

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

Gabriel Amoretti Franco

**Análise espaço-temporal do campo térmico superficial de Porto Alegre  
utilizando o Google Earth Engine**

Orientadores: Guilherme Garcia de Oliveira e Eliseu José Weber

Porto Alegre

2024

Gabriel Amoretti Franco

**Análise espaço-temporal do campo térmico superficial de Porto Alegre  
utilizando o Google Earth Engine**

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. Guilherme Garcia de Oliveira

**Coorientador:** Prof. Dr. Eliseu José Weber

PORTO ALEGRE

2024

### CIP - Catalogação na Publicação

Franco, Gabriel Amoretti

Análise espaço-temporal do campo térmico superficial de Porto Alegre utilizando o Google Earth Engine / Gabriel Amoretti Franco. -- 2024.

83 f.

Orientador: Guilherme Garcia de Oliveira.

Coorientador: Eliseu José Weber.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Campo térmico. 2. Google Earth Engine. 3. Porto Alegre. 4. Temperatura Superficial. 5. Série Temporal. I. Oliveira, Guilherme Garcia de, orient. II. Weber, Eliseu José, coorient. III. Título.

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**


**DISSERTAÇÃO**

Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de


**MESTRE EM SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO**

Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR)  
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM)  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
Porto Alegre, RS, Brasil.


Aprovada em: 08/04/2024.  
Pela Banca Examinadora:

 Documento assinado digitalmente  
**GUILHERME GARCIA DE OLIVEIRA**  
Data: 22/04/2024 08:38:00-0000  
Verifique em <https://validar.dig.gov.br>


Prof. Dr. Guilherme Garcia de Oliveira  
Orientador

 Documento assinado digitalmente  
**ELISEU JOSÉ WEBER**  
Data: 22/04/2024 17:33:00-0000  
Verifique em <https://validar.dig.gov.br>


Prof. Dr. Eliseu José Weber  
Coorientador

 Documento assinado digitalmente  
**DENISE CYBIS FONTANA**  
Data: 24/04/2024 10:30:00-0000  
Verifique em <https://validar.dig.gov.br>

Dra. Denise Cybis Fontana  
(PPGSR/UFRGS)

 Documento assinado digitalmente  
**DEBORA REGINA ROBERTI**  
Data: 08/04/2024 15:36:19-0000  
Verifique em <https://validar.dig.gov.br>

Debora Regina Roberti  
(UFSM)

 Documento assinado digitalmente  
**HEINRICH HASENACK**  
Data: 20/04/2024 08:12:13-0000  
Verifique em <https://validar.dig.gov.br>

Dr. Heinrich Hasenack  
(UFRGS)

Homologada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.  
Por:

Coordenador(a) do Programa de Pós-Graduação  
em Sensoriamento Remoto

Observação: Esta Ata não pode ser considerada como instrumento final do processo de concessão de título ao aluno.

Dedico este trabalho a Clicia, a pessoa  
que tornou ele possível do início ao fim.

## **AGRADECIMENTOS**

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de pesquisa.

Ao meu orientador Guilherme, que além de fazer parte crucial em minha formação entendeu minhas dificuldades durante o percurso.

Ao meu coorientador Eliseu que sempre me direcionou em minhas pesquisas e trabalhos acadêmicos.

Aos meus pais pelo incentivo à educação que sempre me deram.

À Clicia, minha namorada que me apoiou durante todo o processo indo da inscrição a elaboração deste trabalho.

Tire o seu sorriso do caminho  
Que eu quero passar com a minha dor  
Nelson Cavaquinho

## RESUMO

As consequências das mudanças climáticas em curso e dos eventos de temperaturas extremas colocam em risco as populações de grandes capitais, especialmente as vulneráveis economicamente. Tendo isso em vista, a compreensão do comportamento térmico do município de Porto Alegre ao longo da história é fundamental para servir de base para políticas públicas que visam um novo modo de planejamento urbano. Esta dissertação utiliza a plataforma de processamento *Google Earth Engine* e a série histórica de imagens *Landsat 5* e *8*, compreendendo o período de 1984 a 2022, com o objetivo de analisar o comportamento do campo térmico superficial do município de Porto Alegre, utilizando o repositório de imagens *Landsat 5* e *8*. A temperatura superficial (LST) foi correlacionada a partir da correção linear de Pearson com dados de altimetria, distância euclidiana de áreas verdes e corpos hídricos, buscando relações entre essas variáveis e a atenuação de temperatura em seu entorno. Os resultados mostram uma correlação de Pearson com valores próximos de zero para hidrografia (0), áreas verdes (-0,01) e altimetria (0,02), indicando uma baixa correlação com a LST, evidenciando a dificuldade de verificar o efeito do entorno nos dados obtidos por sensoriamento remoto. Outro foco de análise foram as ilhas de calor, categorizadas por limiares de temperatura pré-definidos em relação à média de temperatura da área de análise, sendo o limiar inferior a  $-1,5^{\circ}\text{C}$  para áreas frescas e superior a  $+1,5^{\circ}\text{C}$  para áreas quentes. Baseando-se nisso, foi desenvolvido o índice IAF (Índice de Alteração de Frequência), que analisa o comportamento das frequências comparando a alteração em dois períodos da série histórica. O IAF revelou tendências importantes na dinâmica espacial do município, com a região central de Porto Alegre estável na dinâmica térmica e maiores alterações observadas no nordeste de Porto Alegre, como os bairros Sarandi e Mario Quintana, e ao sul, no aglomerado urbano do bairro Restinga. Outra questão avaliada neste trabalho foi a correlação entre temperatura superficial e variáveis socioeconômicas dos setores censitários, utilizando a LST e dados censitários de 2000 e 2010. Foi utilizado o índice de autocorrelação espacial de Moran para analisar a dependência espacial de variáveis de população absoluta, renda e gênero. Por meio do índice de Moran e mapas LISA, foi desenvolvida uma regionalização térmica do município com base na LST média de cada setor censitário.

**Palavras-chave:** LST. GEE. Campo térmico.



## ABSTRACT

The consequences of ongoing climate change and extreme temperature events endanger the populations of major cities, especially those economically vulnerable. With this in mind, understanding the thermal behavior of Porto Alegre municipality throughout history is crucial to serve as a foundation for public policies aiming for a new mode of urban planning. This dissertation utilizes the Google Earth Engine processing platform and the historical series of Landsat 5 and 8 images, spanning from 1984 to 2022, with the objective of analyzing the behavior of the surface thermal field of Porto Alegre municipality, using the Landsat 5 and 8 image repository. Surface temperature (LST) was correlated through Pearson's linear correction with altimetry data, Euclidean distance from green areas and water bodies, seeking relationships between these variables and temperature attenuation in their surroundings. Results show a Pearson correlation with values close to zero for hydrography (0), green areas (-0.01), and altimetry (0.02), indicating a low correlation with LST, highlighting the difficulty of verifying the surrounding effect on remotely sensed data. Another focus of analysis was heat islands, categorized by predefined temperature thresholds in relation to the average temperature of the analysis area, with the lower threshold being 1.5°C for cool areas and the upper threshold being 1.5°C for hot areas. Based on this, the Frequency Alteration Index (FAI) was developed, which analyzes frequency behavior by comparing changes in two periods of the historical series. FAI revealed significant trends in the spatial dynamics of the municipality, with the central region of Porto Alegre stable in thermal dynamics and greater alterations observed in the northeast of Porto Alegre, such as the Sarandi and Mario Quintana neighborhoods, and in the south, in the urban agglomeration of the Restinga neighborhood. Another aspect evaluated in this work was the correlation between surface temperature and socioeconomic variables of census tracts, using LST and census data from 2000 and 2010. We used the Moran spatial autocorrelation index to analyze the spatial dependence of absolute population, income, and gender variables. Through the Moran index and LISA maps, a thermal regionalization of the municipality was developed based on the average LST of each census tract.

**Keywords:** LST. GEE. Thermal field.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comprimento de onda das bandas termais do Landsat 5 e 8. ....	20
Figura 2 – Fluxograma da metodologia da dissertação .....	24
Figura 3 - Mapa da localização de Porto Alegre, RS, Brasil.....	32
Figura 4 - Fluxograma da metodologia do Artigo 1 .....	33
Figura 5 - temperatura de superfície média mensal na área de estudo no período de 1984 a 2022, Porto Alegre/RS .....	39
Figura 6 - Mapas da temperatura superficial mensal média na série temporal de 1984 a 2022 no município de Porto Alegre, RS. ....	40
Figura 7 - Média da Temperatura Superficial por Data de Captação no Município de Porto Alegre 1984-2022.....	41
Figura 8 - Mapa e gráficos dos perfis térmicos dos anos de 1985, 2002 e 2022, Porto Alegre/RS.....	43
Figura 9 - Mapas do desvio da média de temperatura superficial dos anos 1985, 2002 e 2022.....	44
Figura 10 - Mapa do comportamento espacial da supressão de vegetação na série histórica.....	45
Figura 11 - Mapas de distância euclidiana das áreas verdes dos anos de 1985 e 2022 e hidrografia. ....	46
Figura 12 - Mapas de frequência de frescor e calor. ....	47
Figura 13 - Mapa do índice de alteração na frequência térmica comparando dois períodos: 1984 a 2006 e 2007 a 2022. ....	48
Figura 14 - Alteração na frequência de calor (Região Central).....	49
Figura 15 - Alteração na frequência de calor (Bairro Praia de Belas). ....	49
Figura 16 - Alteração na frequência de calor (Bairro Jardim Europa). ....	50
Figura 17 - Alteração na frequência de calor (Bairro Anchieta). ....	50
Figura 18 - Alteração na frequência de calor (Bairro Mario Quintana). ....	51
Figura 19 - Alteração na frequência de calor (Bairro Sarandi).....	51
Figura 20 - Alteração na frequência de calor (Bairro Restinga).....	51
Figura 21 - Mapa de Localização de Porto Alegre/RS.....	63
Figura 22 - Fluxograma de metodologia Artigo 2 .....	64
Figura 23 - Mapa de Temperatura superficial média dos anos de 1997 a 2003 e 2007 a 2013 por setor no município de Porto Alegre.....	68

Figura 24 - Diagrama de dispersão de Moran das variáveis de razão sexual, renda, população absoluta e temperatura dos censos de 2000 e 2010 do município de Porto Alegre/RS.....	70
Figura 25 - Mapa LISA da temperatura média por setor do censo 2010 .....	71
Figura 26 - Mapa LISA da temperatura média por setor do censo 2000 .....	71
Figura 27 - Mapa de localização dos clusters 2000 .....	72
Figura 28 - Mapa de localização dos clusters 2010 .....	72

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificações de Ilhas de Calor.....	18
Quadro 2 - correlação da temperatura com as variáveis de renda, razão de sexo e população no município de Porto Alegre/RS .....	69

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

GEE - Google Earth Engine TIRS - Thermal Infrared Sensor

TM - Thematic Mapper

Etm+ - Enhanced Thematic Mapper Plus

LISA - Local Indicators Of Spatial Association

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index DN - Digital Number

NC - Nível de Cinza

SR - Surface Reflectance

TOA - Top of Atmosphere (TOA) Reflectance USGS - United States Geological Survey

## Sumário

1 INTRODUÇÃO .....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	17
2.1 Clima urbano .....	17
2.2 Sensoriamento remoto termal .....	20
2.3 Google earth engine .....	22
3 METODOLOGIA .....	24
3.1 Primeiro artigo: contextualização e relação com a dissertação. ....	25
3.2 Segundo artigo: contextualização e relação com a dissertação .....	25
4 ARTIGO 1: ANÁLISE DO CAMPO TÉRMICO SUPERFICIAL E FREQUÊNCIA DE ILHAS DE CALOR E FRESCOR NO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE/RS .....	27
4.1 Introdução .....	27
4.2 Área de estudo .....	31
4.3 Metodologia .....	32
4.3.1 Dados e programas.....	33
4.3.2 Estimativa da temperatura da superfície terrestre.....	34
4.3.3 Processamentos dos dados e índices térmicos .....	36
4.3.4 Análise espacial da temperatura .....	37
4.4 Resultados .....	39
4.4.1 Médias históricas da temperatura superficial absoluta. ....	39
4.4.2 Temperatura superficial na série histórica.....	41
4.4.3 Caracterização do perfil térmico do município de Porto Alegre na série histórica. ....	42
4.4.4 Desvio da temperatura superficial média .....	43
4.4.5 Dinâmica de áreas verdes no município .....	44
4.4.6 Relação entre variáveis de distância euclidiana dos corpos d'água e áreas verdes, altimetria e temperatura .....	45
4.4.7 Mapa frequência de frescor e calor .....	46

4.4.8 Alteração na frequência comparando as séries de 1984 a 2006 e 2007 a 2022.....	47
4.5 Discussão.....	52
4.6 Conclusão .....	53
Referências.....	55
5 ARTIGO 2: REGIONALIZAÇÃO TÉRMICA A PARTIR DA TEMPERATURA SUPERFICIAL E SUA RELAÇÃO COM OS SETORES CENSITÁRIOS DE PORTO ALEGRE/RS.....	59
5.1 Introdução .....	59
5.2 Área de estudo .....	62
5.3 Metodologia.....	63
5.3.1 Dados e programas.....	64
5.3.2 Estimativa de temperatura superficial .....	65
5.3.3 Índice de Moran e mapas LISA .....	66
5.4 Resultados .....	68
5.5 Discussão.....	72
5.6 Conclusão .....	73
Referências.....	74
6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÃO FINAL.....	78
7 FINANCIAMENTO.....	80
REFERÊNCIAS .....	81

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a urbanização tem desencadeado um fenômeno conhecido como 'ilha de calor urbana', caracterizado pelo aumento das temperaturas nas áreas urbanas em comparação com as regiões circundantes. Esse aumento térmico é resultado de uma combinação complexa de fatores, como a cobertura do solo, a morfologia urbana e a poluição atmosférica. Essa trata-se de uma tendência particularmente pronunciada em países em desenvolvimento, onde a rápida urbanização é acompanhada por uma série de problemas socioeconômicos, como déficit habitacional e falta de infraestrutura básica.

A presença de vegetação nas áreas urbanas desempenha um papel fundamental na regulação das condições térmicas, agindo como um amortecedor contra o calor excessivo. No entanto, a substituição crescente da vegetação por materiais como asfalto e concreto está contribuindo para a intensificação das ilhas de calor e para o agravamento dos problemas associados ao clima urbano. Esse desequilíbrio térmico tem causado sérias implicações para a saúde pública, especialmente para grupos vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas com condições médicas pré-existentes.

Para entender e mitigar os efeitos das ilhas de calor urbana, o sensoriamento remoto se tornou uma ferramenta valiosa. Através do uso de satélites equipados com sensores térmicos, como os presentes nos satélites *Landsat*, é possível monitorar e analisar as condições térmicas das áreas urbanas em larga escala e ao longo do tempo. Isso permite uma compreensão mais completa dos padrões climáticos urbanos e fornece dados essenciais para a formulação de políticas e intervenções eficazes.

Uma plataforma especialmente relevante para análises de sensoriamento remoto em larga escala é o *Google Earth Engine* (GEE). Com sua capacidade de processamento em nuvem e acesso a séries temporais de imagens de satélite, o GEE possibilita a realização de estudos detalhados sobre o clima urbano e suas mudanças ao longo do tempo. Essas informações são essenciais para o planejamento urbano sustentável e para a implementação de medidas de adaptação e mitigação dos impactos das ilhas de calor urbana.



