies. Generally, it is used to decide whether the observed sample differences are real, caused by significant differences in the populations, or if they are casual, resulting from the sample variability. Thus, this analysis goes from the assumption that chaos produces slight deviations while significant differences are generated by natural causes [52]. In the articles reviewed, the ANOVA was used to examine the significance of the difference among the thermal groups.

Together with ANOVA, the Tukey test, also known as Tukey Honestly Significance Difference (HSD), was found in 11% of studies. It was used to determine which pair of LCZ is significantly different in terms of LST mean. Studies using these two statistical methods were those of [53–55].

In addition to these methods, many others are used, as highlighted in the “others” category, demonstrating the statistical procedure’s importance for better evaluating the LST and LCZ correlations.

3.8. Most Used Software

In the SUHI and LCZ studies, using more than one software is very common. In this systematic review, the most used software in the articles reviewed was cataloged and shown in Figure 13.

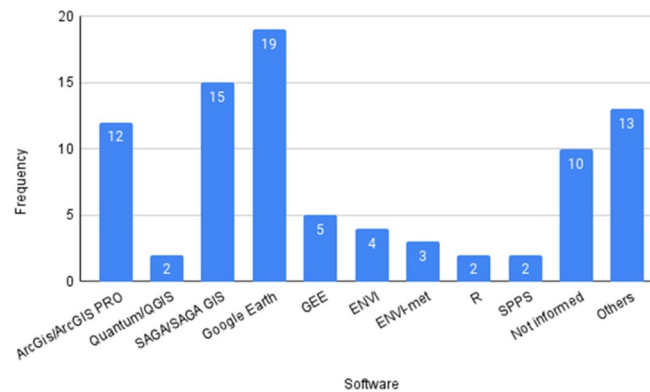


Figure 13. Software most used in the reviewed articles. GEE: Google Earth Engine; ENVI: Environment for Visualizing Images; R: R language; SPPS: Statistics Package for the Social Science.

Google Earth is the most widely used software in 22% of the studies, followed by SAGA/GIS in 17%. The first is a program developed by Google, providing a three-dimensional model of the globe built from satellite image mosaics. Using this software it is possible to identify features, places, constructions, cities, and landscapes. More information about it is available at (<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>, accessed on 1 February 2022). While SAGA/GIS, a free GIS software, is used as an effective spatial algorithm implementation providing a set of geostatistical methods. More information about it is available at the link (<https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html>, accessed on 1 February 2022). This two software were widely used to generate the LCZ maps, Google Earth for collecting training and verification samples, and the SAGA/GIS to run the classifier, usually Random Forest, as mentioned in Section 3.6.

Another widely used software is ArcGIS, with a 14% appearance. During the reviews of the articles, it was observed that it was used for various functions, statistical analysis [53], and LST calculation [51], among others. This platform is maintained by Esri, which is a private company in geographic information services. More information about it can be found at (<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview>, accessed on 1 February 2022). A well-known software that replaces ArcGIS is QGIS. Its main advantage is that it is free-to-use software, although, in the systematic review, it was only presented in a few studies.

4. Final Considerations

This systematic review evaluates the state of the art related to the use of local climatic zones to identify the Surface Urban Heat Islands through remote sensing techniques. It was revealed that the theme interest has increased over the years and has a growth trend in the future. Therefore, using the PRISMA method, 10,406 articles were identified in the literature, which after being submitted to the selection, eligibility, and, finally, inclusion steps, resulted in 51 articles. They were further analyzed, cataloged, presented, and discussed in this article using tables, cluster analysis figures, and maps.

Among the satellite found in the publications, Landsat and TERRA/AQUA sensors appeared the most, appearing in 82% of the articles. However, there is a tendency for other sensors to be used, such as Sentinel 2, with 7% appearances. Regarding the methods to

obtain LST, the Split Window and Single-Channel Algorithm were the most used, reaching more than 18% of the articles each.

For the SUHI calculation, more than half of the articles did not inform or detail the methodology used. However, in 56% of the articles, the difference between the LST average of a given LCZ urban and land cover class was used, demonstrating the concern of scholars to improve the SUHI calculation considering the LCZ. Therefore, we concluded that LCZ classification is accurate enough for SUHI studies. It can be performed with more detail considering the LCZ levels, depending on the spatial resolution used and the study's primary goal.

In addition, for the LCZ classification, the WUDAPT method is the one that appears the most, occurring in 39% of publications. In addition, three spectral indices, NDVI, NDWI, and NDBI, were identified among all the variables related to SUHI and LCZ. However, several other variables appeared, some of them just once. It is worth noting that many statistical methods were used for better analysis of LST and LCZ, demonstrating the importance of these methods for assessing the correlations among them and highlighting ANOVA as the most used statistical method. For last, the most used software was Google Earth and SAGA/GIS, widely used to obtain the LCZ maps, justifying the frequency of their appearances.

It is worth noting that this study has some limitations, such as the article's method choice, which used the Scopus database. However, to mitigate this problem, other articles from other databases were included in this systematic review. In addition, different keywords were added to find the articles to be reviewed, and their order in the PRISMA steps also changed the articles found.

Finally, considering the current climatic changes, this systematic review is a reference for news studies on Surface Urban Heat Island identification through Local Climate Zones in different areas of the world using remote sensing data to estimate the Land Surface Temperature; therefore, helping decision-makers mitigate these effects.

Author Contributions: Conceptualization and Methodology, R.F. and V.N.; software, R.F.; Formal Analysis and Investigation, V.N., M.F., R.F. and J.O.; data curation and writing—original draft preparation, R.F.; writing—review and editing, V.N.; supervision, V.N. and M.F.; funding acquisition, J.O. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior (CAPES)* R.F. scholarship number (88887.645454/2021-00) and the *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)* project number (2017/22269-2).

Acknowledgments: The authors thank the National Institute for Space Research (INPE), the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), and the Federal University of ABC (UFABC) for the support provided during this research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Appendix A

Table A1. Articles read in the systematic review in chronological order of publication.

Title	Year of Publication	Authors
Dynamics and controls of urban heat sink and island phenomena in a desert city: Development of a local climate zone scheme using remotely sensed inputs	2016	[22]
Analysis of land use change and expansion of surface urban heat island in Bogor city by remote sensing	2018	[53]
Understanding Land Surface Temperature Differences of Local Climate Zones Based on Airborne Remote Sensing Data	2018	[16]
Analysis of the Spatial and Temporal Variations in Land Surface Temperature Based on Local Climate Zones: A Case Study in Nanjing, China	2019	[29]

Table A1. Cont.

Title	Year of Publication	Authors
Detecting multi-temporal land cover change and land surface temperature in Pearl River Delta by adopting local climate zone	2019	[15]
Enhanced geographic information system-based mapping of local climate zones in Beijing, China	2019	[56]
Impact of atmospheric conditions and levels of urbanization on the relationship between nocturnal surface and urban canopy heat islands	2019	[57]
Inter-/intra-zonal seasonal variability of the surface urban heat island based on local climate zones in three central European cities	2019	[58]
Multi-Temporal Effects of Urban Forms and Functions on Urban Heat Islands Based on Local Climate Zone Classification	2019	[44]
Seasonality of Surface Urban Heat Island in Delhi City Region Measured by Local Climate Zones and Conventional Indicators	2019	[54]
SUHI analysis using Local Climate Zones—A comparison of 50 cities	2019	[43]
Urban design factors influencing surface urban heat island in the high-density city of Guangzhou based on the local climate zone	2019	[59]
Annual and monthly analysis of surface urban heat island intensity with respect to the local climate zones in Budapest	2020	[60]
Evaluation of urban heat islands using local climate zones and the influence of sea-land breeze.	2020	[14]
Inter-local climate zone differentiation of land surface temperatures for Management of Urban Heat in Nairobi City, Kenya	2020	[61]
Mapping Local Climate Zones Using ArcGIS-Based Method and Exploring Land Surface Temperature Characteristics in Chenzhou, China	2020	[62]
Optimizing local climate zones to mitigate urban heat island effect in human settlements	2020	[4]
Remote sensing of urban thermal environments within local climate zones: A case study of two high-density subtropical Chinese cities	2020	[63]
Spatial and temporal analysis of the increasing effects of large-scale infrastructure construction on the surface urban heat island	2020	[51]
Spatiotemporal Changes in the Urban Heat Island Intensity of Distinct Local Climate Zones: Case Study of Zhongshan District, Dalian, China	2020	[38]
The local climate impact of an African city during clear-sky conditions—Implications of the recent urbanization in Kampala (Uganda)	2020	[24]
Urban Spatial Patterns and Heat Exposure in the Mediterranean City of Tel Aviv	2020	[45]
Use of Local Climate Zones to investigate surface urban heat islands in Texas	2020	[64]
Using local climate zones to compare remotely sensed surface temperatures in temperate cities and hot desert cities	2020	[40]
A cooled city? Comparing human activity changes on the impact of urban thermal environment before and after city-wide lockdown	2021	[47]
A practical approach of urban green infrastructure planning to mitigate urban overheating: A case study of Guangzhou	2021	[42]
An application of the LCZ approach in surface urban heat island mapping in Sofia, Bulgaria	2021	[31]
Analyses of land surface temperature (LST) variability among local climate zones (LCZs) comparing Landsat-8 and ENVI-met model data	2021	[13]
Combination of Sentinel-2 and PALSAR-2 for Local Climate Zone Classification: A Case Study of Nanchang, China	2021	[25]
Dynamic changes of local climate zones in the Guangdong–Hong Kong–Macao greater bay area and their spatial-temporal impacts on the surface urban heat island effect between 2005 and 2015	2021	[65]
Evaluation of seasonal variability in magnitude of urban heat islands using local climate zone classification and surface albedo	2021	[41]
Exploring diurnal thermal variations in urban local climate zones with ECOSTRESS land surface temperature data	2021	[27]
Exploring the relationship between urban form and land surface temperature (LST) in a semi-arid region case study of Ben Guerir city—Morocco	2021	[35]
LCZ scheme for assessing Urban Heat Island intensity in a complex urban area (Beirut, Lebanon)	2021	[66]
Local climate zones and thermal characteristics in Riyadh City, Saudi Arabia	2021	[67]

Table A1. Cont.

Title	Year of Publication	Authors
Local climate zones mapping using object-based image analysis and validation of its effectiveness through urban surface temperature analysis in China	2021	[28]
Seasonal SUHI analysis using local climate zone classification: A case study of Wuhan, China	2021	[68]
Spatial variability and temporal heterogeneity of surface urban heat island patterns and the suitability of local climate zones for land surface temperature characterization	2021	[12]
Spatiotemporal characteristics of the surface urban heat island and its driving factors based on local climate zones and population in Beijing, China	2021	[5]
The suitability of the urban local climate zone classification scheme for surface temperature studies in distinct macroclimate regions	2021	[69]
Time Evolution of the Surface Urban Heat Island	2021	[70]
Urban Thermal Characteristics of Local Climate Zones and Their Mitigation Measures across Cities in Different Climate Zones of China	2021	[55]
An urban energy balance-guided machine learning approach for synthetic nocturnal surface Urban Heat Island prediction: A heatwave event in Naples	2022	[50]
Analysis of surface urban heat islands based on local climate zones via spatiotemporally enhanced land surface temperature	2022	[30]
Diurnally continuous dynamics of surface urban heat island intensities of local climate zones with spatiotemporally enhanced satellite-derived land surface temperatures	2022	[39]
Estimation of the Urban Heat Island Effect in a Reformed Urban District: A Scenario-Based Study in Hong Kong	2022	[46]
Geographical Detection of Urban Thermal Environment Based on the Local Climate Zones: A Case Study in Wuhan, China	2022	[71]
Identification of SUHI in Urban Areas by Remote Sensing Data and Mitigation Hypothesis through Solar Reflective Materials	2022	[23]
Spatiotemporal evolution of urban development and surface urban heat island in Guangdong–Hong Kong–Macau greater bay area of China from 2013 to 2019	2022	[72]
The role of blue green infrastructure in the urban thermal environment across seasons and local climate zones in East Africa	2022	[26]
Using Local Climate Zones to investigate Spatio-temporal evolution of thermal environment at the urban regional level: A case study in Xi'an, China	2022	[32]