Assim, o entendimento e a mitigação das ilhas de calor urbana são fundamentais para promover ambientes urbanos mais saudáveis e sustentáveis. A integração de dados de sensoriamento remoto, juntamente com políticas públicas conscientes e ações de planejamento urbano, é essencial para enfrentar os desafios impostos pelo aumento das temperaturas nas áreas urbanas e para garantir o bem-estar da população

A partir de séries históricas do campo térmico, é possível analisar como as diversas coberturas da superfície se expressam em diferentes condições e composições. Por meio do tratamento dos dados resultantes dessa pesquisa, será possível, por exemplo, estudar se os parques públicos arborizados auxiliam na atenuação da temperatura e se configuram como um evento de ilha de frescor dentro da cidade de Porto Alegre. Outra perspectiva que pode ser adotada é a análise de quais regiões da cidade têm as melhores condições de temperatura na superfície.

O problema de pesquisa abordado nesta dissertação pode ser definido pelo seguinte questionamento: É possível realizar uma análise espaço-temporal do comportamento do campo térmico a partir de séries históricas de imagens Landsat? A hipótese a ser testada é a de que os produtos e funcionalidades das novas geotecnologias aprofundam o processo de análise espaço-temporal do campo térmico urbano, especialmente, se forem considerados os diversos estudos que utilizam plataformas de computação em nuvem para processar séries temporais para outras finalidades.

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o comportamento do campo térmico superficial do município de Porto Alegre, utilizando o repositório de imagens *Landsat 5* e *8*. Os objetivos específicos são: 1) Analisar as ilhas de frescor presentes nesse campo térmico, identificando e investigando as áreas onde ocorre uma redução significativa da temperatura; 2) Analisar as frequências de variação térmica e compilar uma série temporal para visualizar as mudanças ao longo do tempo; 3) Analisar espacialmente a distribuição das variáveis de renda, população e gênero e sua correlação com índices térmicos; 4) Calcular a autocorrelação espacial a partir do índice de Moran em relação à temperatura superficial dos setores censitários e dos dados dos censos do IBGE de 2000 e 2010; 5) Produzir mapas LISA (Índice Local de

Associação Espacial), com o objetivo de criar uma regionalização para a temperatura superficial dos setores censitários.

A metodologia desta dissertação foi dividida em dois artigos científicos, sendo o primeiro deles intitulado de 'Análise do campo térmico superficial e frequência de ilhas de calor e frescor no município de Porto Alegre/RS' e o segundo intitulado de 'Regionalização Térmica a partir da Temperatura Superficial e sua Relação com os Setores Censitários de Porto Alegre/RS'.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Clima urbano

O processo de urbanização acarreta uma série de consequências na alteração do espaço natural e rural, sendo uma delas a formação de um novo sistema microclimático com diversas peculiaridades. Howard (1819) observou que a temperatura média na cidade de Londres era mais alta do que nas áreas rurais circundantes, evidenciando assim o fenômeno da ilha de calor urbana pela primeira vez. As ilhas de calor são caracterizadas como anomalias térmicas resultantes das mudanças na cobertura de uma área. Essas mudanças incluem a substituição da cobertura vegetal natural, que possui alta evapotranspiração e baixa retenção de calor, por coberturas artificiais, como concreto, asfalto, telhas, entre outros, que têm altos níveis de retenção de calor. Isso resulta na formação de um campo térmico urbano, que se expande acompanhando a expansão urbana e se intensifica com a verticalização e adensamento das edificações. Assim, a temperatura em superfície é produto das alterações espaciais e sociais dentro do espaço urbano, mudanças que acabam resultando na formação de um campo térmico urbano, que se expande acompanhando a expansão urbana e se intensifica com a verticalização e adensamento das edificações. Dessa forma, a temperatura em superfície é produto das alterações espaciais e sociais dentro do espaço urbano.

Segundo Oke (2003), as principais causas das ilhas de calor são a influência da cobertura superficial (redução na evapotranspiração considerando as mudanças de cobertura), a morfologia urbana (múltiplas reflexões entre as estruturas urbanas e a redução na velocidade do vento), a poluição do ar (maior retenção de radiação de ondas longas, ou radiação térmica), e a emissão de calor antropogênico. Estevão (2016) destaca que existem diversas classificações que dividem as ilhas de calor em subdivisões, sendo as principais apresentadas no Quadro 1. Nesta dissertação, o foco central foi o conceito de ilha de calor de superfície, presentes em todas as classificações apresentadas.

Quadro 1 - Classificações de Ilhas de Calor

Autor	Classificação
Oke (1987)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ilha de calor atmosférica inferior/superior;</li> <li>· Ilha de superfície.</li> </ul>
Alcoforado (2007)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ilha de calor superfície;</li> <li>· Ilha de calor da atmosfera inferior;</li> <li>· Ilha de calor da atmosfera superior.</li> </ul>
Arrau e Peña (2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ilha de calor de superfície;</li> <li>· Ilha de calor micro-urbana;</li> <li>· Ilha de calor negativa</li> </ul>
Fialho (2008)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ilhas de calor atmosférica;</li> <li>· Ilhas de calor Vertical;</li> <li>· Ilha de calor de Superfície.</li> </ul>

Fonte: ESTEVÃO, 2016.

Muitas pesquisas têm se dedicado a estudar as características térmicas dos materiais de cobertura da superfície e sua influência no clima urbano, levando em consideração seu desempenho térmico nas edificações. Um consenso na literatura é que o uso de materiais altamente reflexivos, ou seja, com alta reflectância solar, melhora as condições térmicas no interior das edificações e contribuem para a eficiência energética (MUNIZ-GAAL et al., 2018; SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011).

Barros (2016) destaca a importância das discussões sobre a relação entre clima urbano e saúde pública, considerando que o aumento significativo da temperatura dificulta o bom funcionamento do corpo humano, representando um desafio para a adaptação humana. Isso ocorre porque a espécie humana é heterotérmica e depende do seu sistema termorregulador para sobreviver. Eventos de temperatura extrema sobrecarregam o organismo, afetando especialmente o sistema cardiovascular e respiratório, principalmente em grupos mais vulneráveis, como crianças de até 4 anos, idosos, moradores de rua e pacientes em estado clínico grave. Portanto, as ilhas de calor urbanas agravam o estresse térmico, tornando a população urbana mais vulnerável.

Os riscos associados ao clima urbano apresentam grandes disparidades entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. Nos países em desenvolvimento, há uma série de desafios, incluindo déficit habitacional, desigualdades no acesso ao saneamento básico, problemas de drenagem urbana, ocupação de áreas de risco e baixa qualidade dos materiais de construção, especialmente nas habitações precárias, o que deixa a população em extrema vulnerabilidade, principalmente os de baixa renda (BARROS, 2016).

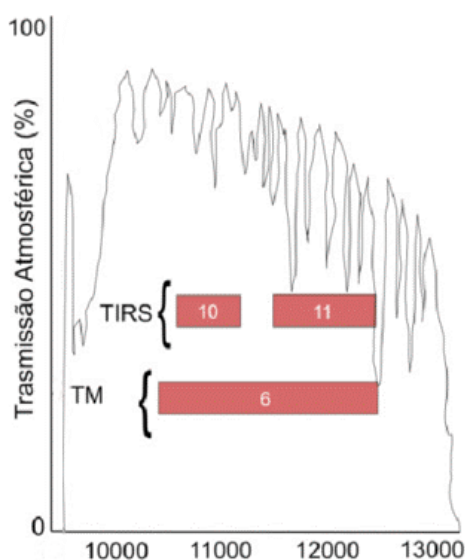
Os estudos relacionados ao clima urbano têm o potencial de contribuir significativamente para a melhoria da qualidade de vida e das questões ambientais no ambiente urbano. A vegetação dentro do contexto do campo térmico urbano desempenha um papel crucial na atenuação das condições térmicas, agindo como um regulador térmico em nível microclimático. Dessa forma, ela proporciona um maior conforto térmico para a população. É evidente que a evapotranspiração das coberturas vegetais é um processo essencial para a redução das temperaturas (ALCOFORADO, 2008).

Barros (2016) explorou a relação entre a ilha de calor urbana, o uso e cobertura do solo, e o balanço de energia, com o objetivo de avaliar o campo térmico nos parques públicos de lazer utilizando imagens do *Landsat 5*. O estudo de De Zorzi et al. (2017) analisou a influência dos parques públicos vegetados no município de Porto Alegre no controle térmico de suas proximidades. Os autores investigaram grandes parques verdes e seu entorno para validar sua influência térmica no ambiente urbano circundante. Os resultados revelaram que a área de influência do parque está relacionada a diversos fatores, incluindo a quantidade e características das árvores, a presença de superfícies de água e fatores externos ao parque, como as características morfológicas do entorno. O Parque Redenção destacou-se como o que exerceu maior influência sobre a temperatura, especialmente devido à sua maior área total, maior superfície de água e uma boa porcentagem de cobertura arbórea. O estudo confirmou a importância dos espaços verdes no meio urbano. A análise do campo térmico superficial por sensoriamento remoto possibilitou a confirmação do efeito de oásis proporcionado pelos parques públicos (ZORZI, 2016).

## 2.2 Sensoriamento remoto termal

Os sensores térmicos captam a energia eletromagnética infravermelha termal na faixa de comprimento de onda de 10 a 14 micrômetros, como ilustrado na Figura 1, dos materiais presentes na superfície terrestre. Em outras palavras, cada material possui uma resposta térmica distinta de acordo com sua composição física e química. Esse tipo de comprimento de onda foi descoberto por Herschel (1800). O autor relatou o experimento no qual mediu a temperatura dos diferentes comprimentos de onda divididos por um prisma, e observou que eles apresentavam temperaturas diversas. Foi assim que se descobriu a fração do infravermelho termal no espectro da luz. Embora o infravermelho termal não seja visível para o ser humano, que só é sensível à luz visível na faixa de 0,4 a 0,7 micrômetros, é possível sentir o comprimento de onda infravermelho térmico pelo tato, como o calor proveniente de uma fonte de luz, por exemplo (JENSEN, 2009).

Figura 1 – Comprimento de onda das bandas termais do Landsat 5 e 8.



Fonte: Adaptado de GUIRRA et al., 2020.

O sensoriamento remoto tem sido amplamente empregado em pesquisas sobre as condições térmicas do ambiente urbano, especialmente das ilhas de calor. Diversos sensores conseguem detectar a radiação infravermelha termal emitida pela superfície terrestre, permitindo inferências sobre suas características térmicas. Esses sensores são geralmente embarcados em satélites. Exemplos incluem o *Ikonos*, *Modis*, *Aster* e a série de satélites *Landsat* (5, 7, 8 e 9), todos equipados com bandas

térmicas. Por meio das bandas térmicas desses sensores, pode-se obter a temperatura radiante de diferentes alvos e correlacioná-la com características de uso e cobertura da terra, derivadas desses sensores ou de outros satélites (ROMERO et al., 2019).

O uso de SIG (Sistemas de Informação Geográfica) é crucial para incorporar o comportamento climático em ambientes urbanos às questões de gestão pública, com o intuito de lidar com as iminentes alterações climáticas e buscar o bem-estar e o conforto térmico da população. Os sensores embarcados em satélites podem capturar as partes da radiação solar refletida e emitida pelos alvos que compõem a cena. Essas informações são convertidas em matrizes, onde cada tonalidade de cinza corresponde a um valor de radiância refletida ou emitida, que posteriormente pode ser convertido em temperatura (ROMERO et al., 2019).

Atualmente, o interesse e o número de pesquisas que investigam a anomalia térmica conhecida como ilha de calor têm aumentado. Barbosa e Vecchia (2009) examinaram a ilha de calor urbana no município de São Carlos, utilizando imagens do *Landsat 7 ETM+*. Estevão (2016) conduziu estudos relacionando índices de vegetação e ilhas de calor a partir de sensores *Landsat 5* e *8*. Amorim (2017) analisou as ilhas de calor superficiais em cidades de pequeno e médio porte em ambiente tropical por meio de sensoriamento remoto. O programa *Landsat* está em operação desde 1972 e, até o presente momento, acumula um acervo com mais de 8 milhões de imagens da superfície terrestre, distribuídas gratuitamente pelo site do USGS com o objetivo de fomentar pesquisas em gestão de recursos naturais e sensoriamento remoto em escala global. Existem milhares de artigos de pesquisa revisados que utilizaram dados do sensor *Landsat*, aplicáveis em diversas áreas. O programa *Landsat* oferece um fluxo contínuo de mais de 50 anos de imagens, tornando-o o melhor sensor para estudos de séries históricas. Os satélites *Landsat 5*, *7*, *8* e *9* possuem bandas térmicas com pixels reamostrados em 30 metros, constituindo uma fonte de dados que pode ser explorada por vários métodos de análise de mudanças na escala climática e ambiental, continuando a ser desenvolvidos até os dias de hoje (MOTA et al., 2020).

Desde 2008, o número e a complexidade dos estudos com dados *Landsat* aumentaram e se tornaram mais complexos com o advento da análise de *Big Data* e

do processamento em nuvem. Utilizando plataformas de computação em nuvem e outras ferramentas de análise robustas, os pesquisadores podem buscar padrões e mudanças com rapidez e precisão ao longo de períodos de décadas ou em áreas com grandes dimensões espaciais. O repositório *Landsat* proporciona aos pesquisadores a capacidade de investigar questões sobre nosso mundo em mudança. Com acesso a este recurso singular, é possível monitorar nossos recursos naturais em escalas locais e globais, capacitando gestores para tomarem decisões informadas para o futuro. Entre as diferentes bandas espectrais dos satélites *Landsat*, as mais importantes para o presente projeto são as dos sensores TM (*Thematic Mapper*) e TIRS (*Thermal Infra-Red Sensor*), amplamente utilizadas em estudos relacionados ao clima urbano devido à sua capacidade de capturar radiação eletromagnética na faixa do infravermelho termal.

O uso de dados *Landsat* em análises de temperatura superficial apresenta várias limitações. Além da dificuldade em considerar a influência do entorno na temperatura, devido às premissas físicas inerentes a esse tipo de análise, outra dificuldade é o tamanho do pixel de 30 metros, que pode não capturar variações mais sutis na temperatura superficial. Outras limitações incluem a resolução temporal relativamente baixa, com imagens adquiridas apenas a cada 16 dias, e a cobertura de nuvens, que pode obstruir a visão da superfície terrestre e introduzir lacunas nos dados. Especificamente para o *Landsat 7*, há ainda o problema do *Scan Line Corrector* (SLC) não funcional desde 2003, que resulta em falhas nas imagens e na necessidade de técnicas de correção e interpolação para preencher essas lacunas (SCARAMUZZA, 2005).