References

- United Nations. Available online: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html> (accessed on 9 August 2022).
- Dewan, A.; Kiselev, G.; Botje, D. Diurnal and Seasonal Trends and Associated Determinants of Surface Urban Heat Islands in Large Bangladesh Cities. *Appl. Geogr.* **2021**, *135*, 102533. [CrossRef]
- Sobrinho, J.A.; Irakulis, I.A. Methodology for Comparing the Surface Urban Heat Island in Selected Urban Agglomerations Around the World from Sentinel-3 SLSTR Data. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 2052. [CrossRef]
- Yang, J.; Wang, Y.; Xiu, C.; Xiao, X.; Xia, J.; Jin, C. Optimizing Local Climate Zones to Mitigate Urban Heat Island Effect in Human Settlements. *J. Clean. Prod.* **2020**, *275*, 123767. [CrossRef]
- Zhang, Y.; Li, D.; Liu, L.; Liang, Z.; Shen, J.; Wei, F.; Li, S. Spatiotemporal Characteristics of the Surface Urban Heat Island and Its Driving Factors Based on Local Climate Zones and Population in Beijing, China. *Atmosphere* **2021**, *12*, 1271. [CrossRef]
- Stewart, I.D.; Oke, T.R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **2012**, *93*, 1879–1900. [CrossRef]
- Demuzere, M.; Kittner, J.; Bechtel, B. LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Front. Environ. Sci.* **2021**, *9*, 637455. [CrossRef]
- Souza, C.A.; De Paranhos Filho, A.C.; Guaraldo, E. IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA PAISAGEM URBANA E ENTORNO RURAL DE CAMPO GRANDE. *Rev. Gestão Sustentabilidade Ambient.* **2020**, *9*, 263. [CrossRef]
- Lehnert, M.; Savić, S.; Milošević, D.; Dunjić, J.; Geletič, J. Mapping Local Climate Zones and Their Applications in European Urban Environments: A Systematic Literature Review and Future Development Trends. *Int. J. Geo-Inf.* **2021**, *10*, 260. [CrossRef]
- Xue, J.; You, R.; Liu, W.; Chen, C.; Lai, D. Applications of Local Climate Zone Classification Scheme to Improve Urban Sustainability: A Bibliometric Review. *Sustainability* **2020**, *12*, 8083. [CrossRef]
- Viana, J.; Santos, J.; Neiva, R.; Souza, J.; Duarte, L.; Teodoro, A.; Freitas, A. Remote Sensing in Human Health: A 10-Year Bibliometric Analysis. *Remote Sens.* **2017**, *9*, 1225. [CrossRef]

12. Zhao, Z.; Sharifi, A.; Dong, X.; Shen, L.; He, B.-J. Spatial Variability and Temporal Heterogeneity of Surface Urban Heat Island Patterns and the Suitability of Local Climate Zones for Land Surface Temperature Characterization. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 4338. [CrossRef]
13. Unal Cilek, M.; Cilek, A. Analyses of Land Surface Temperature (LST) Variability among Local Climate Zones (LCZs) Comparing Landsat-8 and ENVI-Met Model Data. *Sustain. Cities Soc.* **2021**, *69*, 102877. [CrossRef]
14. Zhou, X.; Okaze, T.; Ren, C.; Cai, M.; Ishida, Y.; Watanabe, H.; Mochida, A. Evaluation of Urban Heat Islands Using Local Climate Zones and the Influence of Sea-Land Breeze. *Sustain. Cities Soc.* **2020**, *55*, 102060. [CrossRef]
15. Wang, R.; Cai, M.; Ren, C.; Bechtel, B.; Xu, Y.; Ng, E. Detecting Multi-Temporal Land Cover Change and Land Surface Temperature in Pearl River Delta by Adopting Local Climate Zone. *Urban Clim.* **2019**, *28*, 100455. [CrossRef]
16. Bartesaghi Koc, C.; Osmond, P.; Peters, A.; Irger, M. Understanding Land Surface Temperature Differences of Local Climate Zones Based on Airborne Remote Sensing Data. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* **2018**, *11*, 2724–2730. [CrossRef]
17. Van Eck, N.J.; Waltman, L. VOSviewer Manual, version 1.6.18. Leiden University: Leiden, The Netherlands, 2022.
18. USGS. Available online: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions> (accessed on 28 June 2022).
19. NASA. Available online: <http://aqua.nasa.gov/> (accessed on 28 June 2022).
20. NASA. Available online: http://www.nasa.gov/mission_pages/terra/index.html (accessed on 28 June 2022).
21. Sattelite Imaging Corporation. Available online: www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/aster.html (accessed on 28 June 2022).
22. Nassar, A.K.; Blackburn, G.A.; Whyatt, J.D. Dynamics and Controls of Urban Heat Sink and Island Phenomena in a Desert City: Development of a Local Climate Zone Scheme Using Remotely-Sensed Inputs. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2016**, *51*, 76–90. [CrossRef]
23. Costanzini, S.; Despini, F.; Beltrami, L.; Fabbri, S.; Muscio, A.; Teggi, S. Identification of SUHI in Urban Areas by Remote Sensing Data and Mitigation Hypothesis through Solar Reflective Materials. *Atmosphere* **2021**, *13*, 70. [CrossRef]
24. Brousse, O.; Wouters, H.; Demuzere, M.; Thiery, W.; Walle, J.V.; Lipzig, N.P.M. The Local Climate Impact of an African City During Clear-Sky Conditions-Implications of the Recent Urbanization in Kampala (Uganda). *Int. J. Climatol.* **2020**, *40*, 4586–4608. [CrossRef]
25. Chen, C.; Bagan, H.; Xie, X.; La, Y.; Yamagata, Y. Combination of Sentinel-2 and PALSAR-2 for Local Climate Zone Classification: A Case Study of Nanchang, China. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 1902. [CrossRef]
26. Li, X.; Stringer, L.C.; Dallimer, M. The Role of Blue Green Infrastructure in the Urban Thermal Environment across Seasons and Local Climate Zones in East Africa. *Sustain. Cities Soc.* **2022**, *80*, 103798. [CrossRef]
27. Chang, Y.; Xiao, J.; Li, X.; Middel, A.; Zhang, Y.; Gu, Z.; Wu, Y.; He, S. Exploring Diurnal Thermal Variations in Urban Local Climate Zones with ECOSTRESS Land Surface Temperature Data. *Remote Sens. Environ.* **2021**, *263*, 112544. [CrossRef]
28. Ma, L.; Yang, Z.; Zhou, L.; Lu, H.; Yin, G. Local Climate Zones Mapping Using Object-Based Image Analysis and Validation of Its Effectiveness through Urban Surface Temperature Analysis in China. *Build. Environ.* **2021**, *206*, 108348. [CrossRef]
29. Hu, J.; Yang, Y.; Pan, X.; Zhu, Q.; Zhan, W.; Wang, Y.; Ma, W.; Su, W. Analysis of the Spatial and Temporal Variations of Land Surface Temperature Based on Local Climate Zones: A Case Study in Nanjing, China. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* **2019**, *12*, 4213–4223. [CrossRef]
30. Xia, H.; Chen, Y.; Song, C.; Li, J.; Quan, J.; Zhou, G. Analysis of Surface Urban Heat Islands Based on Local Climate Zones via Spatiotemporally Enhanced Land Surface Temperature. *Remote Sens. Environ.* **2022**, *273*, 112972. [CrossRef]
31. Dimitrov, S.; Popov, A.; Iliev, M. An Application of the LCZ Approach in Surface Urban Heat Island Mapping in Sofia, Bulgaria. *Atmosphere* **2021**, *12*, 1370. [CrossRef]
32. Han, B.; Luo, Z.; Liu, Y.; Zhang, T.; Yang, L. Using Local Climate Zones to Investigate Spatio-Temporal Evolution of Thermal Environment at the Urban Regional Level: A Case Study in Xi'an, China. *Sustain. Cities Soc.* **2022**, *76*, 103495. [CrossRef]
33. Jimenez-Munoz, J.C.; Cristobal, J.; Sobrino, J.A.; Soria, G.; Ninyerola, M.; Pons, X.; Pons, X. Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2009**, *47*, 339–349. [CrossRef]
34. Wang, M.; He, G.; Zhang, Z.; Wang, G.; Wang, Z.; Yin, R.; Cui, S.; Wu, Z.; Cao, X. A Radiance-Based Split-Window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval: Theory and Application to MODIS Data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2019**, *76*, 204–217. [CrossRef]
35. Azmi, R.; Tekouabou Koumetio, C.S.; Diop, E.B.; Chenal, J. Exploring the Relationship between Urban Form and Land Surface Temperature (LST) in a Semi-Arid Region Case Study of Ben Guerir City—Morocco. *Environ. Chall.* **2021**, *5*, 100229. [CrossRef]
36. Wan, Z.; Dozier, J. A Generalized Split-Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature from Space. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **1996**, *34*, 892–905. [CrossRef]
37. Qin, Z.; Karnieli, A.; Berliner, P. A Mono-Window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM Data and Its Application to the Israel-Egypt Border Region. *Int. J. Remote Sens.* **2001**, *22*, 3719–3746. [CrossRef]
38. Han, J.; Liu, J.; Liu, L.; Ye, Y. Spatiotemporal Changes in the Urban Heat Island Intensity of Distinct Local Climate Zones: Case Study of Zhongshan District, Dalian, China. *Complexity* **2020**, *2020*, 1–9. [CrossRef]
39. Dong, P.; Jiang, S.; Zhan, W.; Wang, C.; Miao, S.; Du, H.; Li, J.; Wang, S.; Jiang, L. Diurnally Continuous Dynamics of Surface Urban Heat Island Intensities of Local Climate Zones with Spatiotemporally Enhanced Satellite-Derived Land Surface Temperatures. *Build. Environ.* **2022**, *218*, 109105. [CrossRef]

40. Fricke, C.; Pongrácz, R.; Gál, T.; Savić, S.; Unger, J. Using Local Climate Zones to Compare Remotely Sensed Surface Temperatures in Temperate Cities and Hot Desert Cities. *Morav. Geogr. Rep.* **2020**, *28*, 48–60. [[CrossRef](#)]
41. Dutta, K.; Basu, D.; Agrawal, S. Evaluation of Seasonal Variability in Magnitude of Urban Heat Islands Using Local Climate Zone Classification and Surface Albedo. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **2021**, *19*, 8677–8698. [[CrossRef](#)]
42. Wang, Y.; Ni, Z.; Hu, M.; Chen, S.; Xia, B. A Practical Approach of Urban Green Infrastructure Planning to Mitigate Urban Overheating: A Case Study of Guangzhou. *J. Clean. Prod.* **2021**, *287*, 124995. [[CrossRef](#)]
43. Bechtel, B.; Demuzere, M.; Mills, G.; Zhan, W.; Sismanidis, P.; Small, C.; Voogt, J. SUHI Analysis Using Local Climate Zones—A Comparison of 50 Cities. *Urban Clim.* **2019**, *28*, 100451. [[CrossRef](#)]
44. Quan, J. Multi-Temporal Effects of Urban Forms and Functions on Urban Heat Islands Based on Local Climate Zone Classification. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2019**, *16*, 35. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
45. Mandelmlch, M.; Ferenz, M.; Mandelmlch, N.; Potchter, O. Urban Spatial Patterns and Heat Exposure in the Mediterranean City of Tel Aviv. *Atmosphere* **2020**, *11*, 963. [[CrossRef](#)]
46. Zhu, R.; Dong, X.; Wong, M.S. Estimation of the Urban Heat Island Effect in a Reformed Urban District: A Scenario-Based Study in Hong Kong. *Sustainability* **2022**, *14*, 4409. [[CrossRef](#)]
47. Cai, Z.; Tang, Y.; Zhan, Q. A Cooled City? Comparing Human Activity Changes on the Impact of Urban Thermal Environment before and after City-Wide Lockdown. *Build. Environ.* **2021**, *195*, 107729. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
48. Rouse, W.; Haas, R.H. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ.* **1974**, *351*, 309.
49. Gao, B. NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sens. Environ.* **1996**, *58*, 257–266. [[CrossRef](#)]
50. Oliveira, A.; Lopes, A.; Niza, S.; Soares, A. An Urban Energy Balance-Guided Machine Learning Approach for Synthetic Nocturnal Surface Urban Heat Island Prediction: A Heatwave Event in Naples. *Sci. Total Environ.* **2022**, *805*, 150130. [[CrossRef](#)]
51. Wan, J.; Yong, B.; Zhou, X. Spatial and Temporal Analysis of the Increasing Effects of Large-Scale Infrastructure Construction on the Surface Urban Heat Island. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2022**, *237*, 113521. [[CrossRef](#)]
52. Martins, G.A.; Domingues, O. *Estatística Geral E Aplicada*, 6th ed.; Publisher: Atlas, Brazil, 2017; pp. 1–360.
53. Nurwanda, A.; Honjo, T. Analysis of Land Use Change and Expansion of Surface Urban Heat Island in Bogor City by Remote Sensing. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* **2018**, *7*, 165. [[CrossRef](#)]
54. Budhiraja, B.; Gawuc, L.; Agrawal, G. Seasonality of Surface Urban Heat Island in Delhi City Region Measured by Local Climate Zones and Conventional Indicators. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* **2019**, *12*, 5223–5232. [[CrossRef](#)]
55. Li, N.; Yang, J.; Qiao, Z.; Wang, Y.; Miao, S. Urban Thermal Characteristics of Local Climate Zones and Their Mitigation Measures across Cities in Different Climate Zones of China. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 1468. [[CrossRef](#)]
56. Quan, J. Enhanced Geographic Information System-Based Mapping of Local Climate Zones in Beijing, China. *Sci. China Technol. Sci.* **2019**, *62*, 2243–2260. [[CrossRef](#)]
57. Feng, J.; Cai, X.; Chapman, L. Impact of Atmospheric Conditions and Levels of Urbanization on the Relationship between Nocturnal Surface and Urban Canopy Heat Islands. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **2019**, *145*, 3284–3299. [[CrossRef](#)]
58. Geletić, J.; Lehnert, M.; Savić, S.; Milošević, D. Inter-/Intra-Zonal Seasonal Variability of the Surface Urban Heat Island Based on Local Climate Zones in Three Central European Cities. *Build. Environ.* **2019**, *156*, 21–32. [[CrossRef](#)]
59. Shi, Y.; Xiang, Y.; Zhang, Y. Urban Design Factors Influencing Surface Urban Heat Island in the High-Density City of Guangzhou Based on the Local Climate Zone. *Sensors* **2019**, *19*, 3459. [[CrossRef](#)]
60. Dian, C.; Pongrácz, R.; Dezső, Z.; Bartholy, J. Annual and Monthly Analysis of Surface Urban Heat Island Intensity with Respect to the Local Climate Zones in Budapest. *Urban Clim.* **2020**, *31*, 100573. [[CrossRef](#)]
61. Ochola, E.M.; Fakharizadehshirazi, E.; Adimo, A.O.; Mukundi, J.B.; Wesonga, J.M.; Sodoudi, S. Inter-Local Climate Zone Differentiation of Land Surface Temperatures for Management of Urban Heat in Nairobi City, Kenya. *Urban Clim.* **2020**, *31*, 100540. [[CrossRef](#)]
62. Chen, Y.; Zheng, B.; Hu, Y. Mapping Local Climate Zones Using ArcGIS-Based Method and Exploring Land Surface Temperature Characteristics in Chenzhou, China. *Sustainability* **2020**, *12*, 2974. [[CrossRef](#)]
63. Chen, X.; Xu, Y.; Yang, J.; Wu, Z.; Zhu, H. Remote Sensing of Urban Thermal Environments within Local Climate Zones: A Case Study of Two High-Density Subtropical Chinese Cities. *Urban Clim.* **2020**, *31*, 100568. [[CrossRef](#)]
64. Zhao, C.; Jensen, J.L.R.; Weng, Q.; Currit, N.; Weaver, R. Use of Local Climate Zones to Investigate Surface Urban Heat Islands in Texas. *GIScience Remote Sens.* **2020**, *57*, 1083–1101. [[CrossRef](#)]
65. Lu, Y.; Yang, J.; Ma, S. Dynamic Changes of Local Climate Zones in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area and Their Spatial-Temporal Impacts on the Surface Urban Heat Island Effect between 2005 and 2015. *Sustainability* **2021**, *13*, 6374. [[CrossRef](#)]
66. Badaro-Saliba, N.; Adjizian-Gerard, J.; Zaarour, R.; Najjar, G. LCZ Scheme for Assessing Urban Heat Island Intensity in a Complex Urban Area (Beirut, Lebanon). *Urban Clim.* **2021**, *37*, 100846. [[CrossRef](#)]
67. Alghamdi, A.S.; Alzhrani, A.I.; Alanazi, H.H. Local Climate Zones and Thermal Characteristics in Riyadh City, Saudi Arabia. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 4526. [[CrossRef](#)]
68. Shi, L.; Ling, F.; Foody, G.M.; Yang, Z.; Liu, X.; Du, Y. Seasonal SUHI Analysis Using Local Climate Zone Classification: A Case Study of Wuhan, China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 7232. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

69. Eldesoky, A.H.M.; Gil, J.; Pont, M.B. The Suitability of the Urban Local Climate Zone Classification Scheme for Surface Temperature Studies in Distinct Macroclimate Regions. *Urban Clim.* **2021**, *37*, 100823. [[CrossRef](#)]
70. Stewart, I.D.; Krayenhoff, E.S.; Voogt, J.A.; Lachapelle, J.A.; Allen, M.A.; Broadbent, A.M. Time Evolution of the Surface Urban Heat Island. *Earths Future* **2021**, *9*, e2021EF002178. [[CrossRef](#)]
71. Wang, R.; Wang, M.; Zhang, Z.; Hu, T.; Xing, J.; He, Z.; Liu, X. Geographical Detection of Urban Thermal Environment Based on the Local Climate Zones: A Case Study in Wuhan, China. *Remote Sens.* **2022**, *14*, 1067. [[CrossRef](#)]
72. Wang, Y.; Yao, Y.; Chen, S.; Ni, Z.; Xia, B. Spatiotemporal Evolution of Urban Development and Surface Urban Heat Island in Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area of China from 2013 to 2019. *Resour. Conserv. Recycl.* **2022**, *179*, 106063. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

APÊNDICE B – Artigo 2



1 Article

2 Análise espaço temporal da Ilha de calor urbana da superfície 3 utilizando Zonas Climáticas Locais obtidas por segmentação 4 orientada a objeto em uma cidade de zona temperada

5 Rodrigo Fernandes 1*, Victor Nascimento, Marcos Freitas 3, Antonio Ferreira 4 and Eduardo Lima 5

Citation: Lastname, F.; Lastname, F.;
Lastname, F. Title. *Remote Sens.* **2022**,
14, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

Academic Editor: Firstname Last-
name

Received: date

Accepted: date

Published: date

Publisher's Note: MDPI stays neu-
tral with regard to jurisdictional
claims in published maps and insti-
tutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors.
Submitted for possible open access
publication under the terms and
conditions of the Creative Commons
Attribution (CC BY) license
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

6
7
8
9
10
11

- 1 Postgraduate Program in Remote Sensing (PPGSR), Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS),
Porto Alegre 91501-970, RS, Brazil
- 2 Center for Engineering, Modeling and Applied Social Sciences, Federal University of ABC (UFABC),
Santo André 09210-580, SP, Brazil
- 3 PPGSR/UFRGS, Porto Alegre 91501-970, RS, Brazil
- * Correspondence: passos.fernandes@ufrgs.br

12
13
14
15
16
17
18
19
20

Resumo: É aplicado em Porto Alegre, Brasil, o sistema de classificação das Zonas Climáticas Lo-
cais (LCZ) por meio da segmentação GEOBIA para se estudar as características espaçotemporais
da Ilha de Calor Urbana (SUHI) entre as quatro estações climáticas entre 2002, 2010 e 2023. As mé-
dias de temperatura de cada estação foram obtidas com imagens Landsat 5 e 8 e para a segmenta-
ção e confecção dos mapas LCZ são usadas imagens Planet de alta resolução. As classes LCZs pre-
sente são as 2, 3, 6, A, B, C, E e G, as três primeiras fazendo parte da categoria de construídos e o
restante das de cobertura. É destaque a LCZ 6 com um aumento de sua área total em 6.2% de 2010
para 2023, enquanto a LCZ A obteve uma perda de 5.1% de 2002 para 2010. Além disso, a LCZ 3
chegou a 40 °C em 2023, a qual foi a maior média de temperatura registrada para a estação do ve-

21 rão. A classificação do mapa de LCZ de 2023 foi satisfatório, com acurácia de 85.7% e as análises
22 estatísticas corroboram diferenças significativas entre as médias de temperatura. Portanto, a meto-
23 logia proposta é eficaz para detecção das LSTs em regiões de características distintas.

24 **Palavras-chaves:** LCZ; SUHI, GEOBIA, LST; Espaço temporal; Termal.
25

26 1. Introdução

27 A velocidade do processo de urbanização global aumentou desde a metade do sé-
28 culo XX de forma considerável, o que causa alterações na paisagem natural e rural para
29 dar espaço a construções e espaços urbanos. É previsto que, por volta de 2030, a área ur-
30 bana aumente para 1.2 milhões de km² [1]. A urbanização altera e afeta o uso e cobertura
31 da terra, agindo na substituição de ecossistemas e agroecossistemas permeáveis para co-
32 berturas e construções impermeáveis [2].

33 Além disso, o aumento populacional nas cidades possui consequências, pois as
34 construções e outras atividades humanas afetam o clima local, o que ocasiona o desba-
35 lanço de matéria e energia nos sistemas ambientais, por decorrência da falta de cobertu-
36 ra natural para dissipar o calor acumulado, do acúmulo dos materiais impermeáveis que
37 absorvem energia e liberam em forma de radiação de ondas longas, dando a sensação de
38 calor, e são agravadas por poluentes liberados pelas atividades humanas e outras intera-
39 ções. Uma consequência desse desbalanço de temperatura nas cidades é a Ilha de calor
40 Urbana da Superfície (Surface Urban Heat Island – SUHI), esse tipo de ilha de calor é
41 medida com base na temperatura da superfície (Land Surface Temperature – LST), a
42 qual é influenciada pelo albedo e capacidade termal da cobertura urbana [3].

43 O uso de sensoriamento remoto para o estudo de SUHI, apesar de possuir uma des-
44 vantagem pela dificuldade de obtenção de dados nos dias nublados é vantajoso, pois
45 permite a análise de LST em larga escala [4]. A utilização de sensores remotos para obter
46 a LST têm sido conduzida em muitos estudos, conforme trabalhos de [5-7]. Pensando
47 nisso, uma série de satélites com um bom potencial para estimar a LST em alta resolução
48 espacial são as séries Landsat, a qual teve o desenvolvimento de algoritmos para efetuar
49 a estimativa da LST, como o Split-Window [8], Single-Channel Algorithm [9] e Mono-
50 Window [10]. Vale destacar que estes algoritmos possuem diversas variações de outros
51 autores [11,12]. As maiorias destes requerem dados de entradas e coeficientes calibrados,
52 além de imagens de satélites com um largo volume de dados que utilizam um significa-
53 tivo espaço de memória computacional. No entanto, mais recentemente com a utilização
54 de dados em nuvens através de algumas plataformas como o Google Earth Engine
55 (GEE), é possível suprir essa problemática, sendo está uma plataforma em nuvem que
56 permite usuários de sensoriamento remoto analisarem grandes quantidade de dados
57 sem os recursos de um maquinário robusto [13].

58 Comumente, a SUHI é quantificada como a dicotomia de temperatura das áreas ur-
59 banas e rurais, porém esse cálculo simplório possui desafios, pois ultimamente as cida-
60 des não possuem mais fronteiras claras do que é urbano e rural. Além, que pode ocorrer

61 cidades com significativas áreas naturais, também bem como regiões rurais com extensas
62 áreas com materiais impermeáveis [14]. Ainda segundo o autor, esquemas de classifica-
63 ção vem sendo propostos e desenvolvidos, como as Zonas de Terrenos Urbanos [15]; Da-
64 venport Roughness Classification [16]; Urban Climate Zones [17]; e Local Climate Zones
65 (LCZ) [18]. Este último é o esquema mais recente, sendo considerado um padrão interna-
66 cional de classificação de clima urbano pela sua aplicação ampla e efetiva em análise ur-
67 bana termal [14].

68 Diversos métodos de classificação são propostos na literatura para a extração da
69 LCZ [19], como o mais difundido sendo o da World Urban Database and Access Portal
70 Tools (WUDAPTs), o qual fornece instruções ao usuário e utiliza dados e softwares abertos,
71 como uso das imagens da série Landsat e o Google Earth Pro. Entretanto, o método
72 Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA) permite a utilização de imagens de
73 alta resolução espacial, pois a segmentação desse método tem a capacidade de distinguir
74 os objetos imageados pelos satélites, sendo avaliados conforme suas características espa-
75 ciais, espectrais e temporais [20].