### **2.3 Google earth engine**

Segundo Ganem (2017), o *Google Earth Engine* (GEE) é uma plataforma PaaS (*Platform as a Service*) baseada em *JavaScript* e *Python*. Esse tipo de plataforma PaaS é um ambiente que realiza suas operações na nuvem, onde é possível testar, executar e gerenciar diversas aplicações. Por utilizar o multiprocessamento paralelo em nuvem, tem a capacidade de realizar análises com uma grande quantidade de dados, abrangendo análises com *Petabytes* de dados. A plataforma reúne meio século de imagens do programa *Landsat*, além de uma série de dados de outros satélites como *ASTER*, *MODIS*, *NOAA*, entre outros produtos. A ferramenta atualmente é



gratuita para fins educativos e de pesquisa acadêmica. O GEE ainda conta com uma série de APIs (*Application Programming Interface*), que são rotinas de programação prontas que podem ser acessadas por plataformas *web* por meio de aplicações, sendo disponibilizadas na plataforma *GitHub* para o GEE.

O GEE capacita cientistas, pesquisadores e nações a analisarem grandes conjuntos de dados de forma eficiente para detecção de mudanças, mapeamento de tendências e quantificação de recursos da superfície terrestre. O GEE tem sido fundamental para preencher lacunas de dados causadas por nuvens, utilizando modelagem impulsionada pelo clima e produzindo dados em múltiplas escalas, resultando em uma classificação mais precisa. Além disso, a disponibilidade de dados e processamento do GEE democratizou a análise geoespacial, permitindo que pesquisadores em regiões com poucos recursos acessem as mesmas capacidades analíticas daqueles em nações mais avançadas (MUTANGA, 2019).

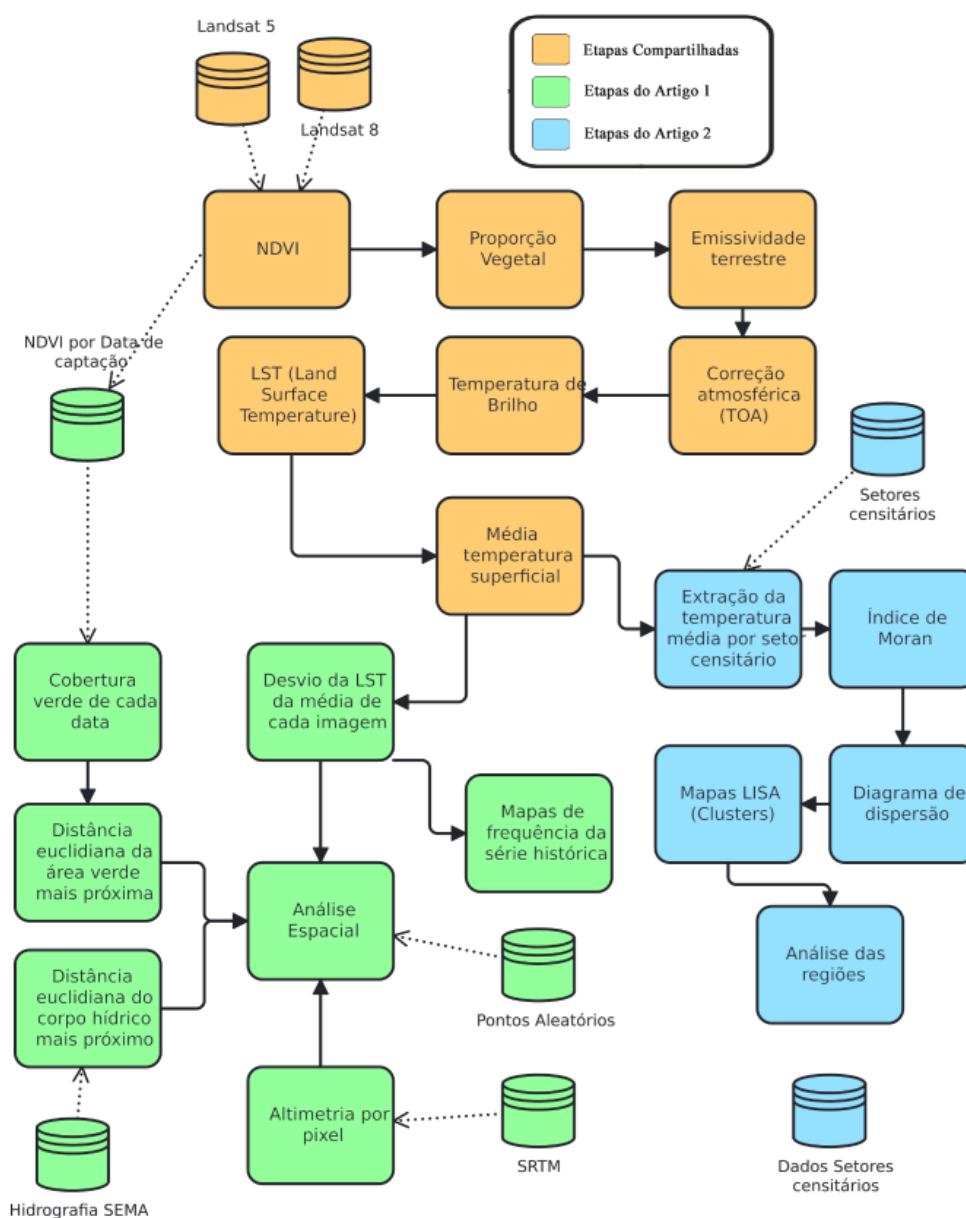
No estudo de Zhao et al. (2021), foi realizada uma revisão sistemática do uso do GEE em pesquisas acadêmicas, abrangendo 565 artigos que referenciam o GEE, publicados em 121 revistas. As mais relevantes foram destacadas, como a *Remote Sensing*, *Remote Sensing of Environment* e *The ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. As análises revelaram que os artigos sobre o GEE abrangem uma ampla gama de áreas de pesquisa, sendo empregado principalmente para análise de big data e séries temporais. A maioria das aplicações do GEE está concentrada em alguns países, principalmente nos Estados Unidos, China e Reino Unido.

As pesquisas com o uso do GEE têm se tornado mais complexas e abrangentes, abordando diversas temáticas. No estudo de Ganem (2017) discute-se a relevância do GEE para a classificação da cobertura do solo na Caatinga a partir de imagens do *Landsat 8*, com e sem correção atmosférica. Mota et al. (2020) investigam como identificar e avaliar plataformas que possam auxiliar na análise de dados de recursos hídricos. Vale (2019) conduziu uma análise da dinâmica do uso e cobertura da terra em áreas desflorestadas utilizando o GEE. Em seu trabalho, Guerra et al. (2017) realizam um mapeamento automático da expansão da agricultura anual no MATOPIBA entre 2002 e 2015, utilizando a plataforma GEE.

### 3 METODOLOGIA

Com o objetivo de exemplificar a organização das etapas presentes no capítulo de metodologia, foi desenvolvido um fluxograma que contém todas as tarefas de maior relevância, as bases de dados necessárias e os produtos resultantes deste projeto, conforme representado na Figura 2. O fluxograma apresenta as etapas metodológicas compartilhadas pelos artigos, representadas pela cor laranja, bem como as etapas específicas de cada um dos artigos, sendo o Artigo 1 representado pela cor verde e o Artigo 2 representado pela cor azul. Essas etapas serão detalhadas posteriormente.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia da dissertação



Fonte: Elaboração do autor.

### **3.1 Primeiro artigo: contextualização e relação com a dissertação.**

O primeiro artigo da dissertação, intitulado "Análise do campo térmico superficial e frequência de ilhas de calor e frescor no município de Porto Alegre/RS", representa uma contribuição significativa para a compreensão do microclima urbano do município. Através da análise espaço-temporal do campo térmico superficial, foram investigados, os padrões e variações de temperatura na região, destacando a variação sazonal das médias de temperatura e ressaltando a necessidade de considerar as condições climáticas sazonais na análise do campo térmico urbano.

Ao longo do período de análise entre os anos de 1984 e 2022, o estudo revelou uma redução significativa na cobertura vegetal urbana, apontando para mudanças substanciais na paisagem de Porto Alegre. Essa transformação na cobertura vegetal pode ter repercussões no microclima local, ressaltando a importância de abordagens integradas para compreender a dinâmica térmica na cidade. Os resultados obtidos também evidenciaram a complexidade das interações entre os elementos da paisagem urbana e a temperatura na superfície, destacando a necessidade de análises mais refinadas para compreender o campo térmico urbano em sua totalidade.

A análise dos resultados deste artigo forneceu informações relevantes para a compreensão do clima urbano e suas implicações no planejamento urbano. Embora os dados de temperatura superficial tenham mostrado limitações na captura da influência local de pixels individuais das massas d'água e áreas verdes circundantes, o índice de alteração na frequência emergiu como um indicador das mudanças temporais na série histórica de temperatura superficial. Esses achados contribuem para uma caracterização mais precisa das transformações no ambiente urbano ao longo do tempo, fornecendo subsídios importantes para futuras pesquisas e ações de planejamento urbano sustentável. O GEE atingiu as expectativas no processamento de dados térmicos para posterior análise, sendo um dos focos desta dissertação. O artigo completo está disponível no Apêndice A deste trabalho.

### **3.2 Segundo artigo: contextualização e relação com a dissertação**

O artigo 2 da dissertação, intitulado "Regionalização Térmica a partir da Temperatura Superficial e sua Relação com os Setores Censitários de Porto Alegre/RS", teve como objetivo analisar a regionalização térmica a partir da

temperatura superficial em Porto Alegre e sua relação com os setores censitários da cidade. Ao considerar a interação entre a temperatura superficial e as características dos setores censitários, o estudo busca compreender como a distribuição da população e as características urbanas influenciam o campo térmico superficial local. Essa abordagem integrada permite uma análise mais abrangente dos padrões térmicos na cidade e das variáveis que contribuem para a formação de microclimas distintos em diferentes áreas urbanas.

Neste artigo, o índice de Moran foi empregado como uma ferramenta fundamental para analisar a dependência espacial da temperatura superficial e outras variáveis socioeconômicas dos setores censitários. Esse índice permitiu avaliar se as variáveis apresentavam padrões de associação espacial significativos, indicando correlação direta, inversa ou ausência de relação espacial entre elas. Além disso, a utilização de mapas LISA (*Local Indicators of Spatial Association*) proporcionou a identificação de padrões locais de clusters, permitindo a visualização das áreas com valores similares e suas interações espaciais, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada da distribuição espacial das variáveis analisadas e suas implicações socioeconômicas na região estudada. A partir desses clusters, foi realizada uma regionalização térmica do município.

A regionalização térmica é um aspecto fundamental para o entendimento da dinâmica do clima urbano e suas variações espaciais. Ao investigar a relação entre a temperatura superficial e os setores censitários, o estudo contribui para a identificação de padrões térmicos específicos em diferentes regiões da cidade, fornecendo informações valiosas para o planejamento urbano e a gestão ambiental. A análise dessas relações permitiu uma melhor compreensão dos fatores que influenciam o microclima urbano, além da possibilidade de auxiliar na tomada de decisões para promover ambientes urbanos mais sustentáveis e resilientes às mudanças climáticas. É importante evidenciar o papel do GEE no processamento da série histórica de dados de temperatura de superfície, o que possibilitou a análise e regionalização do município.

## 4 ARTIGO 1: ANÁLISE DO CAMPO TÉRMICO SUPERFICIAL E FREQUÊNCIA DE ILHAS DE CALOR E FRESCOR NO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE/RS

**Resumo:** A alteração antrópica das coberturas superficiais terrestres resulta em alterações na dinâmica térmica da superfície. O caso mais alarmante dessas alterações ocorre em áreas urbanas, onde há a substituição de vegetação natural por materiais com alta capacidade de retenção de calor utilizados na construção civil. A partir dessa constatação, o presente estudo teve como objetivo realizar uma análise espacial e temporal do campo térmico superficial em Porto Alegre/RS, com ênfase no estudo da frequência de ilhas de frescor e calor. O período analisado compreendeu os anos de 1984 a 2022. O processamento da série temporal de imagens de satélite (*Landsat 5 e 8*) foi conduzido na nuvem, por meio do *Google Earth Engine (GEE)*. As variáveis de distância euclidiana foram correlacionadas com o desvio de temperatura de cada imagem e com a altimetria do município, utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson, a fim de investigar relações entre essas métricas espaciais e a temperatura superficial. Os resultados destacaram variações sazonais, com os meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) apresentando médias mais altas: 35,62 °C, 35,71 °C e 34,71 °C, e os meses de inverno (junho, julho e agosto) com médias mais baixas: 21,48 °C, 21,32 °C e 24,23 °C. A cobertura verde urbana também se mostrou relevante, com uma redução de 22,49% entre 1985 e 2022. A correlação de Pearson revelou valores próximos de zero para hidrografia (0), áreas verdes (-0,01) e altimetria (0,02). A baixa correlação em relação à distância das áreas verdes/hidrografia indica que não é possível verificar nos dados via sensoriamento remoto o efeito do entorno/vizinhança. A fim de analisar a dinâmica do campo térmico urbano, foi desenvolvido o IAF (Índice de Alteração de Frequência), buscando sintetizar as alterações espacialmente comparando dois períodos de análise.

**Palavras Chave:** Temperatura Superficial. Google Earth Engine. Série Temporal.

### 4.1 Introdução

O processo de urbanização provocou uma série de transformações nas características naturais do ambiente, inclusive mudanças na dinâmica climática. O clima urbano é composto por um conjunto de mosaicos de microclimas decorrentes

da heterogeneidade da cobertura do solo (HEAVISIDE *et al.*, 2017). O espaço urbano apresenta características particulares devido aos materiais utilizados na estrutura das cidades, como concreto, asfalto e metais. Quando esses materiais são amplamente empregados, eles exercem uma influência direta no clima original.

O principal fenômeno do clima urbano são as ilhas de calor, caracterizadas por apresentarem temperaturas mais elevadas do que os ambientes circunvizinhos. Esse fenômeno foi evidenciado pela primeira vez em 1833 por Luke Howard, referente ao clima urbano de Londres (HOWARD, 1833). Sendo assim, a forma de construção das cidades influencia significativamente o clima local, intensificando o desconforto térmico e causando problemas de saúde pública (OKE *et al.*, 2017). Além disso, outro fenômeno registrado em climas urbanos é conhecido como ilhas de frescor, áreas com temperaturas mais amenas, representando fragmentos dentro do mosaico do campo térmico urbano. Essas zonas frescas são geralmente compostas por áreas verdes e corpos hídricos, que atenuam a temperatura, uma vez que esses tipos de cobertura têm maior conversão da radiação solar incidente em calor latente e aumentam a umidade do ar (GERMANO, 2012).

No passado, esses fenômenos climáticos eram medidos *in situ* por instrumentos analógicos. A partir do advento das geotecnologias, em especial, do sensoriamento remoto, pesquisadores estão analisando sistematicamente as condições térmicas do ambiente urbano em grandes extensões de área (GERMANO, 2012; SOBRINO; IRAKULIS, 2020; ESTOQUE; MURAYAMA, 2017; BALEW; KORME, 2020; MASOUDI *et al.*, 2019). Existem diversos sensores que conseguem detectar a radiação infravermelha termal emitida pela superfície terrestre, o que possibilita inferências sobre as características térmicas da superfície após o devido processamento. Entre os sensores mais relevantes a bordo de satélites, é possível destacar os satélites Terra (MODIS), Aster (TIR), *Landsat 5* (Thematic Mapper - TM), *Landsat 7* (ETM+), *Landsat 8* (TIRS), *Landsat 9* (TIRS-2). Utilizando as bandas termais desses sensores é possível obter a temperatura radiante de diferentes alvos e relacioná-los com as características de uso e cobertura da terra (ROMERO *et al.*, 2019).

A partir de estudos recentes, as compreensões acerca das ilhas de calor urbanas estão sendo constantemente aprimoradas. Dentre esses estudos, destacam-

se as contribuições de Sobrino e Irakulis (2020), que compararam ilhas de calor urbana em 71 aglomerações urbanas ao redor do mundo utilizando dados do sensor SLSTR do satélite Sentinel-3, relacionando os resultados com índices provenientes do sensoriamento como o Urban Thermal Field Variation Index (UTFVI), também utilizado por Faisal et al. (2021) que relacionou os índices Normalized Difference Built-Up Index (NDBI) e o UTFVI a temperatura superficial captada por sensoriamento remoto. No trabalho de Estoque e Murayama (2017) e Mukherjee e Singh (2020) foi monitorado o comportamento de ilhas de calor utilizando uma série temporal baseada em dados *Landsat* 5 e 8.

Em relação aos métodos de captação da LST, os pesquisadores Sekertekin e Bonafoni (2020) compararam os principais algoritmos e modelos de emissividade para a estimativa da temperatura da superfície terrestre, utilizando os algoritmos, RTE (Radiative Transfer Equation), MWA (Mono-Window Algorithm), SWA (Split-Window Algorithm) e SCA (Single-Channel Algorithm). Outro estudo inovador no sensoriamento remoto termal foi o de Tian et al. (2023) onde foi realizada uma previsão da temperatura da superfície terrestre considerando os efeitos das mudanças futuras de uso de terra em cenários de mudanças climáticas. Esses estudos recentes fornecem uma visão abrangente dos avanços na caracterização das ilhas de calor urbanas, destacando a importância do monitoramento das mudanças de uso e cobertura da terra e da relação entre a temperatura da superfície terrestre e a paisagem urbana, muitas vezes dentro da perspectiva de análise de séries históricas.

No que corresponde aos estudos de ilhas de frescor urbanas, os avanços também são significativos. Diversos estudos relacionados às ilhas de frescor visam a análise da composição espacial dos parques verdes urbanos, levando em conta fatores como a importância da compreensão do microclima urbano em escala de bairro (ZHANG et al., 2017), a avaliação da estrutura espacial dos parques na mitigação da temperatura do ambiente térmico urbano (CHANG et al., 2007) e a influência das características do tipo de planta, densidade da copa e espécies com melhor desempenho no controle de temperatura (XIAO et al., 2018; RAKOTO et al., 2021). Outros estudos focam na influência do parque na temperatura e na capacidade de resfriamento de espaços verdes e corpos d'água (DE ZORZI et al., 2017; SUN et al., 2020). Esses estudos recentes, fornecem informações sobre a importância das

áreas verdes na configuração espacial do ambiente urbano na mitigação dos efeitos de aquecimento.

As plataformas computacionais de processamento em nuvem estão modificando a análise espaço-temporal no sensoriamento remoto devido a possibilidade de processamentos em larga escala. O GEE está sendo amplamente aplicado em pesquisas relacionadas ao sensoriamento remoto. Sendo na agricultura e manejo (ABUBAKAR et al., 2023; ZHAO et al., 2023). Ou estudo temporal de secas (TAHERI et al., 2023). Esses são apenas alguns exemplos da ampla gama de estudos que estão aproveitando as vantagens do GEE, demonstrando a versatilidade e a capacidade da plataforma para análise de dados geo-espaciais em larga escala, permitindo uma compreensão mais profunda de fenômenos complexos. Considerando os atuais avanços no sensoriamento remoto termal em conjunto com o uso de plataformas de processamento em nuvem, destaca-se os estudos de Ermida et al. (2020) e Wang et al. (2020), esses pesquisadores desenvolveram metodologias para a estimativa de temperatura em superfície a partir da série temporal *Landsat* com auxílio da plataforma Google Earth Engine.

Diante disso, considerando os extensos catálogos de imagens de satélite disponíveis e a possibilidade de processamento de séries temporais em nuvem pelo GEE, buscou-se investigar o potencial do sensoriamento remoto termal para uma análise espaço-temporal mais abrangente do campo térmico urbano. É necessário avaliar o papel de elementos urbanos, como áreas verdes e corpos d'água, embora seu efeito seja mais pronunciado e abrangente sobre a temperatura do ar devido à circulação e aos processos de mistura. Além disso, pretende-se analisar o comportamento térmico da superfície ao longo do tempo, compilando os dados térmicos da área de estudo por meio de uma metodologia de análise de frequências de ilhas de calor e de frescor.

Neste contexto, o objetivo principal é realizar uma análise espacial e temporal do campo térmico superficial em Porto Alegre/RS, com ênfase no estudo da frequência de ilhas de frescor e calor. Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidos dois objetivos específicos. O primeiro foi analisar as ilhas de frescor presentes no campo térmico superficial, identificando e investigando as áreas onde ocorre uma redução significativa da temperatura. O segundo objetivo específico foi

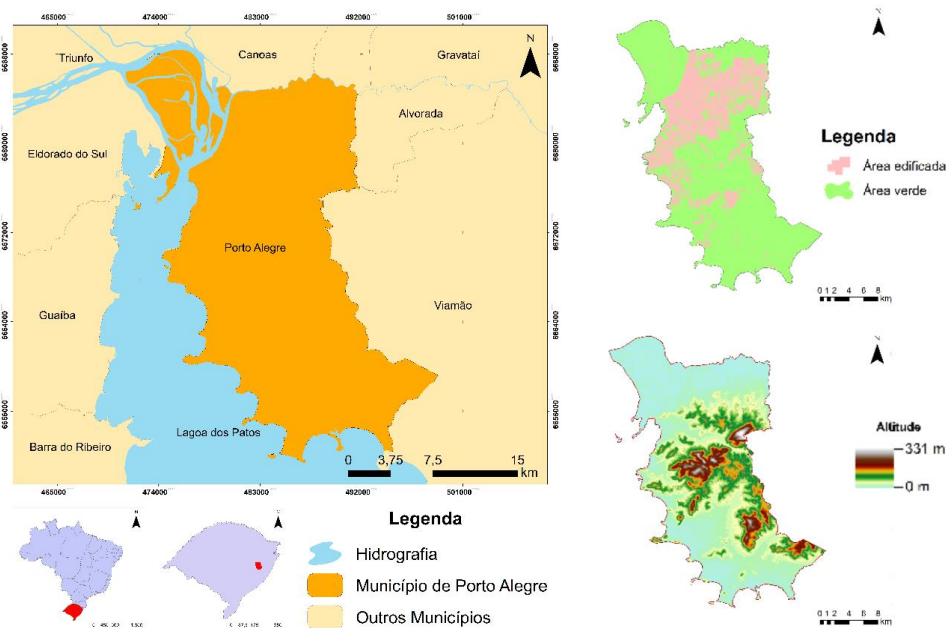


analisar as frequências de variação térmica e compilar uma série temporal para visualizar as mudanças ao longo do tempo. A análise espacial do campo térmico e a compilação da série temporal resultante deste estudo podem contribuir para o avanço do conhecimento na área, fornecendo ferramentas com potencial de uso para o planejamento urbano, a gestão ambiental e a adaptação às mudanças climáticas.

## **4.2 Área de estudo**

Porto Alegre, capital do estado do Rio Grande do Sul, está localizada no sul do Brasil, às margens do Lago Guaíba Figura 3. Com uma área de aproximadamente 496,8 km<sup>2</sup>. O clima predominante em Porto Alegre é subtropical úmido, com influência marítima, sendo um clima Cfa na classificação Köppen-Geiger, caracterizado por verões quentes e invernos frios. O município tem uma temperatura média anual de 19,7°C e 40,7°C de máxima absoluta registrada além de uma pluviosidade média anual de 1494,6 mm (INMET, 2022; FRITZSONS *et al.*, 2017). A região geográfica do entorno de Porto Alegre é marcada pela transição entre a Planície Costeira e Depressão Central (PORTO ALEGRE, 2011). Sua localização estratégica nas coordenadas 30°01'58" S 51°13'48" W permite uma conexão direta com o Lago Guaíba, contribuindo para sua importância como centro econômico. O número de habitantes aumentou quase 2000% no século XX, passando de 73 mil para, aproximadamente, 1,3 milhões de habitantes (IBGE, 2023). Uma das consequências decorrentes do processo de expansão urbana desordenada é o significativo percentual de população residindo em sub-habitações, cerca de 23,38% da população do município (TROLEIS; BASSO, 2007).

Figura 3 - Mapa da localização de Porto Alegre, RS, Brasil.

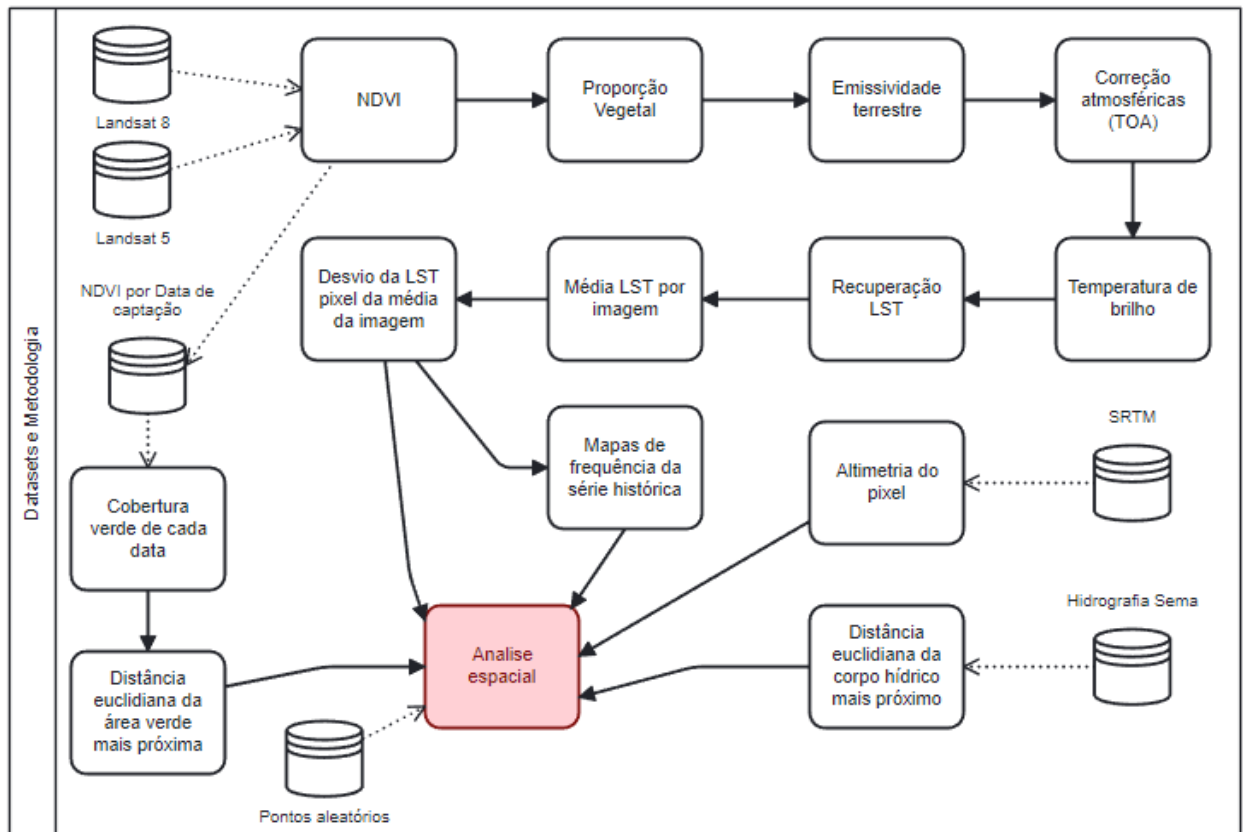


Fonte: Elaboração do autor

### 4.3 Metodologia

A metodologia deste trabalho foi organizada em quatro etapas: 1) dados e programas; 2) cálculo da temperatura da superfície terrestre; 3) processamento dos dados e índices térmicos; 4) análise espacial e temporal da temperatura. Na primeira etapa, foram elencados os dados e programas aplicados posteriormente na metodologia. Na segunda etapa, foi descrita a estimativa da temperatura em superfície e os procedimentos necessários aplicados para se obter tal estimativa. Esses processos foram realizados dentro da plataforma GEE. O segundo subcapítulo explora os processamentos dos dados e índices térmicos, incluindo o cálculo da média da LST, o desvio da temperatura em relação à média e as frequências de ocorrência de ilhas de frescor e de calor. Por fim, o terceiro subcapítulo discute a análise espacial da temperatura, destacando a obtenção de variáveis como a distância à cobertura vegetal, a altimetria e a distância euclidiana dos corpos hídricos. A partir dessas variáveis, é possível analisar a dinâmica espaço-temporal da região de estudo. Esses procedimentos podem ser observados no fluxograma representado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma da metodologia do Artigo 1



Fonte: Elaboração do autor

#### 4.3.1 Dados e programas

Dentre os materiais utilizados neste trabalho, encontra-se um conjunto de camadas vetoriais no formato *shapefile*: os limites do município de Porto Alegre, obtidos a partir da malha municipal do IBGE (2020); a delimitação dos corpos hídricos da SEMA (2018); e os limites da Área de Análise, que consiste em um retângulo abrangendo toda a extensão do município de Porto Alegre e seu entorno.

Os arquivos orbitais utilizados incluem dados altimétricos da Missão de Radar Topográfico do Ônibus Espacial (*Shuttle Radar Topography Mission - SRTM*), obtidos no site da USGS, com o propósito de extrair informações de altimetria. Além disso, foram utilizados dados dos satélites *Landsat 5* e *8*, nas categorias *Tier 2* e *Collection 2*, para extrair a série temporal. As imagens do *Landsat 5* abrangem o período de 30 de agosto de 1984 a 28 de outubro de 2011, enquanto as do *Landsat 8* correspondem ao período de 18 de novembro de 2013 a 24 de setembro de 2022. É importante ressaltar que nenhuma imagem do ano de 2012 foi utilizada, a fim de evitar possíveis problemas decorrentes do uso de produtos do satélite *Landsat 7*. Os dados foram

obtidos na plataforma *Google Earth Engine* (órbita-ponto: 221-081), que cobre integralmente o município de Porto Alegre e suas imediações. No total, foram utilizadas 128 imagens, sendo 81 do *Landsat 5* e 47 do *Landsat 8*

O processamento dos dados mencionados foi realizado na plataforma *Google Earth Engine*, que oferece uma ampla gama de recursos para análise geoespacial. Por meio do ambiente de codificação da plataforma, chamado de *Code Editor*, é possível requisitar bibliotecas de imagens provenientes de diversos satélites. Neste estudo, foi utilizado o *Code Editor* para acessar e processar as bibliotecas de imagens de satélite. Além do *Google Earth Engine*, foi utilizado o *software ArcGIS 10.5*, aproveitando seu recurso de construção de modelos para realizar análises geoespaciais. Por fim, o *software Excel* foi utilizado para realizar análises estatísticas.