76 Na literatura, temos muitos estudos sobre a SUHI em diversos países e com o au-
77 mento do interesse em pesquisas na classificação da LCZ, pesquisadores vêm analisando
78 a SUHI com o auxílio desse sistema de classificação [21]. Embora, segundo [19], que rea-
79 lizou uma revisão bibliográfica reunindo trabalhos sobre o estado da arte de estudos en-
80 volvendo as LCZs e as LSTs e SUHI, destacou que nenhum trabalho sobre o tema foi rea-
81 lizado no Brasil, até a data em que a pesquisa foi realizada no primeiro semestre de 2022.
82 Outro, porém é que estudos envolvendo as ilhas de calor não deveriam ocorrer somente
83 em casos diurnos/noturnos comparando os seus dias mais quentes e/ou frios, e sim reali-
84 zar visando entender a dinâmica espaço temporal da LST nos centros urbanos. Além dis-
85 so, alguns estudos de SUHI usam somente um mapa LCZ, não refletindo as mudanças
86 espaçotemporais da região de estudo

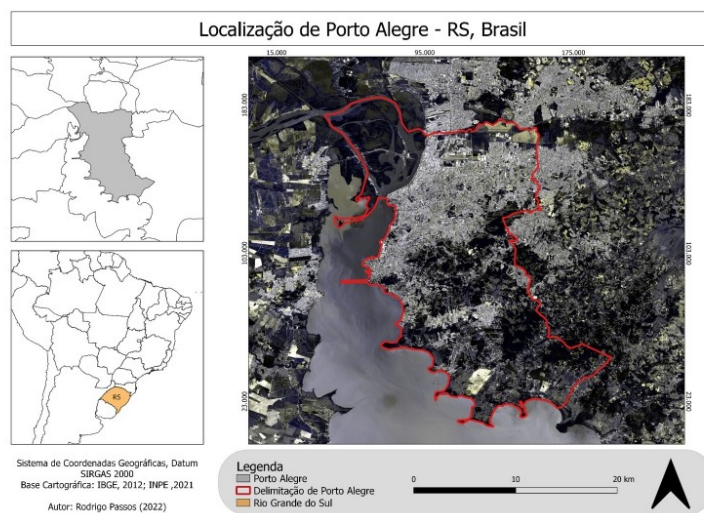
87 Diante da problemática, o objetivo deste estudo é analisar o ambiente termal urba-
88 no com a aplicação do sistema de classificação de LCZ para a cidade de Porto Alegre –
89 RS e as características espaços temporais da SUHI entre as quatro estações climáticas nos
90 anos de 2002, 2010 e 2023, o que será estudado com técnicas de sensoriamento remoto e
91 de análise espaçotemporal, investigando a hipótese de que as alterações no ambiente ter-
92 mal urbano da cidade, como as anomalias de SUHI, estão correlacionadas com a dinâmi-
93 ca da LCZ e acompanhando os seguintes objetivos: i) mapeamento da LCZ para os anos
94 de 2002, 2010 e 2023; ii) análise das classes LCZs e suas mudanças e influências; iii) en-
95 tender o comportamento da LST e SUHI.

96 2. Área de estudo e dados

97 2.1. Área de estudo

98 Como é exibido na Figura 1, o município de Porto Alegre é localizado na região Sul
99 do Brasil, entre as coordenadas 29° 57' a 30° 16' S e 51° 01' a 51° 16' O, no estado do Rio
100 Grande do Sul (RS). Além disso, de acordo o último censo realizado pelo Instituto Brasi-
101 leiro de Geografia e Estatística (IBGE), a região possui uma área aproximada de 495.390
102 km² e sua população estimada é de 1.492.530 para 2021 e com uma densidade demo-

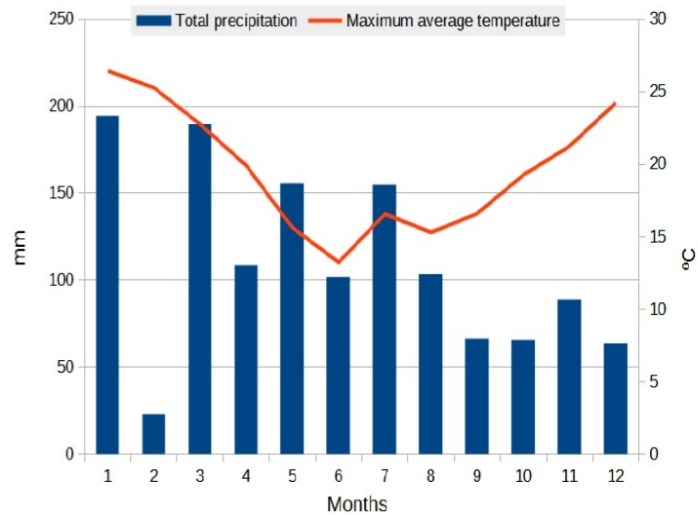
103 gráfica de 2.837.53 hab/km², sendo a cidade mais populosa no estado do Rio Grande do
104 Sul e a décima do País [22].
105



106 **Figura 1.** Localização de Porto Alegre – RS.

107 O clima de Porto Alegre é quente e temperado, com significativa pluviosidade du-
108 rante o ano. De acordo com a classificação de clima de Koeppen e Geiger, a cidade é clas-
109 sificada como o subtipo Cfa – Clima subtropical úmido, apresentando uma temperatura
110 média anual de 19.7 °C e uma pluviosidade média de 1580 mm anual [23]. Também, se-
111 gundo [23] o mês de janeiro é o mais quente do ano, com temperaturas médias de 24.8 °
112 C, e o mês com menor temperatura média é Julho, com 14 °C. Os dados médios de tem-
113 peratura do ar e precipitação de Porto Alegre para 2022 encontram-se na Figura 2.

114



115

Figura 2. Temperatura e precipitação média de Porto Alegre em 2022 [23].

116

2.2. Dados

117

2.2.1. Dados de satélite

118

119

120

121

122

123

124

125

Foi utilizado no estudo dados de sensoriamento remoto dos satélites Landsat 5 e 8 e Planet. Os dados do Infravermelho termal do Landsat 5 coletados pelo sensor Thematic Mapper (TM) possuem uma resolução de 120 metros, enquanto para o Landsat 8, os dados do termal são obtidos pelo sensor Thermal Infrared Sensor (TIRS), com uma resolução espacial de 100 metros. Ambos os sensores possuem uma resolução temporal de 16 dias, no entanto, o Landsat 5 esteve em operação entre Janeiro de 1984 a Maio de 2012, enquanto o Landsat 8 iniciou o seu imageamento em Abril de 2013 e continua até os dias mais recentes [24].

126

127

128

129

A empresa Planet utiliza uma constelação de nanossatélites estes sendo: PlanetScope, RapidEye e SkySat, na qual desenvolveu três tipos de sistemas sensores: Dove clássico (PS2, Dove-R (PS2.SD) e SuperDove (PSB.SD), este último possuindo 8 bandas espectrais disponíveis, conforme a Tabela 1 [25,26].

130

Tabela 1. Bandas do sensor PS2.SD.

Band	Name	Wavelength
1	Coastal Blue	443
2	Blue	490
3	Green I	531
4	Green	565

15

5	Yellow	610
6	Red	665
7	Red Edge	705
8	NIR	865

131 NIR = Near Infrared

132 Neste estudo, duas imagens de três metros de resolução espacial do sensor PSB.SD
133 foram utilizadas, uma para o período do inverno em 24 de setembro de 2022 e outra pa-
134 ra o verão em 2 de março de 2023, ambas obtidas no <https://www.planet.com/explorer/#>.

135 2.2.2. Dados complementares

136 Com os dados vetoriais disponibilizados pela Prefeitura da capital, estes gerados
137 pelo censo de 2002 por meio de imagens Light Detection and Ranging (LIDAR) com re-
138 solução espacial de 3 metros, as curvas de nível, os pontos cotados e os limites de rios e
139 canais, foram utilizados para gerar o dado raster do Modelo Digital de Elevação (MDE)
140 e a partir dele derivar a declividade e orientação de vertente para a cidade de Porto Ale-
141 gre, através do software QGIS versão 3.16.1. Além disso, com os vetores de Uso e Ocu-
142 pação da Terra de 2002 e 2010, também obtidos pela Prefeitura, foi realizada o tabela-
143 mento das classes LCZs de acordo com as subclasses já previamente catalogadas, através
144 dos softwares ArcMap versão 10.6 e Google Earth Pro. A tabela 2 exemplifica os dados
145 complementares necessários.

146 **Tabela 2.** Dados complementares.

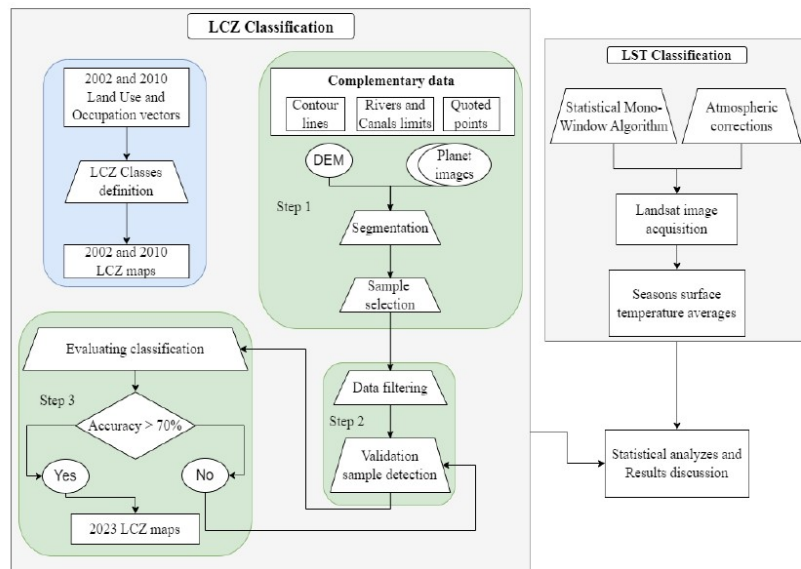
Dados complementares	Derivado
Curvas de nível	
Pontos cotados	MDE
Limites de rios e canais	
Vetores de Uso e Ocupação de 2002 e 2010	Classes LCZs de 2002 e 2010

147

148 3. Métodos

149 Esta seção apresentará os detalhes implementados na classificação da LCZ, geração
150 dos mapas LST e métodos estatísticos aplicados, conforme exemplificado na Figura 3

151



152

Figura 3. Fluxograma das atividades do estudo.

153

3.1. Classificação da LCZ

154

155

156

157

158

O sistema de classificação World Urban Database and Access Portal Tools (WU-DAPT) provê instruções para a classificação da LCZ com dados e com softwares open access [27]. O sistema consiste em 17 tipos de classes, agrupados em dois tipos de classificação, classes de construção (com dez classes LCZ, 1-10) e classes de cobertura (com sete classes LCZ, A-G), conforme Tabela 3.

159

Tabela 3. Esquema das categorias da LCZ [18].

Tipos construídos (10)	Tipos de coberturas (7)
LCZ 1 – Compact high-rise	LCZ A – Dense trees
LCZ 2 – Compact midrise	LCZ B – Scatted trees
LCZ 3 – Compact low-rise	LCZ C – Bush, scrub
LCZ 4 – Open high-rise	LCZ D – Low plant
LCZ 5 – Open midrise	LCZ E – Bared rock or paved
LCZ 6 – Open low-rise	LCZ F – Bare soil or sand
LCZ 7 – Lightweight low-rise	LCZ G – Water
LCZ 8 – Large low-rise	
LCZ 9 – Sparsely built	
LCZ 10 – Heavy industry	

160

161

Algumas classes LCZs podem não ocorrer em algumas cidades, ou uma “nova” classe pode ser criada caso não tenha alguma que corresponda a uma característica marcante da mesma, como por

162 exemplo, uma classe LCZ para neve. Além de que duas ou mais classes LCZs podem ser unidas
163 caso seja necessário [28,29].

164 Entretanto, neste estudo será feita uma adaptação desse método proposto para ex-
165 trairmos o melhor da resolução dos dados, já que a classificação WUDAPT, em sua do-
166 cumentação, trabalha com imagens Landsat com resolução de 30 metros e sua classifica-
167 ção, em sua maioria, trabalha com escalas menores da que é proposta nesse estudo. Pro-
168 curamos assim extrair o melhor de resultado que os nossos dados têm a oferecer. A se-
169 guir, os passos seguidos para a geração dos mapas LCZs.

170 3.1.1. Mapas LCZs de 2002 e 2010

171 Com os dados vetoriais fornecidos pela Prefeitura de Porto Alegre, pelo um levanta-
172 mento de Uso e Ocupação da Terra para os anos de 2002 e 2010, escolhido por serem
173 próximos dos censos realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IB-
174 GE). Com a classificação da Prefeitura, as classes definidas nos respectivos censos tive-
175 ram o seu tipo de uso e/ou cobertura comparado com qual tipo de classe LCZ ela seria,
176 como por exemplo, a classe Água, Casa Condomínios e Mata Nativa, outrora definidas
177 no censo do IBGE, foram respectivamente classificadas para as classes LCZs G, 3 e A.