#### 4.3.2 Estimativa da temperatura da superfície terrestre

Estimar a emissividade da superfície terrestre é essencial para compreender a capacidade de emissão de energia por radiação do *pixel*, e essa estimativa foi calculada para cada data analisada no trabalho. Para estimar a emissividade da superfície terrestre via sensoriamento remoto, foi necessário primeiro processar o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), um indicador amplamente utilizado na avaliação da vegetação por meio de sensoriamento remoto. Ele é calculado a partir da diferença entre a radiação refletida no espectro do infravermelho próximo (NIR) e no espectro do vermelho (RED), dividida pela soma da radiação refletida no NIR e no RED, conforme a Equação 1, utilizando as bandas do infravermelho próximo e do vermelho. O NDVI é o dado de entrada para o cálculo da proporção de vegetação, representado pela Equação 2, que considera os valores mínimos e máximos do NDVI. A partir dos dados de proporção de vegetação, é possível calcular a emissividade da superfície terrestre, conforme representado na Equação 3. Todos os dados de NDVI, organizados por data de captação, foram exportados pelo *Google Earth Engine* para o *Google Drive*, para posteriormente auxiliar na análise da cobertura vegetal.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}} \quad (1)$$

Em que: NDVI = *Normalised Difference Vegetation Index*; NIR = infravermelho próximo; R = Banda do Vermelho.

$$P_v = (\text{NDVI} - \text{NDVI min} / \text{NDVI max} - \text{NDVI min})^2 \quad (2)$$

Em que:  $P_v$  = Proporção de vegetação; NDVI = *Normalised Difference Vegetation Index*; NDVI min = valor mínimo do NDVI; NDVI max = valor máximo do NDVI.

$$e = 0.004 * P_v + 0.986 \quad (3)$$

Em que:  $e$  = emissividade da superfície terrestre;  $P_v$  = Proporção de vegetação.

Na sequência, foi realizada uma série de processamentos nas imagens resultantes da etapa anterior. Todos os procedimentos metodológicos desta etapa são adaptações do processo de obtenção de LST, conforme descrito por Jesus (2017). O próximo passo foi realizar os processamentos necessários nas bandas térmicas dos sensores, que são a banda 6 do *Landsat 5* e a banda 10 do *Landsat 8*. Apesar de o sensor TIRS ter duas bandas térmicas, o USGS (*United States Geological Survey*) recomenda o uso da banda 10 devido à sua maior estabilidade quando comparada à banda 11. Foram utilizadas imagens sem nuvens, que já corrigidas em TOA (Reflectância de Topo-Atmosférica) e estão representadas em níveis de cinza (NC) ou números digitais (ND), fornecidas pelas bibliotecas do *Google Earth Engine*.

As imagens em radiância espectral ( $L\lambda$ ) no topo da atmosfera, obtidas diretamente da biblioteca do *Google Earth Engine*, foram convertidas para temperatura de brilho do satélite ( $T$ ) de acordo com a Equação 4. Para isso, foram utilizados os coeficientes de conversão térmica encontrados nos metadados dos sensores. O último passo desta etapa de processamento é a estimativa da temperatura da superfície, que faz uso tanto da temperatura de brilho ( $T$ ), resultante da Equação 4, quanto da emissividade da superfície terrestre calculada a partir do NDVI ( $e$ ), conforme a Equação 3. Além disso, a estimativa utiliza uma série de constantes descritas na Equação 5. A partir desta fórmula, foram obtidos os dados de temperatura absoluta da superfície.

$$T = K2 / \ln (K1 / L\lambda + 1) \quad (4)$$

Em que:  $T$  = Temperatura de brilho do satélite em Kelvin (K);  $L\lambda$  = Radiância espectral no topo da atmosfera;  $K1$  = Conversão térmica específica da banda  $K1$ ;  $K2$  = Conversão térmica específica da banda  $K2$ .

$$\text{LST} = T/1+W*(T/p)*\ln(e) \quad (5)$$

Em que: LST = Temperatura superficial; T= Temperatura de brilho Kelvin (K); W= Comprimento de onda da radiação emitida (11.5µm); p = h\*C/S (1.438\*10<sup>-2</sup>mk); h = constante de planck (6.626\*10<sup>-34</sup>Js); s = Constante de Boltzmann (1.38\*10<sup>-23</sup>J/K); p = 14380; e = emissividade da superfície terrestre

A partir dos dados de temperatura na superfície, foi realizado o último passo na construção da base de dados para as análises espaço-temporais posteriores. Os *rasters* foram exportados para o *Google Drive*, organizados por data de captura da imagem e em formato tiff. Eles consistem na temperatura na superfície recortada pelos limites da área de análise, que foi inserida na plataforma do *Google Earth Engine*.

#### 4.3.3 Processamentos dos dados e índices térmicos

Os arquivos exportados foram importados para o *software ArcGIS 10.5*, utilizando o módulo de construção de modelos (*Model Builder*). O primeiro passo dessa análise foi calcular a média da LST em cada uma das imagens de temperatura da área de estudo, dentro do retângulo da área de análise, excluindo os pixels correspondentes a corpos hídricos, uma vez que a inclusão desses pixels poderia reduzir o valor da média e dificultar a análise posterior. Em seguida, foi calculado o desvio da temperatura de cada pixel em relação a essa média, subtraindo o valor da temperatura de cada pixel pelo valor da média.

Posteriormente, calculou-se a frequência com que cada pixel excedeu os limiares de desvio de temperatura, considerando os limiares pré-definidos. Para identificar regiões frescas, foi estabelecido um limiar de desvio de temperatura igual ou inferior a -1,5°C em relação à média da imagem, enquanto para regiões mais quentes, o limiar foi definido como um desvio de temperatura igual ou superior a 1,5°C, também em relação à média da imagem. Com base nos desvios de temperatura e na frequência de ocorrência de valores acima ou abaixo desses limiares, é possível caracterizar o efeito de ilhas de calor ou de frescor superficial, destacando quais áreas tendem a ter temperaturas de superfície mais baixas (ilhas de frescor) ou mais altas em comparação com suas proximidades (ilhas de calor).

#### 4.3.4 Análise espacial da temperatura

O próximo passo metodológico envolve a criação de produtos que fornecem variáveis relacionadas à temperatura da superfície. Primeiramente, é necessário calcular a distância de cada pixel em relação à área verde mais próxima, a fim de compreender a influência das áreas verdes na temperatura superficial em seu entorno. Essa distância foi calculada levando em consideração o NDVI de cada data analisada. Para isso, foi utilizado o NDVI que foi exportado, aplicando uma reclassificação do *raster* com base em um limiar de 0,35 do NDVI, classificando valores acima desse limiar como áreas verdes. Após esse processo, o *raster* foi convertido em polígonos. Em seguida, ocorre a limpeza desses polígonos, removendo aqueles com área menor que 4000 m<sup>2</sup>. Com essa máscara já processada, foi calculado a distância euclidiana de cada pixel.

Além disso, na análise, foram incluídos outros dois produtos: a altimetria, que foi extraída de uma imagem SRTM, e a distância euclidiana em relação aos corpos hídricos do município, os quais podem ser obtidos a partir dos *shapefiles* de corpos hídricos disponibilizados pela SEMA. Essas duas variáveis são constantes para todas as datas, uma vez que a composição hídrica e a altimetria sofrem pequenas alterações ao longo da série temporal na área de análise.

Após esses procedimentos, torna-se possível analisar a dinâmica espaço-temporal de Porto Alegre ao longo de nossa série histórica. Para isso, foi gerado aleatoriamente 5000 pontos fixos apenas na parte continental da área de estudo, excluindo as ilhas da análise, uma vez que não apresentam uma área urbanizada significativa. Além disso, foi necessário excluir da análise áreas onde as distâncias de áreas verdes fossem iguais a 0 metros, visando a análise do entorno das áreas verdes. Em seguida, foi extraído os valores dos *rasters* para esses pontos em relação aos dados de temperatura de cada ponto, em cada uma das imagens, bem como o desvio em relação à média da data em que foram capturadas. Também foram inseridos os dados de distância euclidiana das áreas verdes, corpos hídricos e altimetria desses pontos. Todos esses dados foram consolidados em uma tabela e exportados para o *software Excel*, onde foi realizada a correlação linear de Pearson.

Além dessa análise estatística, foi realizada uma análise visual com base nos mapas de frequência, a fim de evidenciar como a temperatura da superfície se

comporta ao longo da série histórica. Para destacar as mudanças nas dinâmicas de frequência de calor, foram comparados os padrões de frequência em dois períodos da série histórica: de 1984 a 2006 e de 2007 a 2022, utilizando o índice de alteração da frequência (IAF) térmica, expresso em uma escala de -100% a +100%.

No caso do valor -100%, representa pixels que, durante toda a primeira metade da série histórica, atingiram o limiar de frescor e, na segunda metade, atingiram o limiar de calor, indicando áreas de expansão urbana. Um valor de 0 indica pixels que mantiveram a mesma frequência nas duas metades da série histórica. Enquanto o valor +100% representa pixels que, durante toda a primeira metade da série histórica, atingiram o limiar de calor e, na segunda metade, atingiram o limiar de frescor em todas as datas, indicando áreas onde houve um aumento na cobertura vegetal ou mudanças na vegetação. A equação que representa esse índice está representada na Equação 6.

$$\mathbf{IAF = (((\sum_{i=1}^n Vlp/n) * 100) - (((\sum_{i=1}^n Vls)/n) * 100)) \quad (6)}$$

Em que: IAF = índice de Alteração de Frequência; Vlp = Valor de ocorrência do limiar de calor no primeiro período; Vls = Valor de ocorrência do limiar de calor no segundo período; n = Número total de itens analisados no período

Outra análise realizada visando evidenciar o comportamento da mancha urbana de Porto Alegre foi o perfil térmico do município, com o intuito de indicar como a temperatura superficial varia ao longo de um transecto. Para realizar esse procedimento, foram traçados dois perfis em nossa área de estudo: o perfil A-B, que atravessa o município no sentido noroeste-sudeste, e o perfil C-D, que abrange apenas a área urbanizada na direção sudoeste-nordeste. Esses mesmos perfis foram analisados em três anos diferentes, permitindo assim destacar as alterações na dinâmica térmica da área de estudo ao longo do tempo. Os anos selecionados para análise foram 1985, 2002 e 2022, representando três momentos distintos da série histórica.

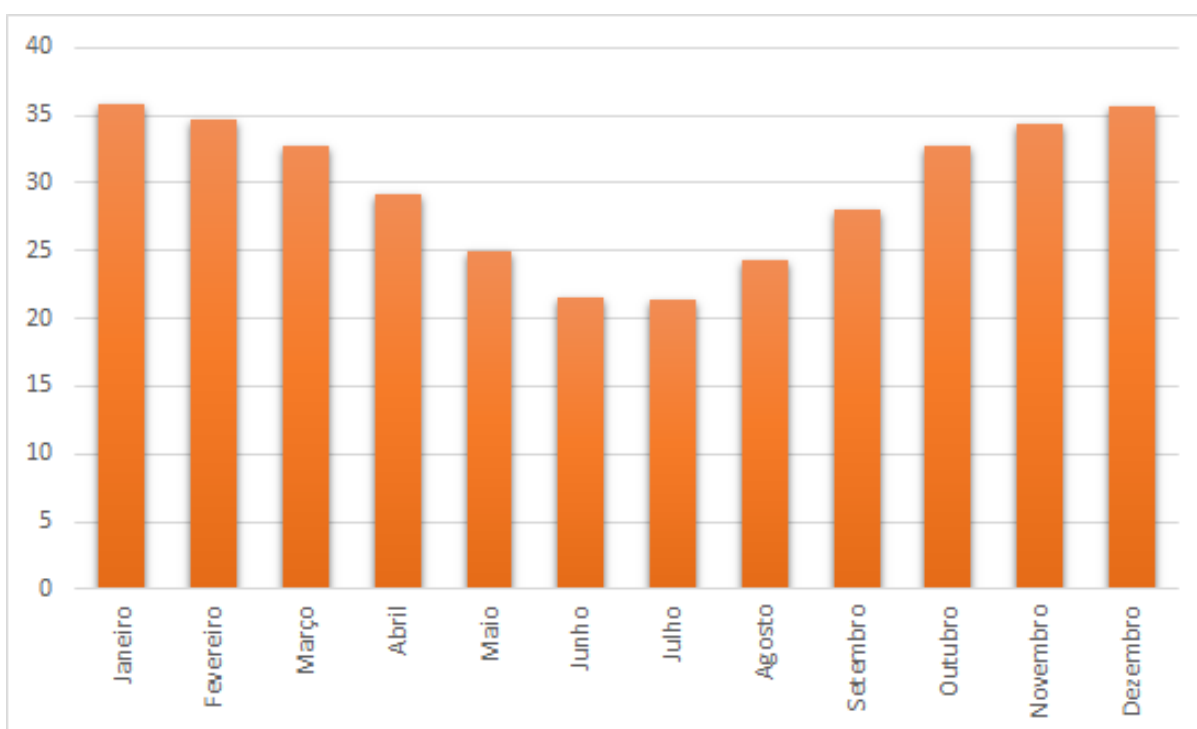


## 4.4 Resultados

### 4.4.1 Médias históricas da temperatura superficial absoluta.

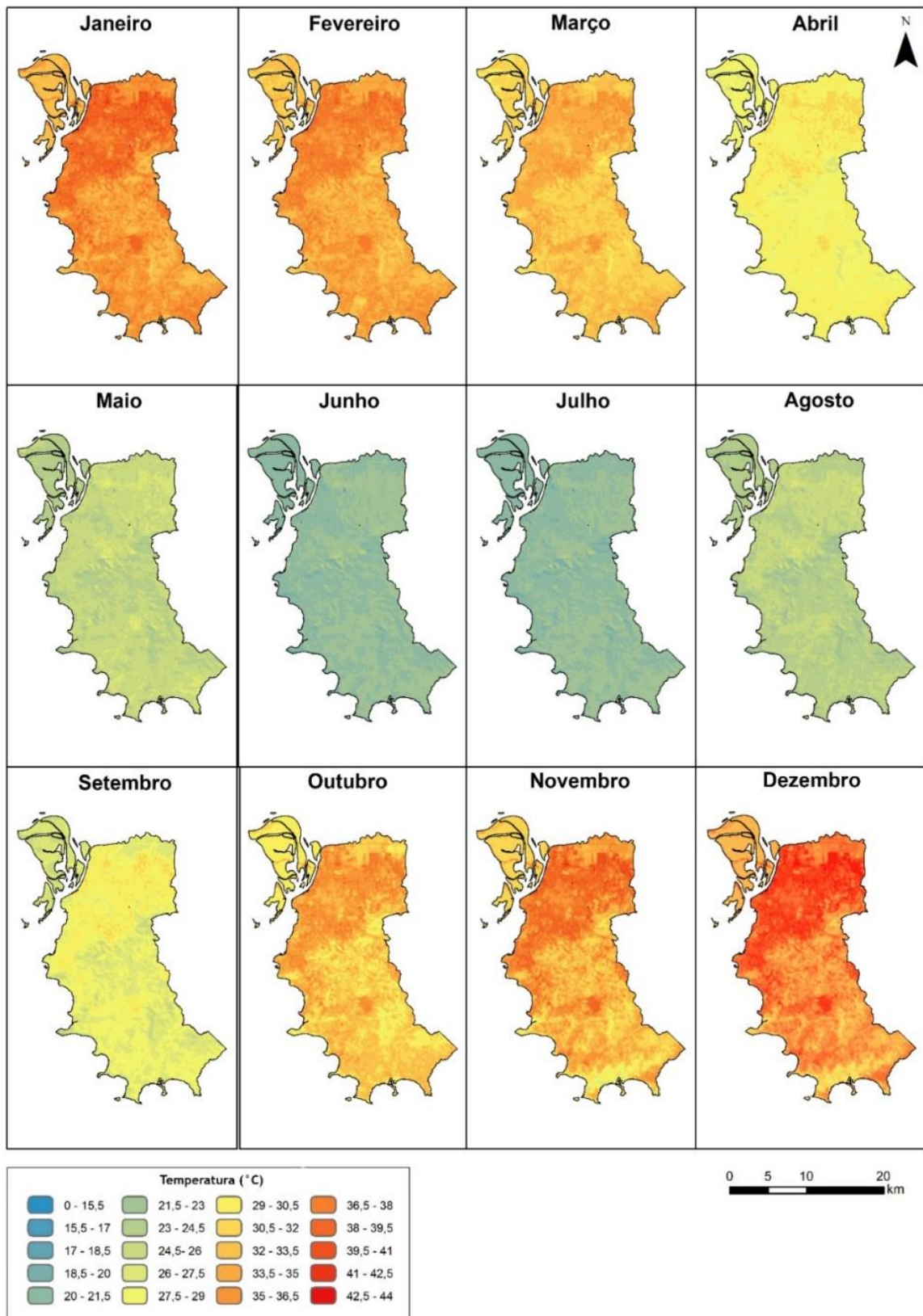
Na Figura 6, apresenta-se a média da temperatura superficial de cada mês ao longo do ano na área de análise. Esse resultado demonstra que a temperatura superficial no município de Porto Alegre segue um padrão de estações bem definidas, com o verão manifestando temperaturas superficiais consideravelmente mais elevadas que o período de inverno, que apresenta temperaturas mais amenas, especialmente em junho e julho. A Figura 5, apresenta um gráfico que mostra a temperatura superficial média de cada mês ao longo da série de 38 anos, o qual se assemelha ao gráfico anterior. Nos meses de verão, dezembro, janeiro e fevereiro, as temperaturas médias são, respectivamente, 35,62 °C, 35,71 °C e 34,71 °C, enquanto nos meses de inverno, junho, julho e agosto, as temperaturas superficiais médias são de 21,48 °C, 21,32 °C e 24,23 °C.

Figura 5 - temperatura de superfície média mensal na área de estudo no período de 1984 a 2022, Porto Alegre/RS



Fonte: Elaboração do autor

Figura 6 - Mapas da temperatura superficial mensal média na série temporal de 1984 a 2022 no município de Porto Alegre, RS.

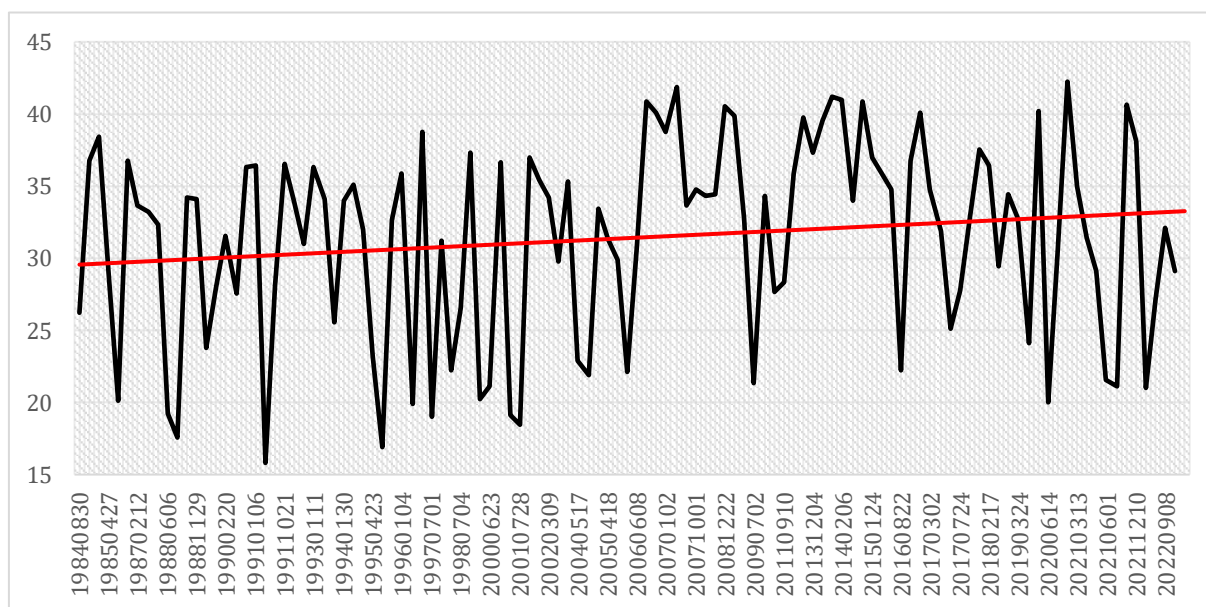


Fonte: Elaboração do autor

#### 4.4.2 Temperatura superficial na série histórica

A análise do aumento da temperatura superficial em Porto Alegre, com dados abrangendo o período de 1984 a 2022, nos oferece tendências climáticas locais ao longo das últimas décadas. O estudo dessas variações térmicas é crucial para compreender os padrões climáticos regionais e locais. A partir da análise desses dados, é possível identificar padrões de aquecimento que podem estar relacionados a uma série de fatores, incluindo influências naturais e atividades humanas. Essa análise inicial servirá como base para uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas térmicas em Porto Alegre; além disso, fornecerá um contexto importante para futuras discussões sobre medidas de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas em nível local. É importante ressaltar que o gráfico aponta para um aumento da temperatura superficial de maneira geral, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Média da Temperatura Superficial por Data de Captação no Município de Porto Alegre 1984-2022.



Fonte: Elaboração do autor

A análise estatística das temperaturas em Porto Alegre, revela características significativas para cada estação do ano. Durante o verão, as temperaturas apresentam uma média de aproximadamente 33,19 graus Celsius, com uma amplitude de 26,22 a 40,85 graus Celsius. Os quartis indicam que 25% das observações se concentram entre aproximadamente 30,97 e 36,53 graus Celsius. A

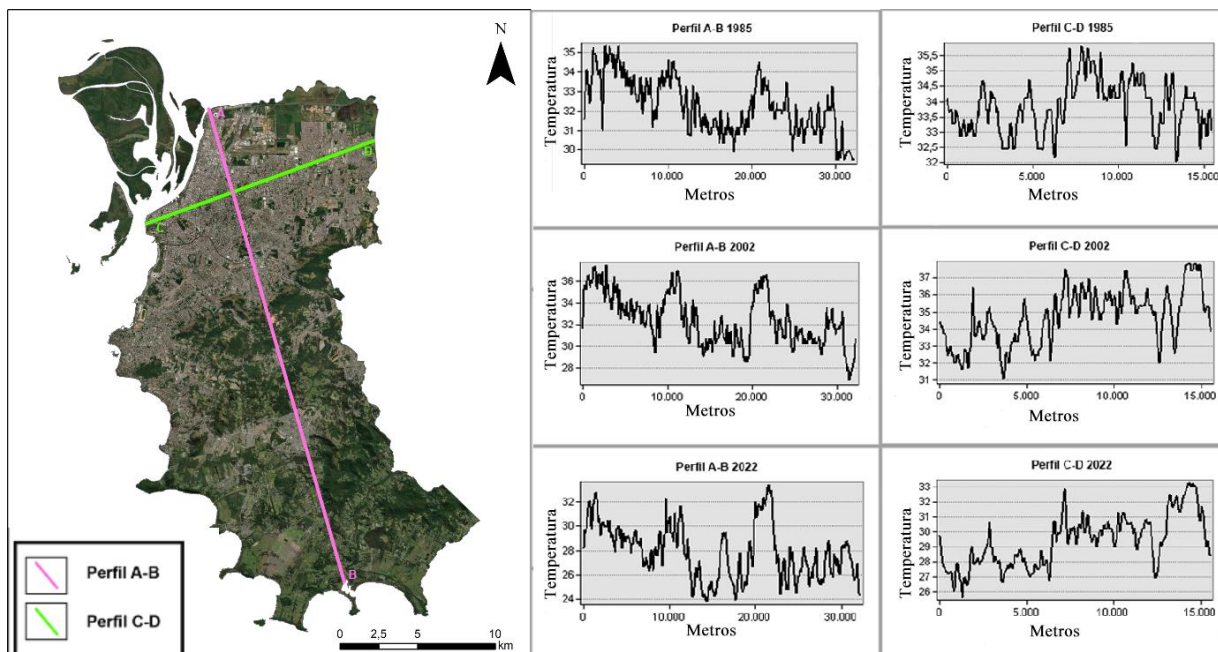
dispersão dos dados, representada pelo desvio padrão de aproximadamente 4,09, sugere uma variabilidade moderada nas temperaturas veraneias.

No outono, a média das temperaturas é em torno de 31,92 graus Celsius, variando de 15,81 a 41,82 graus Celsius. Os quartis revelam uma concentração de 25% das observações entre 26,98 e 35,42 graus Celsius. O desvio padrão, aproximadamente 4,58, destaca uma dispersão considerável nas temperaturas outonais. No inverno, as temperaturas médias caem para cerca de 29,91 graus Celsius, variando de 19,03 a 42,24 graus Celsius. Os quartis indicam que 25% das observações se encontram entre aproximadamente 28,11 e 34,78 graus Celsius, e o desvio padrão de aproximadamente 3,67 aponta para uma dispersão moderada. Por fim, na primavera, a média das temperaturas atinge cerca de 33,01 graus Celsius, com uma amplitude de 21,06 a 40,62 graus Celsius. Os quartis revelam uma concentração de 25% das observações entre 31,29 e 35,88 graus Celsius, enquanto o desvio padrão de aproximadamente 4,17 nas temperaturas primaveris. Essas análises estatísticas proporcionam uma compreensão abrangente das características térmicas ao longo das distintas estações do ano em Porto Alegre.

#### 4.4.3 Caracterização do perfil térmico do município de Porto Alegre na série histórica.

Os perfis analisados podem ser observados na Figura 8, assim como os respectivos gráficos. No perfil A-B, as maiores alterações ocorrem na região dos 20 km a 23 km, onde existe o adensamento de regiões urbanizadas distantes do centro urbano de Porto Alegre, destacando-se o bairro Restinga. Na imagem de 2022, observa-se uma alteração na faixa dos 17 km, na mancha urbana que se expande em sentido Norte-Sul. Já no perfil C-D, nota-se alterações na faixa entre 13 km e 15 km, devido à expansão do bairro Sarandi, localizado no final do perfil. Essa região apresenta as maiores temperaturas nos anos de 2002 e 2022, ao contrário do perfil C-D de 1985, onde as temperaturas mais altas estavam na área central. Isso evidencia a alteração na dinâmica térmica ao longo da série histórica, com deslocamento das ilhas de calor para as áreas mais periféricas do município, nas zonas norte-leste e sul.

Figura 8 - Mapa e gráficos dos perfis térmicos dos anos de 1985, 2002 e 2022, Porto Alegre/RS.



Fonte: Elaboração do autor.

#### 4.4.4 Desvio da temperatura superficial média

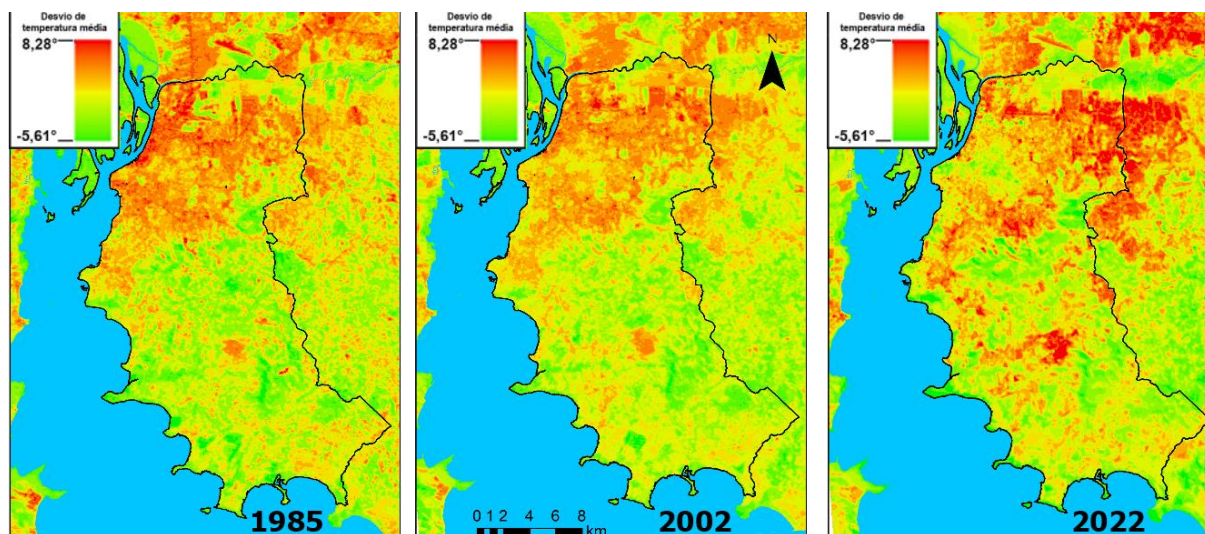
O desvio da média em relação à data de captação é um dos índices térmicos desenvolvidos durante o trabalho. Na Figura 9, pode-se observar esse desvio nos anos de 1985, 2002 e 2020. O desvio demonstra como a temperatura de um pixel se comporta em relação à média da data de captação, sendo um valor mais confiável na análise da série histórica do que o valor absoluto de temperatura, que pode variar significativamente devido a várias variáveis climáticas.

Na série histórica, é possível notar um processo em que a área central passa a ter temperaturas mais próximas da média ao longo dos anos, influenciada pela expansão urbana nas áreas mais periféricas. Devido ao aumento das áreas edificadas, a média de temperatura no município também ascende, fazendo com que o desvio das áreas centrais, já consolidadas desde o início da série histórica, diminua.

Por outro lado, as áreas periféricas apresentam alterações mais significativas na dinâmica térmica, já que no ano de 2020 representam as áreas mais quentes da área de estudo. Outro ponto a ser destacado é o aumento na temperatura superficial

em relação à média nos aglomerados urbanos, localizados distantes da mancha urbana central, especialmente na região sul de Porto Alegre.

Figura 9 - Mapas do desvio da média de temperatura superficial dos anos 1985, 2002 e 2022.