178 Os mapas LCZs de 2002 e 2010 serviram para entender como acontece as dinâmicas
179 das alterações das classes, comparando com o mapa de 2023. Portanto, esses dois mapas
180 não foram gerados por algoritmos, e sim por classificação observacional.

181 3.1.2. Mapas LCZs de 2023

182 Primeiramente, os dados provenientes do MDE, tais como a orientação de vertentes,
183 declividade e as oito bandas das imagens Planet obtidas tanto no verão como no in-
184 verno foram utilizados para realizar a segmentação orientado a objetos da cidade de
185 Porto Alegre através do software eCognition developer 64 9.0. Para encontrar a melhor
186 segmentação para uma determinada região de estudo, são necessárias diversas testagens
187 com o intuito de identificar a melhor escala dos segmentos que irão se adequar para as
188 características da área de estudo. Neste estudo foram realizados mais de dez testes, na
189 qual a escala de 50 foi definida como a melhor. A escala define o tamanho mínimo que
190 os objetos segmentados terão na imagem, conforme pode ser observado na Figura 4.

191



192

Figura 4. Região de Porto Alegre com a segmentação na escala de 50.

193

194

195

196

Após a segmentação da imagem, na ferramenta de selecionar amostras do software, foram apuradas amostras de treinamento das classes LCZs, com pelo menos 50 amostras de cada classes, mais do que o recomendado pela WUDAPT. Este procedimento foi realizado com o intuito de melhor destacar as classes para posterior classificação.

197

198

199

200

201

202

203

Para fins de velocidade de processamento, o resultado da segmentação e as amostras selecionadas no eCognition foram exportadas para dados vetoriais e no software Qgis 3.22.5, com o vetor de segmentação, é realizado a seleção das amostras de validação de cada classe LCZ, com pelo menos 30 amostras de validação. Posteriormente, o vetor é trabalhado no ambiente RStudio versão 3.6.1. Nesse ambiente, os dados amostrais tiveram tratamentos prévios, como retirada de colunas da tabela de atributos desnecessários para a classificação.

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

Feito o tratamento prévio dos dados, o algoritmo Random Forest (RF) foi aplicado no ambiente R. Este sendo uma técnica de Machine Learning baseada em árvores de decisões aleatórias, a qual é frequentemente usada para propósitos de classificação e análise de regressão [30]. O classificador se tornou popular com o uso aplicado ao sensoriamento remoto, principalmente na classificação de uso e cobertura da terra, por ser altamente preciso, custos computacionais baixos e lidar com conjuntos de dados de alta dimensão [31]. Com o RF é gerado o mapa LCZ de 2023, para posteriormente unir o vetor dos pontos de validação com o vetor classificado e assim poder verificar a acurácia da classificação com o cálculo do Índice Kappa, matriz de confusão, acurácia do usuário e a do produtor. Quando o coeficiente Kappa não cumpre o requisito, as amostras de treinamento e verificação são corrigidas e reclassificadas até que ocorra a classificação adequa-

27

215 da da LCZ [19,1]. O fluxograma da Figura 3 resume toda a etapa de classificação dos ma-
 216 pas LCZs.

217 3.2. Obtenção da LST

218 A LST foi calculada utilizando as bandas termais (banda 6 – L5 e banda 10 – L10)
 219 pelo algoritmo Statistical Mono-Window (SMW), o qual usa a temperatura de brilho,
 220 média, e emissividade da superfície para estimar a LST [6]. Esse pode ser vista na Equ-
 221 ção 1:

$$LST = BT / 1 + W * (BT / p) * \ln(e)$$

LST: Land Surface Temperature; BT: Brightness temperature in Kelvin; Radiance emitted (1)
 wavelenght; p: Plank's constant

222 As imagens LST do Landsat 5 e 8, foram todas adquiridas pela rotina disponível no
 223 Google Earth Engine (GEE) desenvolvida por [13], na qual possui todos os métodos ma-
 224 temáticos e dados necessários do SMW para se obter as imagens LST dos respectivos sa-
 225 télites. Ademais, as bandas termais de ambos os satélites são reamostradas para 30 me-
 226 tros de resolução espacial. Além disso, o próprio código realiza as devidas correções at-
 227 mosféricas necessárias, como correção de emissividade, filtragem de nuvens, e a aplica-
 228 ção do SMW algoritmo.

229 Este estudo utiliza as médias de temperatura das estações do ano, com a finalidade
 230 de melhor entender a variação espaçotemporal da área de estudo, conforme realizado
 231 nos estudos de [32,33,1]. A quantidade de imagens utilizadas para se obter as médias
 232 das estações de acordo com os respectivos anos de estudo é apresentada na Tabela 4,
 233 além disso um exemplo da LST média para a estação do verão de 2021 na Figura 5.

234 **Tabela 4.** Quantidade de imagens pegues das estações em seus respectivos anos.

Ano*	Verão	Outono	Inverno	Primavera
2019/2022	6	4	5	6
2009/2011	12	1	3	4
2000/2004	5	4	4	5

235 *Os anos e as quantidades de imagens foram selecionados de acordo com a melhor disponibilidade dos dados, levan-
 236 do em conta a menor presença de nuvens. Por decorrência disso temos imagens LST fora do mesmo ano das classes
 237 LCZ propostas, mas todas dentro da mesma estação.

238



239

Figura 5. Média da LST para o verão de 2021.

240

No Apêndice A, encontra-se o código aberto de [13].

241

4. Resultados e Discussões

242

243

Esta seção apresentará os resultados e discussões na classificação da LCZ, geração dos mapas LST e correlação da LST/SUHI com as classes LCZs.

244

4.1. Zonas Climáticas Locais

245

246

Os respectivos mapas gerados das LCZs dos anos de estudo podem ser observados na Figura 6.

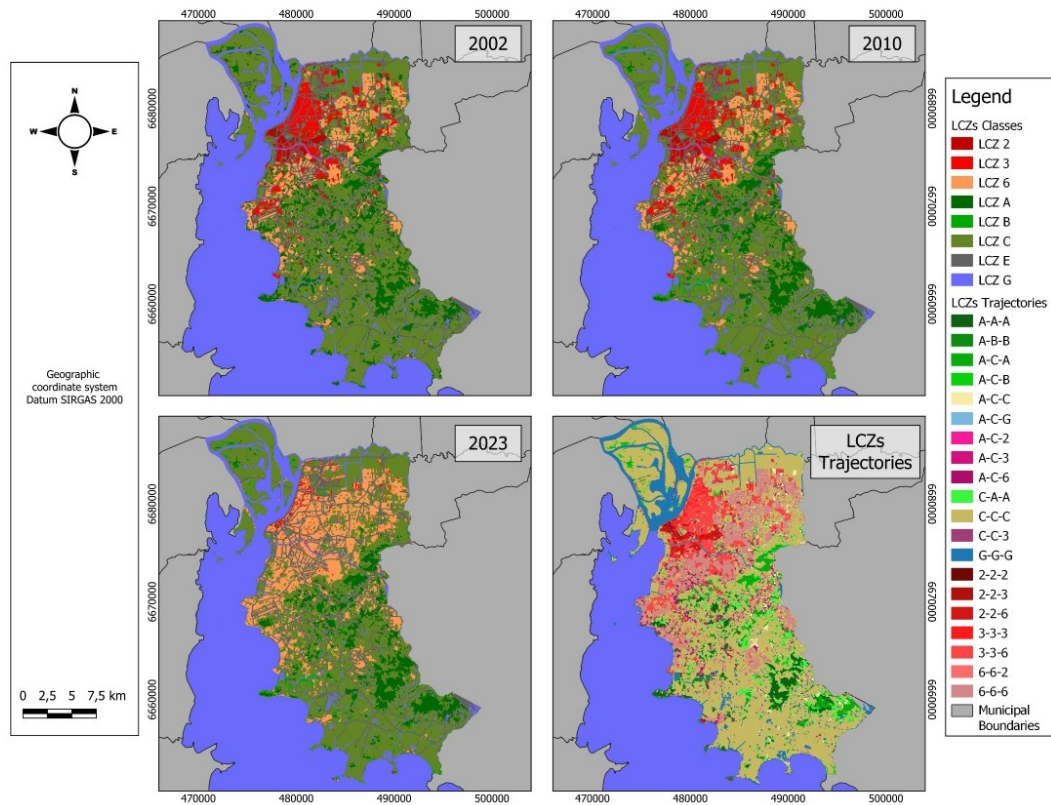
247

248

249

250

251



252
253

Figure 6. Mapas LCZs de Porto Alegre para os anos de 2002, 2010 e 2023 e transição de trajetórias das classes LCZs, para os respectivos anos.

254
255

Além disso, a Tabela 5 esclarece os percentuais de cada classe LCZ presente em Porto Alegre.

256

Tabela 5. Áreas e percentuais das classes LCZs.

Classes	LCZ 2002		LCZ 2010		LCZ 2023	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
--	8.9	1,8	8.9	1,8	6.5	1,3
2	62.4	12,6	62.4	12,6	52	10,5
6	72.4	14,7	72.4	14,7	103.5	20,9
A	120.7	24,5	95.3	19,3	95.3	19,3
B	--	--	29.1	5,9	30.3	6,1
C	189.9	38,5	186.2	37,7	168	33,9
E	15.2	3,1	15.2	3,1	15.2	3,1
G	24.1	4,9	24.1	4,9	24.1	4,9
Total	493.6	100	493.6	100	495	100

257

258 Vale mencionar que nem todas as classes LCZs mencionadas na literatura de [18],
259 são obrigadas a estarem presentes em qualquer região de estudo, conforme os trabalhos
260 de [34,35,3]. Também, é possível a criação de novas classes que se encaixem com a de-
261 manda da área de estudo, conforme [19] elucidada em seu estudo, na qual classes de cober-
262 tura podem ser classificadas de acordo o tipo climático ou propriedades efêmeras. Ou
263 seja, a documentação da LCZ é bem clara sobre a liberdade de classificação das suas
264 classes quando necessário para melhor representação da área a ser estudada.

265 Portanto, nesse trabalho, as classes de construídos LCZs 1, 4, 5, 7, 8, 9 e 10 não fo-
266 ram segregadas em classes próprias pois são inexpressivas na cidade por possuir um
267 montante não tão significativo, como ocorreu na classe LCZ 1, na qual Porto Alegre pos-
268 suí poucas construções altas verticalmente e densamente aglomeradas. Algumas destas
269 foram unidas a outras classes, como é o caso do LCZ 9, esta classe sendo unida ao LCZ 6
270 durante a classificação por ambas possuírem características semelhantes, mas a LCZ 6
271 sobressaindo-se em suas características, pois ambas possuem plantas baixas e árvores es-
272 palhadas, mas a última possuindo mais construções dentro dessas áreas verdes.

273 Caso semelhante também ocorreu nas classes de cobertura, na qual as LCZs D e F
274 fazem parte da LCZ C, pois as zonas de solo exposto (LCZ F) na cidade são temporárias
275 e zonas de plantas baixas (LCZ D) são irrisórias, embora as poucas existentes sejam zo-
276 nas de agricultura e campo, por isso também referidas ao LCZ C. Por fim, a LCZ E na
277 classificação de geração do mapa de 2023 não foi considerada, apesar de todos os três
278 anos possuírem essa classe, o solo pavimentado ou pedra nua (LCZ E) foi retirada pois
279 gerava muita confusão para o modelo de classificação, além dos materiais das vias da ci-
280 dade serem muitos confundidos com os materiais das casas ao redor.

281 Conforme a Figura 6 e a Tabela 5, as classes construídas 2 e 3 tiveram diminuição de
282 0,5% da sua área total para 2023, enquanto a classe 6 obteve um aumento de 6,2% da sua
283 área total, configurando uma mudança tendência das construções urbanas de Porto Ale-
284 gre. Vale ressaltar, segundo o plano diretor da cidade, as regiões dos bairros chamados
285 Centro Histórico e 4º Distrito possuem uma flexibilização na altura dos prédios, regiões
286 essas que possuem as classes mais altas verticalmente de construções da LCZ [36]. Entre-
287 tanto, tendência essa que está querendo ser alterado no novo plano diretor vigente para
288 2024, ou seja, já podemos notar uma tendência de construções mais baixas com o aumen-
289 to de área da LCZ 6 e pequena diminuição das LCZs 3 e 4 [37].

290 Já a classe A, houve uma perda de 5,1% da sua área total de 2002 para 2010, man-
291 tendo-se em 19,3% de 2010 para 2023. As políticas de recuperação de áreas e preservação
292 de áreas florestais de Porto Alegre e do Estado do Rio Grande do Sul podem estar relaci-
293 onadas com essa manutenção de área verde densa [38,39]. A classe B não foi registrada
294 para a cidade em 2002, refletindo no surgimento de mais praças para os anos de 2010 e
295 2023, com 5,3% da área total da cidade da LCZ B em 2002 e sendo registrado um aumen-
296 to de somente 0,2% para 2023. O número de praças e arborização de Porto Alegre pode
297 ser refletido nos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no qual
298 analisou no Censo Demográfico de 2010 as taxas de arborização em vias públicas nas ci-
299 dades brasileiras com mais de um milhão de habitantes, com a cidade registrando a ter-
300 ceira colocação nacional [40].

301 A classe LCZ C possuiu uma perda gradativa de área agricultável e/ou terrenos
 302 com vegetações rasteiras, na qual em 2002 correspondia 38,5% da área total, passando
 303 em 2010 ser 37,7% e em 2023 correspondendo ser 33,9%, uma diminuição de 4,6% con-
 304 tando de 2002 para 2023. Essas áreas podem ter perdido espaço para regiões de reflores-
 305 tamento (LCZ B) e para a expansão urbana, como LCZ 3 e 6, pois como foi visto na Tabe-
 306 la 5, essas duas classes citadas obtiveram aumento ao longo dos anos e em regiões próxi-
 307 mas da LCZ C.

308 As classes LCZs E e G não tiveram grandes alterações ao longo do tempo, sendo re-
 309 gistrado o valor de 3,1% e 4,9% respectivamente para todos os anos estudados, configu-
 310 rando assim um cenário onde as estruturas pavimentadas e os corpos hídricos da região
 311 não tiveram tantas alterações significativas.

312 Conforme exibe a Figura 6, a tabela 6 elucida todas as combinações de transições
 313 que aconteceram durante os anos de 2002, 2010 e 2023 na região de estudo.

314 **Tabela 6.** Processo de transição das classes LCZs durante 2002, 2010 e 2023.

Trajetória das classes LCZs		
2002	2010	2023
2	2	2
2	2	3
2	2	6
3	3	3
3	3	6
6	6	2
6	6	6
A	A	A
A	B	B
A	C	A
A	C	B
A	C	C
A	C	G
A	C	2
A	C	3
A	C	6
C	A	A
C	C	C
C	C	3
G	G	G

315

316 Em ambas as categorias, quase todas as classes LCZs possuem regiões que não so-
 317 freram alterações, menos a LCZ B, não estando presente em 2002, como já mencionado.
 318 Das alterações da categoria construída, a classe LCZ 2 possuiu dois casos em que perma-
 319 neceu inalterada de 2002 para 2010 (Não levando em conta o caso sem alterações nos três

320 anos), mas em 2023 ocorreu mudança ou para a LCZ 3 ou a LCZ 6. Caso semelhante
 321 ocorre na LCZ 3 e 6, a primeira passando a ser LCZ 6 e a outra passando a ser LCZ 2. Es-
 322 sas alterações de classes são normais quando se pensa nas dinâmicas da cidade, pois fa-
 323 tores econômicos e sociais alteram no crescimento urbano, podendo ocorrer tanto verti-
 324 cal e/ou horizontalmente.

325 Outra consequência do crescimento urbano, é a supressão de vegetação, como acon-
 326 teceu em regiões com as classes LCZs A de 2002, virando LCZ C, ou seja, desmataram
 327 vegetação nativa para estabelecerem regiões de agricultura em sua maioria ou virando
 328 LCZ 12, possivelmente sendo criada um parque urbano na região. De 2010 para 2023, al-
 329 gumas classes se estabeleceram como LCZ B ou C. Entretanto, também temos regiões
 330 que as classes de cobertura viraram classes LCZs de construção, elucidando o crescimen-
 331 to urbano da cidade. Vale notar, regiões que obtiveram restauração da vegetação nativa
 332 densa, partindo de 2002 ou 2010 para LCZ C, e permanecendo LCZ A em 2023, podendo
 333 ser levado em conta o programa de restauração de Porto Alegre da mata nativa.

334 Os dados de validação do classificador Random Forest (RF) para o mapa da Figura
 335 6 (LCZ de 2023), acompanhado da matriz de confusão das classes LCZs é exibido na Ta-
 336 bela 7.

337 **Tabela 7.** Matriz de confusão das classes LCZs classificadas.

Classes	Matriz de confusão							Total	ACP	Omis- são
	2	3	6	A	B	C	G			
2	29	3	2	0	0	0	0	34	85.3%	14.7%
3	4	26	4	0	0	0	0	34	76.5%	23.5%
6	0	7	25	0	0	0	0	32	78.1%	21.9%
A	0	0	0	27	6	0	0	34	79.4%	20.6%
B	0	1	0	0	26	1	0	28	92.9%	7.1%
C	0	0	0	0	0	31	0	31	100%	0%
G	0	0	0	1	2	0	27	30	90%	10%
Total	33	37	31	29	34	34	25	223	--	--
ACU	87.9%	70.3%	80.6%	96.4%	76.5%	93.9%	100%	--	AG	85.7%
Comis- são	12.1%	29.7%	19.4%	3.6%	23.5%	6.1%	0%	--	Kappa	83.3%

338 ACU: Acurácia de Usuário; ACP: Acurácia do Produtor; AG: Acurácia Global.

339 A acurácia do Usuário (ACU), essa está relacionada com a confiabilidade de cada
 340 classe mapeada, enquanto a acurácia do Produtor (ACP) corresponde à porcentagem de
 341 pontos de determinada classe que foram classificados corretamente [41,42]. Todas as
 342 classes analisadas no estudo obtiveram resultados satisfatórios, entretanto, entre elas, a
 343 classe LCZ 3 foi a que obteve o menor valor de acerto, com sua ACU e ACP em 70.3% e
 344 76.5%, respectivamente, com comissão de 29.7% e erro de omissão de 23.5%. Sendo refle-
 345 tido na distribuição das amostras, na qual essa classe foi a que houve mais confusão, so-
 346 mando 8 no total os erros de classificação dessa classe, 4 entre a LCZ 2 e 3 entre a LCZ 6.
 347 O entre essas classes pode ter ocorrido por possuir materiais que se assemelham, além
 348 de ocorrer sombreamento em regiões do imageamento. Além disso, essas áreas ocorrem
 349 muito próximas, muitas vezes sem distinção clara dentre suas transições. Caso seme-
 350 lhante ocorre com a LCZ 6, de ACU 80.6% e 19.4% de comissão e ACP de 78.1% com
 351 omissão de 21.9%, na qual esta classe LCZ se confunde muito com a LCZ 3, por apresen-
 352 tar também áreas transitórias não tão claras e por terem geometrias semelhantes em de-
 353 terminados casos. Contudo, os valores de acurácia dessas classes são altos para regiões
 354 com esses vieses.

355 A classe construída LCZ 2 foi a que apresentou maior acurácia, com acerto de
 356 85.3%, seguido por 87.9% em seu valor de ACU e com comissão de 12.1% e erro de omis-
 357 são de 14.7%, possuindo pequenas confusões com a LCZ 3 e LCZ 6.

358 Tratando-se das classes de cobertura, a LCZ C e G foram a que apresentaram os
 359 maiores acertos, de 100%, seguido por seu ACU de 93.9%, com comissão e erro de omis-
 360 são de 6.1% e 0% para a LCZ C e com ACU e ACP de 100% e 90%, com a comissão de 0%
 361 e erro de omissão de 10%, para a LCZ G. Essas classes apresentaram esses acertos por
 362 possuírem cobertura e respostas espectrais bem característica e distintas das demais clas-
 363 ses, na qual a LCZ C vai apresentar solos mais expostos, ou vegetações mais rasteiras,
 364 enquanto a LCZ G são praticamente recursos hídricos, na qual a confusão de classifica-
 365 ção que essa classe pode ter é com relação ao sombreamento das árvores que ocorre na
 366 LCZ A ou fontes de água que existem em alguns parques urbanos da LCZ B.

367 As LCZs A e B, também possuem valores altos de acurácia, principalmente o LCZ
 368 A, com ACU de 96.4% e ACP de 79.4%, entretanto, essa classe vai ter muita confusão
 369 com a LCZ B por conta das características em comuns, como considerável número de ár-
 370 voreas em conjunto, sombreamento que as copas das árvores geram no solo e as seme-
 371 lhanças espectrais desses elementos.

372 Além disso, a acurácia global do classificador foi de 85.7% e o índice Kappa da clas-
 373 sificação RF realizada em ambiente R foi de 83.3%, resultado esse satisfatório, pois levan-
 374 do em conta que foi utilizado no estudo imagem de alta resolução espacial, de 3 metros,
 375 assim possuindo um alto detalhamento dos objetos e cenários da região trabalhada. Por-
 376 tanto, uma classificação do Kappa com esse valor é bem adequado [43,44,29].

377 4.2. Classificação LST e SUHI

378 Os mapas de temperatura da superfície das estações de cada ano está presente na
 379 Figura 8.



Figure 8. Mapas das temperaturas médias da superfície (°C) de Porto Alegre para as quatro estações do ano.

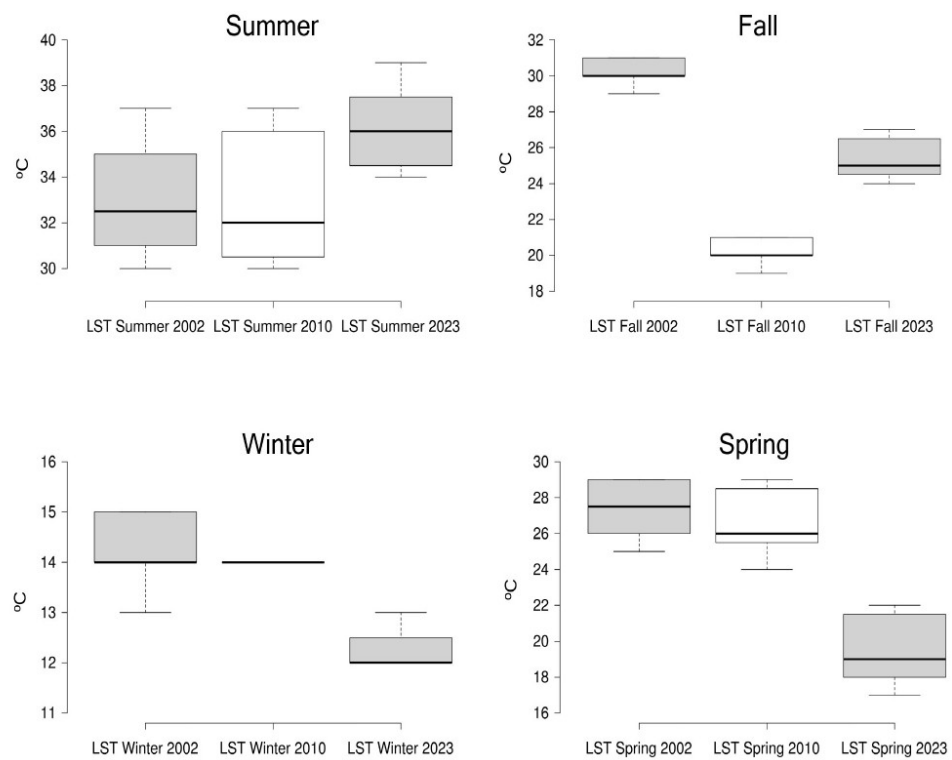
384 Conforme demonstrado na Figura 8, é notório um padrão para a temperatura nos
385 três anos para a estação do verão, mês esse historicamente mais quente. Nos mapas, é
386 identificado que esse período possui as maiores máximas, com valores entre 45 a 47 °C, e
387 os mínimos com temperaturas de 24 a 27 °C. O mesmo padrão também foi encontrado
388 para outros estudos como [45-47].

389 Para o Outono, é observado valores entre 36 e 37 °C para as máximas e 22 a 24 °C
390 para as mínimas, para 2002 e 2023, respectivamente. Entretanto, para o ano de 2011, as
391 temperaturas máximas e mínimas foram de 27 e 16 °C, respectivamente, mais abaixo do
392 que as temperaturas médias registradas. Conforme [48], no período do Outono desse
393 ano, ocorreu uma onda de frio, registrando temperaturas mais baixas para esse período,
394 além das massas de ar secas garantindo um certo aquecimento.

395 O inverno, como o esperado de acordo com [49,46], foi a estação com as menores
396 temperaturas entre as mínimas e máximas, com 9 a 11 °C e 18 a 22 °C, respectivamente
397 para os anos de 2002 e 2023. Além disso, para a primavera, caracterizando a passagem
398 do clima frio e seco do inverno para posteriormente iniciar o clima seco e quente do ve-
399 rão, as temperaturas máximas foram de 32 a 39 °C, e as mínimas registradas entre 15 a
400 19 °C.