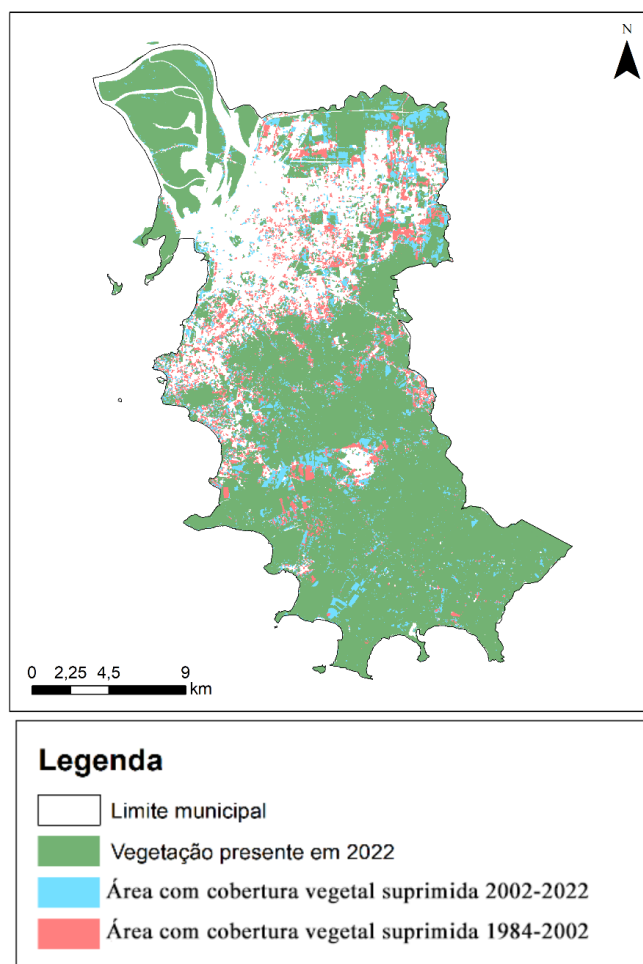


Fonte: Elaboração do autor

#### 4.4.5 Dinâmica de áreas verdes no município

Outro fator de grande importância na composição do campo térmico é a cobertura verde dentro dos limites urbanos. Na Figura 10, apresenta-se uma comparação entre diferentes períodos da série histórica, buscando evidenciar como ocorreram as alterações nas áreas verdes dentro do município. Nota-se que as alterações não ocorrem de maneira aleatória; existem regiões de interesse para a expansão da área edificada que se alternaram ao longo da série histórica. Entre 1984 e 2002, a supressão ocorre no entorno da área urbana, já no período de 2002 a 2022, há uma expansão em regiões fora da mancha urbana já consolidada como o caso da Restinga e proximidades. Em relação à proporção de área urbanizada com cobertura vegetal nos anos de 1985, 2002 e 2022, há, respectivamente, 52,84%, 37,66% e 30,35%. Esses resultados demonstram que houve uma redução de 15,18% na proporção de cobertura verde entre os anos de 1985 e 2002, sendo maior do que a alteração de 7,31% entre os anos de 2002 e 2022.

Figura 10 - Mapa do comportamento espacial da supressão de vegetação na série histórica.



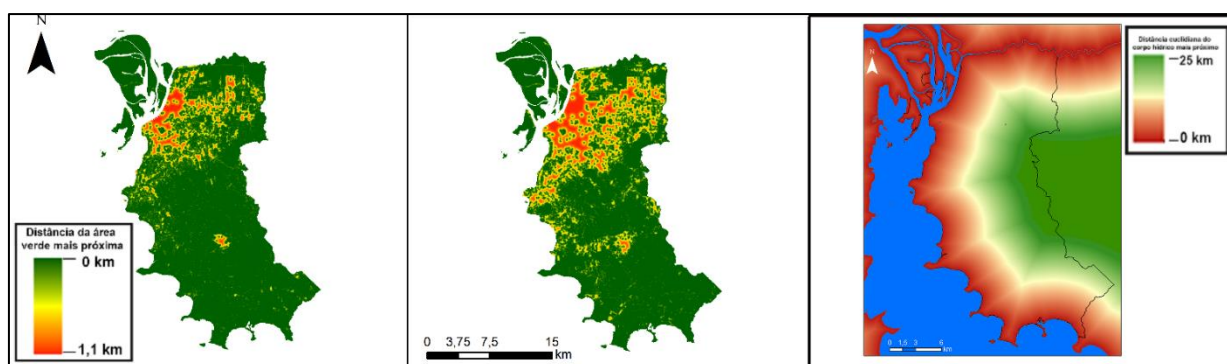
Fonte: Elaboração do autor

#### 4.4.6 Relação entre variáveis de distância euclidiana dos corpos d'água e áreas verdes, altimetria e temperatura

As variáveis de distância euclidiana das áreas verdes e corpos d'água e a variável de altimetria foram relacionadas pelo coeficiente de correlação linear de Pearson com a variável de desvio de temperatura de cada imagem. As correlações lineares de Pearson obtidas foram muito próximas de zero: -0,01 para hidrografia, 0,02 para áreas verdes e altimetria. Isso indica uma correlação praticamente nula entre as variáveis observadas e a temperatura superficial, o que decorre da dificuldade de se analisar a influência da temperatura em seu entorno. Esse resultado pode ser atribuído aos princípios físicos intrínsecos à estimativa da LST, além da ilha de calor superficial em si. A ilha de calor superficial é menos influenciada por essas variáveis

de atenuação do que a ilha de calor atmosférica ou do ar, o que dificulta o registro dos efeitos das ilhas de frescor via sensoriamento remoto. Além disso, o tamanho do pixel de 30 metros dos satélites Landsat pode não capturar adequadamente os efeitos das ilhas de frescor de pequenas áreas verdes, pois esses efeitos podem não se estender por uma grande área de atenuação em relação ao tamanho do *pixel*.

Figura 11 - Mapas de distância euclidiana das áreas verdes dos anos de 1985 e 2022 e hidrografia.



Fonte: Elaboração do autor

#### 4.4.7 Mapa frequência de frescor e calor

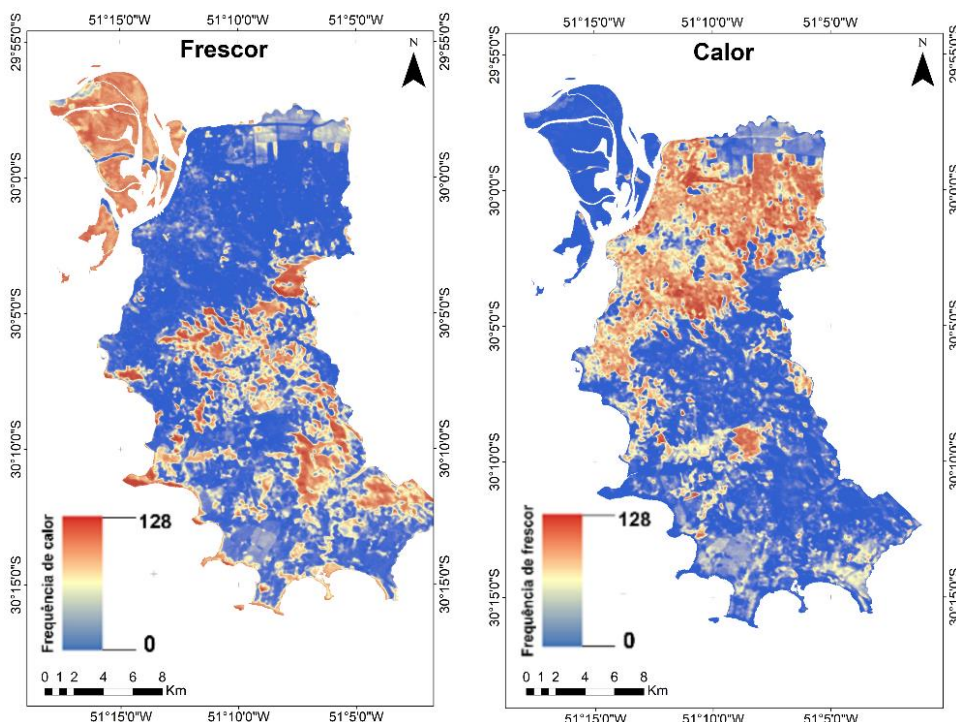
A distribuição espacial das frequências de frescor, como pode ser observada à esquerda na Figura 12, destaca principalmente as áreas com cobertura vegetal constante ao longo da série temporal. As ilhas ao noroeste do município e as regiões de morros ao sul são as principais áreas evidenciadas como tipicamente frescas. Também é possível notar regiões frescas próximas ao Lago Guaíba, onde ainda existem áreas vegetadas. Esse produto demonstrou ser eficaz ao evidenciar áreas frescas dentro do ambiente urbano.

O mapa das frequências de regiões quentes, no lado direito da Figura 12, não apenas permite identificar as áreas mais quentes, mas também destaca as áreas frescas dentro do ambiente urbano, como parques e áreas florestais urbanas. É possível observar claramente o campo térmico urbano do município com base nesse método. Porto Alegre apresenta a região central e mais antiga com uma frequência de calor menos recorrente na série histórica, quando comparada com áreas de expansão urbana mais recente. É evidente que as áreas periféricas ao nordeste do município foram expandidas e adensadas ao longo da série histórica, resultando nas maiores frequências de calor. Acredita-se que isso se deva ao material utilizado na



construção das edificações, ao adensamento das construções e à ausência de vegetação nos lotes, como jardins e gramíneas, que podem atenuar a temperatura.

Figura 12 - Mapas de frequência de frescor e calor.

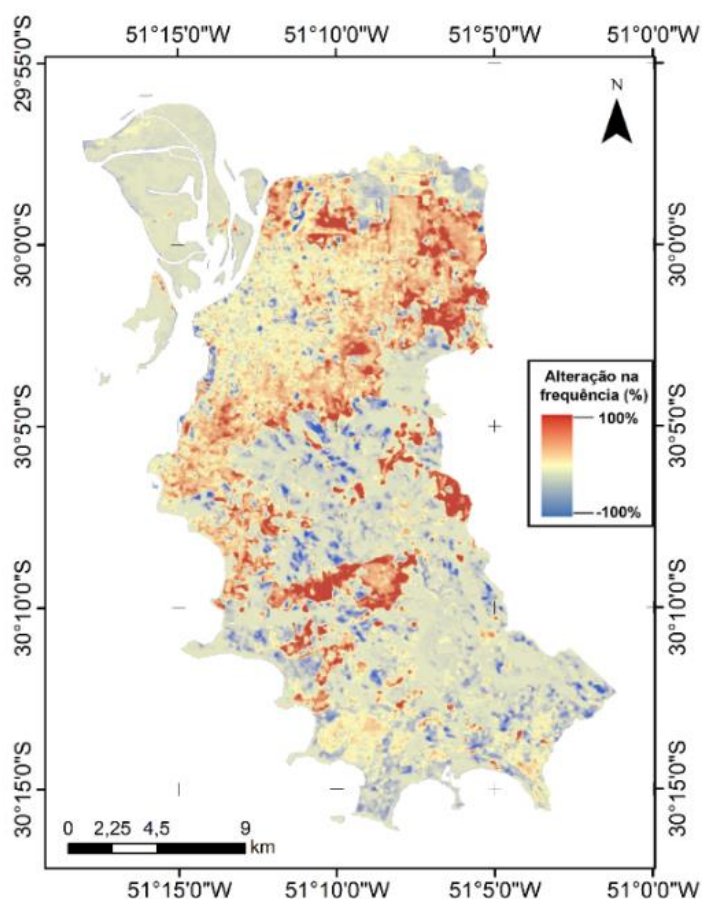


Fonte: Elaboração do autor

#### 4.4.8 Alteração na frequência comparando as séries de 1984 a 2006 e 2007 a 2022

O índice de alteração de frequência revelou-se um excelente recurso para analisar o comportamento da temperatura superficial ao longo da série histórica, conforme demonstrado na Figura 13. Pode-se observar a representação gráfica do índice, o qual nos indica um valor de alteração de frequência próximo a 0 na região central, não demonstrando assim grandes alterações ao comparar os dois períodos. No entorno da mancha urbana original, encontra-se as maiores alterações, especialmente na região nordeste do município. Alguns outros focos de alteração são observados na região sul, em aglomerados urbanos mais afastados.

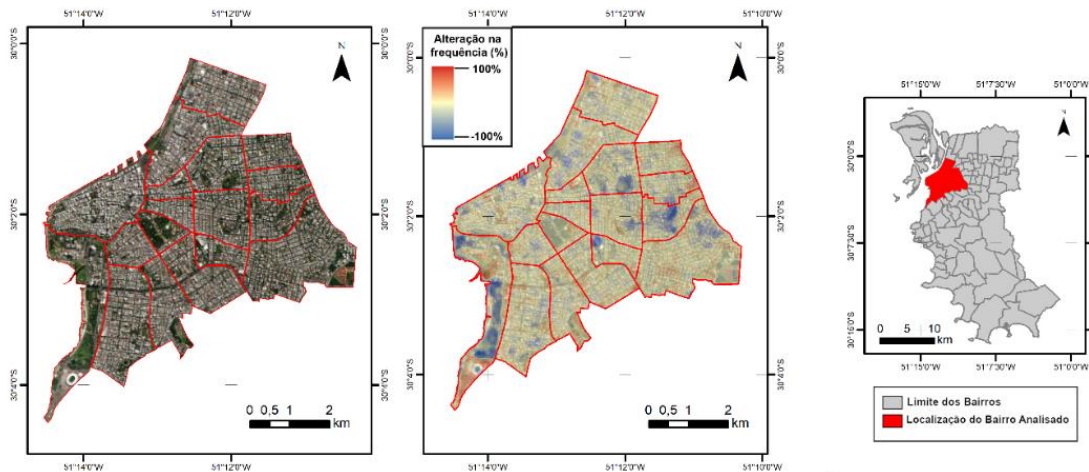
Figura 13 - Mapa do índice de alteração na frequência térmica comparando dois períodos: 1984 a 2006 e 2007 a 2022.



Fonte: Elaboração do autor

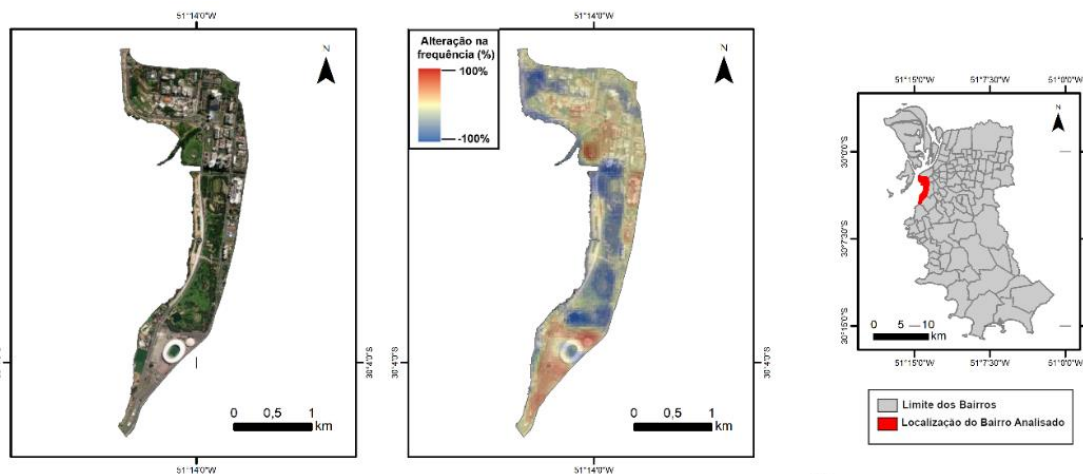
A partir do índice de alteração na frequência térmica, é possível analisar o comportamento do campo térmico de alvos específicos. Na Figura 14, foi ilustrado um recorte da área central de Porto Alegre, definida como o centro histórico da cidade e seu entorno, abrangendo regiões de importância político-administrativa e grandes centros comerciais, já estabelecidos no início da série analisada. De maneira geral, observa-se uma estabilidade na dinâmica térmica dessa região, o que era esperado, uma vez que se trata de uma área já estabelecida e sem possibilidades significativas de expansão ou adensamento. No entanto, há alguns trechos onde houve uma redução na frequência do limiar de calor na segunda metade da série histórica. Um exemplo é o bairro Praia de Belas, localizado na porção sudoeste da região central, que pode ser observado com mais detalhes na Figura 15. Nessa área, próxima às margens do Lago Guaíba, houve expansão das áreas verdes urbanas durante a segunda metade da série histórica.