401 Além disso, Na Figura 9, são apresentados os gráficos boxplots das temperaturas
402 das estações dos anos, relacionadas com cada ano analisado, importantes para as análi-
403 ses estatísticas e detecção de valores como máximas, mínimas e médias das LSTs. A Fi-
404 gura 10 elucida bem as máximas e mínimas das médias das temperaturas para cada regi-
405 ão LCZ registrada nos anos de 2002, 2010 e 2023.

406



407

Figura 9. Gráficos Boxplots das 4 estações dos anos estudados.

408

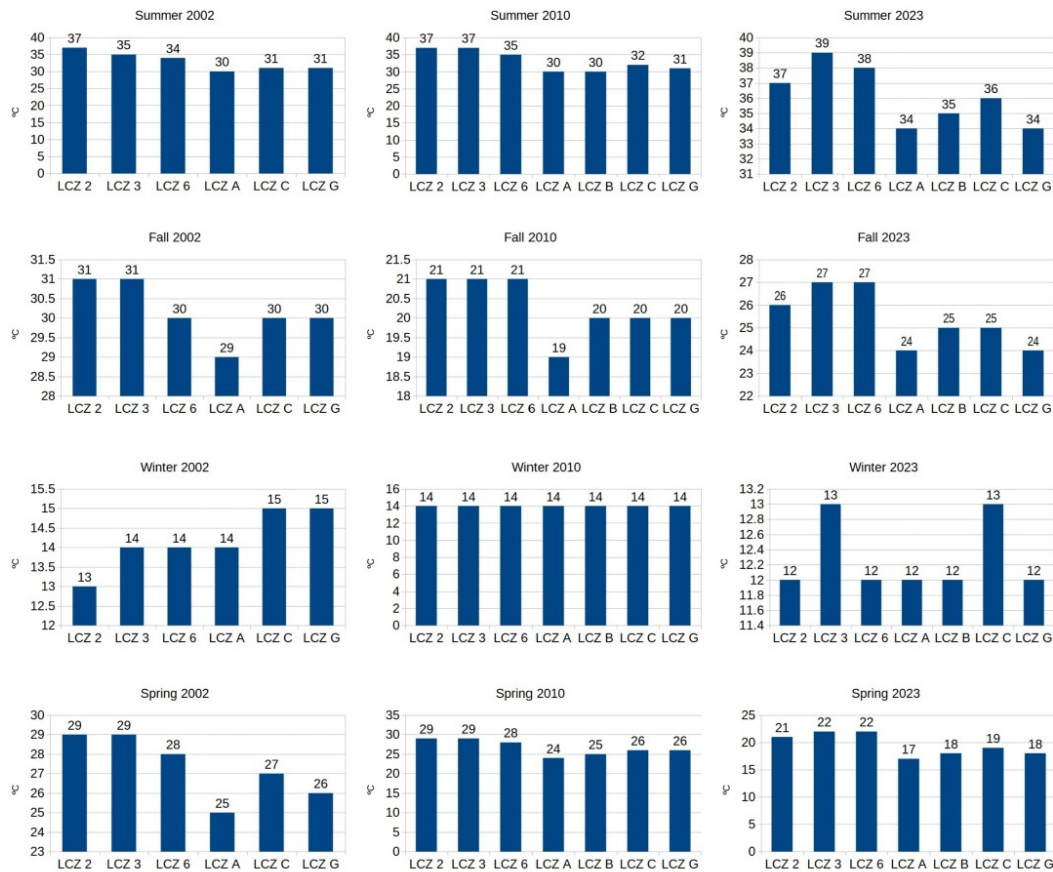
409

410

411

412

57



413

Figura 10. Valores de média da LST para as regiões LCZs.

414

415

416

417

418

419

420

421

422

423

424

425

426

427

428

De acordo com as médias de temperatura, a estação do verão apresentou as maiores temperaturas em todos os anos analisados, na qual as classes LCZs de construção obtêm os maiores valores de LST, com médias máximas de temperatura para o ano 2002 e 2010 concentravam-se nas classes LCZs 2, ambos com valores próximos a 37 °C, embora que 2023, as máximas passaram a ser para regiões de LCZ 3, com valores próximos a 40 °C, indicando uma tendência de aumento da temperatura para essa classe nos anos mais recentes. Esse aumento pode se dar pelo fato do aumento da classe LCZ 3, nas quais temos uma verticalização menor das construções, consequentemente diminuindo o sombreamento provido por prédios altos e aumentando a área de contato da superfície com a radiação solar [50]. As classes de menor temperatura, para todos os anos, foram as de cobertura, entre elas destacada a LCZ A, G e C. Com valores médios variando entre 30-32 °C para 2002 e 2010, e de 34-36 °C para 2023. A temperatura mais amena nessas regiões ocorre pela dissipação do calor acumulado pela vegetação, a baixa ocorrência de materiais impermeáveis, além da amenização da temperatura pelos corpos hídricos próximos, conforme nos trabalhos de [51-53].

429 A estação do Outono foi a segunda mais quente para 2002 e 2023, conforme já dis-
 430 cutido anteriormente, ocorreu uma onda de frio no período de 2010, com máximas de 21
 431 °C, além de configurar uma baixa amplitude térmica, variando entre 19–21 °C entre as
 432 classes LCZs registradas. Para 2002 a média máxima foi 31 °C e 2023 em torno de 27 °C.
 433 As classes LCZs de construção tiveram as maiores temperaturas, assim como registrado
 434 para o verão. As mínimas dessa estação foram de 24–25 °C em 2023, 19–20 °C em 2010 e
 435 29–30 °C em 2002.

436 A primavera, sendo a segunda estação mais fria de 2002 e 2023, apresentando valo-
 437 res de 29 °C na máxima na LCZ 2 e 3 e 25 °C na mínima na LCZ A, e 22 °C na máxima na
 438 LCZ 3 e 6 e 17 °C na mínima na LCZ A, nos respectivos anos. Para 2010, essa estação é
 439 apresentada como a segunda mais quente, com amplitude térmica média variando de 5
 440 °C, com a LCZ C registrando 26 °C e 29 °C de máxima para a LCZ 2 e 3.

441 A estação mais fria, a do inverno, sua amplitude térmica dos três anos é baixa, com
 442 amplitudes de 1–2 °C. Destaca-se as classes LCZs 2 em 2002 e LCZ 2, 6 A, B e G em 2023,
 443 apresentando os valores mais baixos desses anos. A LCZ 2 pode ter apresentado baixa
 444 pois, apesar de ser uma classe normalmente de elevadas temperaturas, conforme [54,55],
 445 também pode apresentar valores mais amenos em determinados casos. O que ocorre na
 446 área de estudo é o resfriamento por sombreamento causado pelos prédios. A LCZ 6, ape-
 447 sar de ser uma classe de construção, apresenta considerável presença de vegetação em
 448 determinadas áreas, explicando o seu resfriamento, além disso, os corpos hídricos (LCZ
 449 G), como já citado, são regiões de frescor, justificando seu resfriamento.

450 As análises estatísticas foram realizadas baseadas que as LCZs delimitadas com
 451 maior precisão devem exibir médias de LST distintas [56], com a aplicação do cálculo de
 452 Análise de Variância (ANOVA) e a aplicação do teste não paramétrico Kruskal-Wallis,
 453 estes utilizados a fim de determinar se ocorre diferença significativa entre as LSTs, já que
 454 o dado LST não segue um padrão de distribuição normal [57]. Os resultados da ANOVA
 455 e do teste Kruskal-Wallis estão na Tabela 8.

456 **Tabela 8.** Resultados ANOVA e Kruskal-Wallis.

ANOVA			
Ano	F	P value	F crítico
2023	953	1,23E-62	2,71
2010	452	4,578E-50	2,71
2002	383	2,203E-47	2,71
Kruskal-Wallis			
Ano	p		
2023	8,987E-17		
2010	8,984E-17		
2002	5,135E-14		

457

458 Com os resultados da tabela acima, o valor F da ANOVA sendo maior que os F
 459 crítico, além do valor P ser menor que o nível de significância, que foi de 0,05, elucida
 460 que ocorreu diferenças significativas entre as médias das LSTs. Esse fato é reforçado com

o valor p do teste de Kruskal-Wallis, na qual comprova a diferença significativa entre as das estações dos anos de LST. Essa abordagem de análise estatística também obteve diferenças estatísticas para as temperaturas para o estudo de [57,54,7,29].

5. Conclusão

Este estudo analisou o ambiente termal urbano de Porto Alegre – RS, com o auxílio do sistema de classificação das Zonas Climáticas Locais para entender as características espaços temporais da Ilha de calor urbana da superfície, por meio da análise da Temperatura da Superfície de 2002, 2010 e 2023 da região. A hipótese de que as Zonas climáticas influenciam as alterações do ambiente termal urbano foi investigada, na qual as classes LCZs definidas para a cidade foram 2, 3, 6 para as classes construídas e A, B, C, E e G para as classes de cobertura. Dentre o primeiro grupo, a LCZ 6 obteve um aumento de 6,2% de 2010 para 2023, enquanto para o grupo de cobertura, temos a LCZ A em destaque, registrando uma perda na sua área de 5,1% de 2002 para 2010 e uma estagnação da sua supressão de 2010 para 2023. Além disso, a classificação do mapa da LCZ de 2023 pelo classificador Random Forest obteve uma acurácia global de 85,7%, com o Kappa de 83,3%, resultado satisfatório para a classificação. Pela análise das imagens de temperatura média da superfície, a estação do verão registrou os maiores valores em todos os anos analisados, com as classes LCZ 2 de 2002 e 2010 registrando altas de 38 °C, embora que em 2023 a LCZ que obteve maior média de temperatura foi a 3, com 40 °C. Em contrapartida, a estação que registrou as menores temperaturas e amplitudes térmicas, foi o período do inverno, com variações de 2 °C. Além disso, para constatar se ocorre significância entre as LSTs registradas, foi aplicado a Análise de Variância e o teste de Kruskal-Wallis, com um nível de significância de 5%, na qual foi identificada diferenças significativas entre as médias das temperaturas. Logo, os objetivos propostos no estudo foram alcançados, com os mapas LCZs gerados, com as análises das mudanças e influências das LCZs e a dinâmica térmica nessas classes. Portanto, a classificação da LCZ é uma metodologia válida e adequada para detectar com maior acurácia as LSTs de regiões da cidade com características distintas. Os resultados dessa metodologia é permissível para a aplicação em centros urbanos de diferentes climas e também para os tomadores de decisões dos centros urbanos se basearem, facilitando na identificação de quais regiões da cidade deve-se atuar medidas mitigadoras, considerando o contexto de mudanças climáticas e os objetivos do desenvolvimento sustentáveis (ODS) da Organização das Nações Unidas, como o ODS 11, de cidades e comunidades sustentáveis, podendo ser criadas alternativas para diminuir o estresse térmico na população, no qual gera problemas econômicos e fisiológicos diretos e indiretos.

Author Contributions: Conceptualization and methodology, X.X.; software, R.F. and M.F.; software, R.F. and M.F.; validation, R.F., M.F. and V.N.; writing—original draft preparation, R.F.; writing—review and editing, V.N.; supervision, M.F. and V.N.; funding acquisition, Y.Y. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior (CAPES) R.F scholarship number (88887.645454/2021-00).

Acknowledgments: In this section, you can acknowledge any support given which is not covered by the author contribution or funding sections. This may include administrative and technical support, or donations in kind (e.g., materials used for experiments).

506 **Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

507 **Appendix A**

508 Mais sobre a rotina de [13] pode ser encontrada no seguinte link:
509 https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users/sofiaermida/landsat_smw_lst

510 **References**

511

1. Zhang, Y.; Li, D.; Liu, L.; Liang, Z.; Shen, J.; Wei, F.; Li, S. Spatiotemporal Characteristics of the Surface Urban Heat Island and Its Driving Factors Based on Local Climate Zones and Population in Beijing, China. *Atmosphere* **2021**, *12*, 1271, doi:10.3390/atmos12101271.
2. Kalnay, E.; Cai, M. Impact of Urbanization and Land-Use Change on Climate. *Nature* **2003**, *423*, 528–531, doi:10.1038/nature01675.
3. Hu, J.; Yang, Y.; Pan, X.; Zhu, Q.; Zhan, W.; Wang, Y.; Ma, W.; Su, W. Analysis of the Spatial and Temporal Variations of Land Surface Temperature Based on Local Climate Zones: A Case Study in Nanjing, China. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing* **2019**, *12*, 4213–4223, doi:10.1109/JSTARS.2019.2926502.
4. Liu, L.; Zhang, Y. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong. *Remote Sensing* **2011**, *3*, 1535–1552, doi:10.3390/rs3071535.
5.Azmi et al. - 2021 - Exploring the Relationship between Urban Form and .PDF.
6.Nurwanda e Honjo - 2018 - Analysis of Land Use Change and Expansion of Surfa.Pdf.
7.Unal Cilek e Cilek - 2021 - Analyses of Land Surface Temperature (LST) Variabi.Pdf.
8. Zhengming Wan; Dozier, J. A Generalized Split-Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature from Space. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **1996**, *34*, 892–905, doi:10.1109/36.508406.

9. Jimenez-Munoz, J.C.; Cristobal, J.; Sobrino, J.A.; Soria, G.; Ninyerola, M.; Pons, X.; Pons, X. Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **2009**, *47*, 339–349, doi:10.1109/TGRS.2008.2007125.
10. Qin, Z.; Karnieli, A.; Berliner, P. A Mono-Window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM Data and Its Application to the Israel-Egypt Border Region. *International Journal of Remote Sensing* **2001**, *22*, 3719–3746, doi:10.1080/01431160010006971.
11. Ulivieri, C.; Castronuovo, M.M.; Francioni, R.; Cardillo, A. A Split Window Algorithm for Estimating Land Surface Temperature from Satellites. *Advances in Space Research* **1994**, *14*, 59–65, doi:10.1016/0273-1177(94)90193-7.
12. Wang, M.; He, G.; Zhang, Z.; Wang, G.; Wang, Z.; Yin, R.; Cui, S.; Wu, Z.; Cao, X. A Radiance-Based Split-Window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval: Theory and Application to MODIS Data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **2019**, *76*, 204–217, doi:10.1016/j.jag.2018.11.015.
13. Ermida, S.L.; Soares, P.; Mantas, V.; Göttsche, F.-M.; Trigo, I.F. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. *Remote Sensing* **2020**, *12*, 1471, doi:10.3390/rs12091471.
14. Alghamdi, A.S.; Alzhrani, A.I.; Alanazi, H.H. Local Climate Zones and Thermal Characteristics in Riyadh City, Saudi Arabia. *Remote Sensing* **2021**, *13*, 4526, doi:10.3390/rs13224526.
15. Ellefsen, R. Mapping and Measuring Buildings in the Canopy Boundary Layer in Ten U.S. Cities. *Energy and Buildings* **1991**, *16*, 1025–1049, doi:10.1016/0378-7788(91)90097-M.
16.Davenport_etal_4B2.Pdf.
17. Oke, T.R. INITIAL GUIDANCE TO OBTAIN REPRESENTATIVE METEOROLOGICAL OBSERVATIONS AT URBAN SITES. 52.
18. Stewart, I.D.; Oke, T.R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2012**, *93*, 1879–1900, doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

-
19. Fernandes, R.; Nascimento, V.; Freitas, M.; Ometto, J. Local Climate Zones to Identify Surface Urban Heat Islands: A Systematic Review. *Remote Sensing* **2023**, *15*, 884, doi:10.3390/rs15040884.
20. Adalto Moreira Braz; Thales Sehn Korting; Alécio Perini Martins; Amanda Moreira Braz GEOBIA E MINERAÇÃO DE DADOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS DE ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO ESPACIAL. *ESTGEO* **2021**, *19*, 209–224, doi:10.5016/estgeo.v19i3.16254.
21. Shi, Y.; Xiang, Y.; Zhang, Y. Urban Design Factors Influencing Surface Urban Heat Island in the High-Density City of Guangzhou Based on the Local Climate Zone. *Sensors* **2019**, *19*, 3459, doi:10.3390/s19163459.
22. IBGE. Cidades e Estados. Available online: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/porto-alegre/panorama/> (Access on 21 august 2023).
23. INMET. Available online: <https://bdmep.inmet.gov.br>(Access on 21 august 2023).
24. USGS. Landsat Missions. Available online: <https://www.usgs.gov/landsat-missions> (Access on 21 august 2023).
25. Planet. Understanding PlanetScope Instruments. Available online: <https://developers.planet.com/docs/apis/data/sensors/> (Access on 21 august 2023).
26. Pinheiro, É.C.C.; Ramos, A.P.M.; Marcato, J. Remote Sensing Applied to the Environmental Regularization of Rural Properties in Mato Grosso do Sul. *Anuário IGEO UFRJ* **2019**, *42*, 145–153, doi:10.11137/2019_3_145_153.
27. Demuzere, M.; Kittner, J.; Bechtel, B. LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Front. Environ. Sci.* **2021**, *9*, 637455, doi:10.3389/fenvs.2021.637455.
28. Chen, Y.; Zheng, B.; Hu, Y. Mapping Local Climate Zones Using ArcGIS-Based Method and Exploring Land Surface Temperature Characteristics in Chenzhou, China. *Sustainability* **2020**, *12*, 2974, doi:10.3390/su12072974.

29. Zhou, X.; Okaze, T.; Ren, C.; Cai, M.; Ishida, Y.; Watanabe, H.; Mochida, A. Evaluation of Urban Heat Islands Using Local Climate Zones and the Influence of Sea-Land Breeze. *Sustainable Cities and Society* **2020**, *55*, 102060, doi:10.1016/j.scs.2020.102060.
30. Oliveira, A.; Lopes, A.; Niza, S.; Soares, A. An Urban Energy Balance-Guided Machine Learning Approach for Synthetic Nocturnal Surface Urban Heat Island Prediction: A Heatwave Event in Naples. *Science of The Total Environment* **2022**, *805*, 150130, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150130.
31. Chen, C.; Bagan, H.; Xie, X.; La, Y.; Yamagata, Y. Combination of Sentinel-2 and PALSAR-2 for Local Climate Zone Classification: A Case Study of Nanchang, China. *Remote Sensing* **2021**, *13*, 1902, doi:10.3390/rs13101902.
32. Xia, H.; Chen, Y.; Song, C.; Li, J.; Quan, J.; Zhou, G. Analysis of Surface Urban Heat Islands Based on Local Climate Zones via Spatiotemporally Enhanced Land Surface Temperature. *Remote Sensing of Environment* **2022**, *273*, 112972, doi:10.1016/j.rse.2022.112972.
33. Quan, J. Multi-Temporal Effects of Urban Forms and Functions on Urban Heat Islands Based on Local Climate Zone Classification. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2019**, *35*.
34. Cai, Z.; Tang, Y.; Zhan, Q. A Cooled City? Comparing Human Activity Changes on the Impact of Urban Thermal Environment before and after City-Wide Lockdown. *Building and Environment* **2021**, *195*, 107729, doi:10.1016/j.buildenv.2021.107729.
35. Dimitrov, S.; Popov, A.; Iliev, M. An Application of the LCZ Approach in Surface Urban Heat Island Mapping in Sofia, Bulgaria. *Atmosphere* **2021**, *12*, 1370, doi:10.3390/atmos12111370.
36. PDDUA. *Parte II Do Sistema de Planejamento*. Prefeitura Municipal de Porto Alegre Secretaria do Planejamento Municipal: Porto Alegre, 2011; pp. 51–91.
37. GZH Porto Alegre. Available online: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/porto-alegre/noticia/2023/06/saiba-como-esta-avancando-a-revisao-do-plano-diretor-de-porto-alegre-cljekbt4d008q0156stj0itcv.html> (access on 21 august 2023).

38. Porto Alegre PREFEITURA. Available online: <https://prefeitura.poa.br/smamus/noticias/novo-portal-divulga-plano-municipal-de-conservacao-da-mata-atlantica> (access on 21 august 2023).
39. Governo do Estado RIO GRANDE DO SUL. Available online: <https://estado.rs.gov.br/governo-integra-pacto-pela-restauracao-da-mata-atlantica> (access on 21 august 2023).
40. IBGE. Available online: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/porto-alegre/panorama> (access on 21 august 2023).
41. MAPBIOMAS BRASIL. Available online: <https://brasil.mapbiomas.org/analise-de-acuracia> (access on 21 august 2023).
42. Prado, D, F, C do. MEDIDAS DE ACURÁCIA BASEADA EM OBJETO: ANÁLISE METODOLÓGICA EM RELAÇÃO À VALIDAÇÃO BASEADA EM PIXEL. Master's Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
43. Sun, Z.; Yu, S.; Guo, H.; Wang, C.; Zhang, Z.; Xu, R. Assessing 40 Years of Spatial Dynamics and Patterns in Megacities along the Belt and Road Region Using Satellite Imagery. *International Journal of Digital Earth* **2021**, *14*, 71–87, doi:10.1080/17538947.2020.1747560.
44. Mugiraneza, T.; Ban, Y.; Haas, J. Urban Land Cover Dynamics and Their Impact on Ecosystem Services in Kigali, Rwanda Using Multi-Temporal Landsat Data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* **2019**, *13*, 234–246, doi:10.1016/j.rsase.2018.11.001.
45. Fricke, C.; Pongrácz, R.; Gál, T.; Savić, S.; Unger, J. Using Local Climate Zones to Compare Remotely Sensed Surface Temperatures in Temperate Cities and Hot Desert Cities. *Moravian Geographical Reports* **2020**, *28*, 48–60, doi:10.2478/mgr-2020-0004.
46. Dian, C.; Pongrácz, R.; Dezső, Z.; Bartholy, J. Annual and Monthly Analysis of Surface Urban Heat Island Intensity with Respect to the Local Climate Zones in Budapest. *Urban Climate* **2020**, *31*, 100573, doi:10.1016/j.uclim.2019.100573.
47. Dutta, K.; Basu, D.; Agrawal, S. Evaluation of Seasonal Variability in Magnitude of Urban Heat Islands Using Local Climate Zone Classification and Surface Albedo. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **2021**, doi:10.1007/s13762-021-03602-w.

48. GZH GERAL. Available online: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2011/07/em-dia-que-marca-onda-de-frio-recorde-no-rs-temperatura-varia-cerca-de-20c-em-quarai-3381054.html> (access on 21 august).
49. Dewan, A.; Kiselev, G.; Botje, D. Diurnal and Seasonal Trends and Associated Determinants of Surface Urban Heat Islands in Large Bangladesh Cities. *Applied Geography* **2021**, *135*, 102533, doi:10.1016/j.apgeog.2021.102533.
50. Aguiar, L. F. M. C.; Silva, M. V. C. da; Gandu, A. W.; Rocha, C. A.; Cavalcante, R. M. Caracterização de Cânions Urbanos e seus Efeitos Climáticos em Área com Intenso Processo de Verticalização na Cidade de Fortaleza, Ceará. *Revista Bras. De Geo. Fis.* **2017**, *10*, 1046–1058.
51. Sharma, R.; Pradhan, L.; Kumari, M.; Bhattacharya, P. Assessing Urban Heat Islands and Thermal Comfort in Noida City Using Geospatial Technology. *Urban Climate* **2021**, *35*, 100751, doi:10.1016/j.uclim.2020.100751.
52. Mandelmlch, M.; Ferenz, M.; Mandelmlch, N.; Potchter, O. Urban Spatial Patterns and Heat Exposure in the Mediterranean City of Tel Aviv. *Atmosphere* **2020**, *11*, 963, doi:10.3390/atmos11090963.
53. Aslan, N.; Koc-San, D. The Use of Land Cover Indices for Rapid Surface Urban Heat Island Detection from Multi-Temporal Landsat Imageries. *IJGI* **2021**, *10*, 416, doi:10.3390/ijgi10060416.
54. Geletič, J.; Lehnert, M.; Dobrovolný, P. Land Surface Temperature Differences within Local Climate Zones, Based on Two Central European Cities. *Remote Sensing* **2016**, *8*, 788, doi:10.3390/rs8100788.
55. Badaro-Saliba, N.; Adjizian-Gerard, J.; Zaarour, R.; Najjar, G. LCZ Scheme for Assessing Urban Heat Island Intensity in a Complex Urban Area (Beirut, Lebanon). *Urban Climate* **2021**, *37*, 100846, doi:10.1016/j.uclim.2021.100846.
56. Bartesaghi Koc, C.; Osmond, P.; Peters, A.; Irger, M. Understanding Land Surface Temperature Differences of Local Climate Zones Based on Airborne Remote Sensing Data. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing* **2018**, *11*, 2724–2730, doi:10.1109/JSTARS.2018.2815004.

57. Zhao, Z.; Sharifi, A.; Dong, X.; Shen, L.; He, B.-J. Spatial Variability and Temporal Heterogeneity of Surface Urban Heat Island Patterns and the Suitability of Local Climate Zones for Land Surface Temperature Characterization. *Remote Sensing* **2021**, *13*, 4338, doi:10.3390/rs13214338.