Figura 14 - Alteração na frequência de calor (Região Central).



Fonte: Elaboração do autor

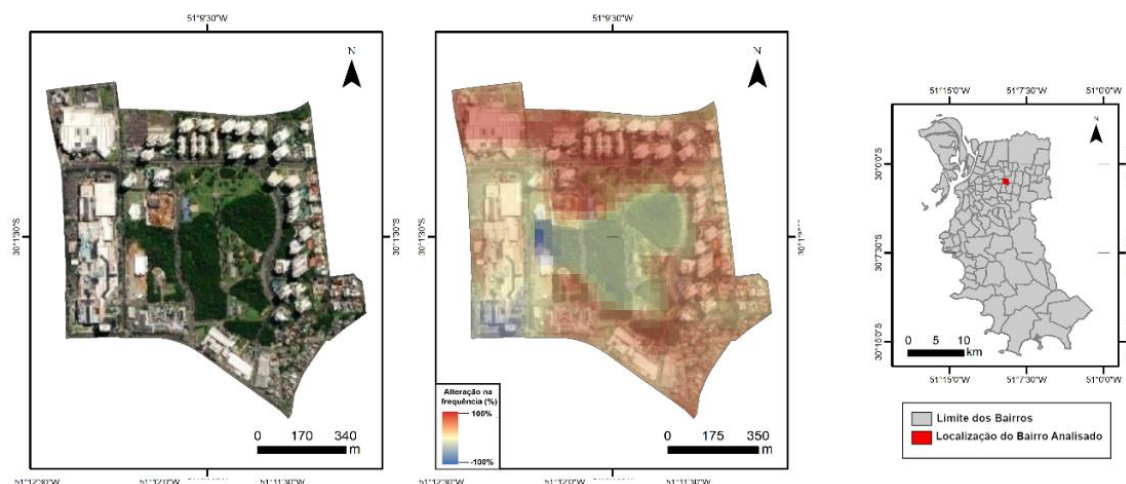
Figura 15 - Alteração na frequência de calor (Bairro Praia de Belas).



Fonte: Elaboração do autor

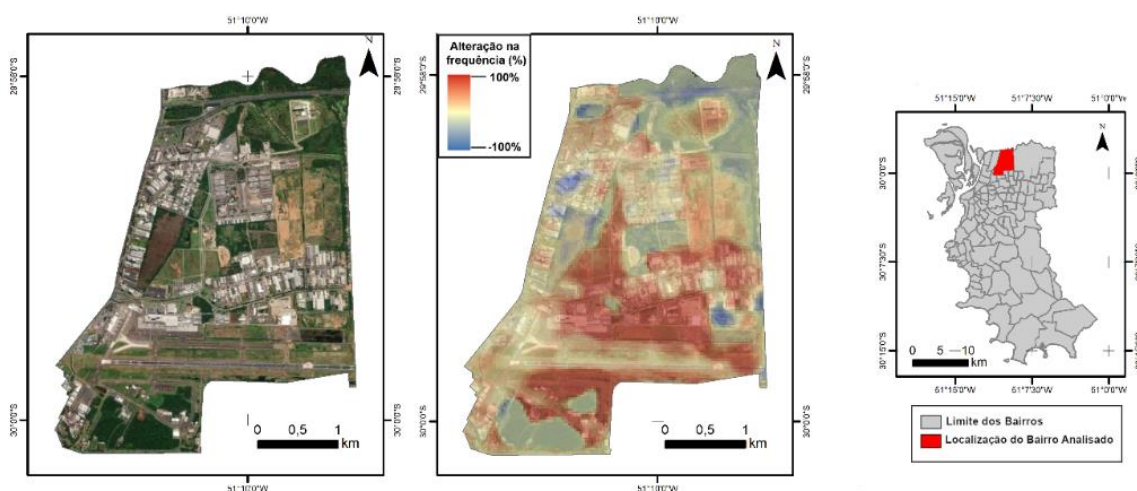
Em alguns casos, é possível observar alterações específicas ligadas a dinâmicas locais, como no bairro Jardim Europa, exemplificado na Figura 16. Nessa área, houve um aumento na frequência de calor nos arredores de uma área verde do Porto Alegre Country Club, resultado da especulação imobiliária, que gerou um adensamento da área urbanizada. Outro exemplo de alteração na dinâmica térmica pode ser observado nos arredores do Aeroporto Salgado Filho, localizado no bairro Anchieta, conforme ilustrado na Figura 17. É visível que nas proximidades da pista de pouso ocorreu uma expansão no campo térmico, resultante da expansão da infraestrutura do aeroporto e do aumento das áreas edificadas.

Figura 16 - Alteração na frequência de calor (Bairro Jardim Europa).



Fonte: Elaboração do autor

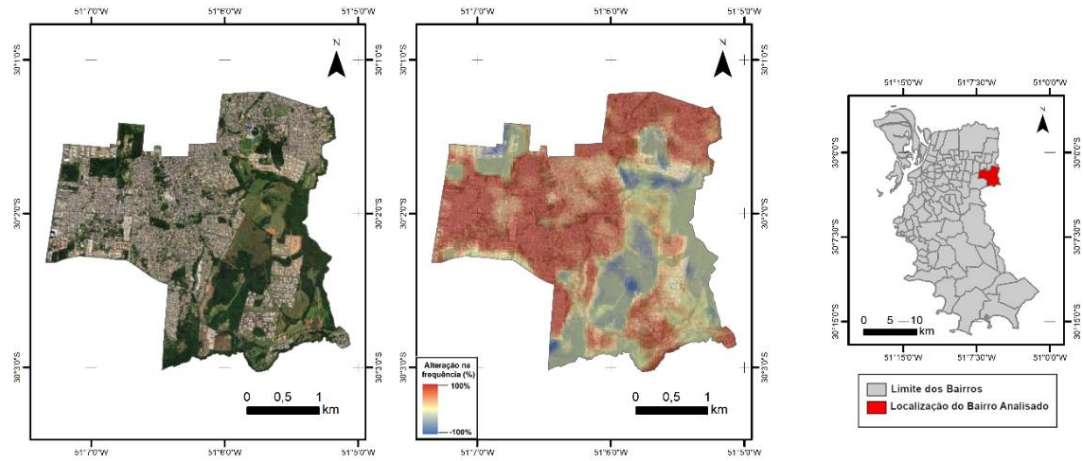
Figura 17 - Alteração na frequência de calor (Bairro Anchieta).



Fonte: Elaboração do autor

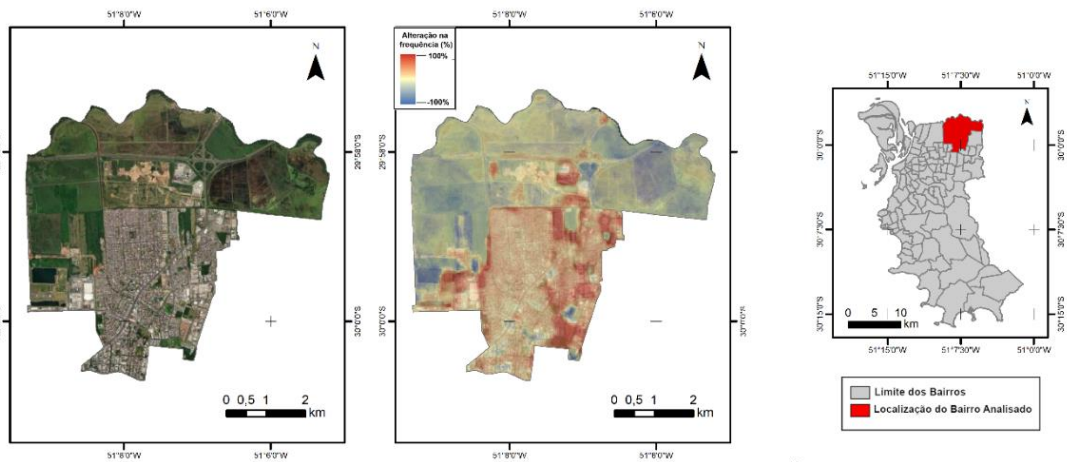
As áreas com as alterações de frequência mais evidentes estão localizadas na região periférica de Porto Alegre. Um exemplo notável é o bairro Mário Quintana, como ilustrado na Figura 18, que praticamente surgiu durante a segunda metade da série histórica, representando uma das maiores mudanças no campo térmico do município. Outros dois casos importantes a serem mencionados são os bairros Sarandi e Restinga. Nessas áreas, além do aumento da área edificada, observa-se um adensamento da malha urbana, como pode ser visto nas Figuras 19 e 20. Além das mudanças típicas envolvendo a substituição da cobertura vegetal por materiais de construção civil, nota-se um aumento na frequência na região interna desses bairros, sugerindo um adensamento na prática.

Figura 18 - Alteração na frequência de calor (Bairro Mario Quintana).



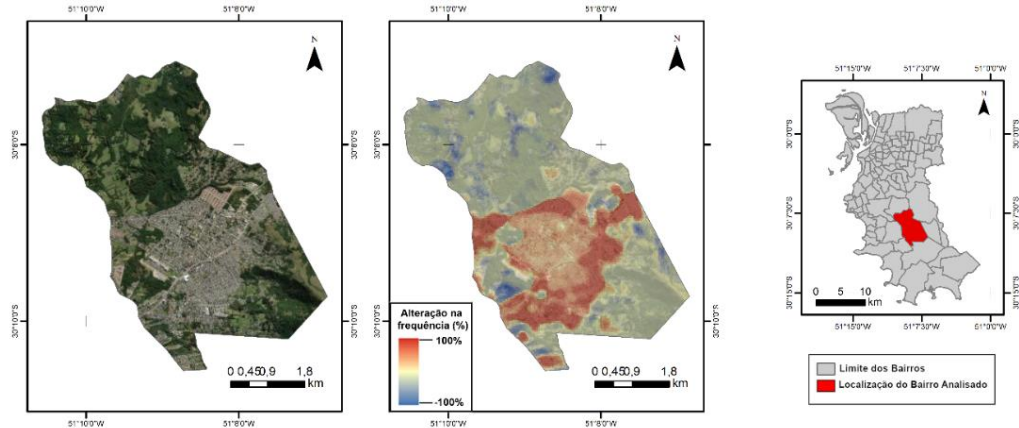
Fonte: Elaboração do autor

Figura 19 - Alteração na frequência de calor (Bairro Sarandi).



Fonte: Elaboração do autor

Figura 20 - Alteração na frequência de calor (Bairro Restinga).



Fonte: Elaboração do autor

## 4.5 Discussão

Neste estudo, foi realizada uma análise do campo térmico urbano em Porto Alegre por uma perspectiva espaço-temporal com auxílio da plataforma Google Earth Engine. Por meio deste recurso, conforme observado na literatura analisada para a formulação da metodologia deste trabalho, é possível realizar o processamento de uma série temporal em nuvem, desde a seleção dos dados até o processamento efetivo das imagens (ABUBAKAR et al., 2023; ZHAO et al., 2023; TAHERI et al., 2023). Além disso, ressalta-se a efetividade da plataforma na análise de dados termais, em concordância com as experiências de Ermida et al. (2020) e Wang et al. (2020), os quais desenvolveram metodologias para a estimativa de temperatura em superfície com auxílio da plataforma Google Earth Engine.

Outro ponto a se destacar são as imagens Landsat, que permitiram a análise espaço-temporal da temperatura entre 1984 e 2022. Os dados Landsat já são amplamente utilizados para este fim, como evidenciado em Estoque e Murayama (2017) e Mukherjee e Singh (2020). Essa análise integrando Google Earth Engine e as imagens Landsat nos permite revelar aspectos significativos que contribuem para uma compreensão mais profunda do clima urbano e suas implicações no planejamento urbano.

Em relação às ilhas de frescor urbanas, foram encontradas dificuldades na análise desse fenômeno via sensoriamento remoto, resultado que difere de estudos relacionados a este tema, como o de De Zorzi et al. (2017), que através de sua metodologia constatou a influência dos parques verdes na atenuação da temperatura de regiões urbanas no seu entorno. Essa discrepância pode estar relacionada à perspectiva metodológica do trabalho dos autores, pois consideraram o centro do parque como início de seu transecto de análise, ao contrário dos limites do parque. Neste trabalho, foram excluídas todas as áreas verdes da análise, o que não nos permitiu obter resultados consideráveis, devido à baixa correlação da distância euclidiana do parque mais próximo e da temperatura superficial. No entanto, é importante ressaltar que os pixels que se encontravam em áreas verdes realmente apresentaram temperaturas mais amenas quando comparados com as áreas urbanas próximas.

O processo de urbanização desigual em Porto Alegre produziu um clima urbano composto por um conjunto de mosaicos de microclimas, decorrentes da

heterogeneidade da cobertura do solo, como esperado em um ambiente urbano, conforme relatado em Heaviside et al. (2017). O Índice de Alteração da Frequência demonstrou-se uma ferramenta robusta para a análise do comportamento térmico desses microclimas em uma série temporal extensa. Dessa forma, foi possível observar uma série de alterações nos mosaicos de microclimas urbanos na área de análise, como pode ser visto na análise de menores áreas dos bairros de Porto Alegre, onde foi possível constatar situações como a área central não ter alterado sua frequência, enquanto os bairros Restinga e Sarandi expressaram uma forte alteração em sua dinâmica microclimática.

#### **4.6 Conclusão**

É possível concluir que a análise do campo térmico urbano superficial em Porto Alegre, realizada neste estudo por meio do sensoriamento remoto termal e da análise espaço-temporal dos dados de temperatura superficial, proporcionou um entendimento dos padrões e variações de temperatura na cidade. O Google Earth Engine mostrou-se como um fator crucial nessa análise, sendo a principal fonte de dados termais, compilando e processando toda a série Landsat 5 e 8. Os métodos empregados permitiram identificar variações sazonais significativas, com os meses de verão apresentando médias de temperatura mais altas em comparação com os meses de inverno. Essa diferenciação sazonal é crucial para compreender o impacto das mudanças climáticas locais na cidade.

Os métodos de análise temporal da temperatura se mostraram satisfatórios. Com o auxílio dos perfis térmicos analisados, foi possível fazer inferências sobre o comportamento da mancha urbana de Porto Alegre. Ficou evidente que no perfil A-B, ocorreram adensamentos de regiões urbanizadas distantes do centro urbano, principalmente no sentido Norte-Sul, enquanto no perfil C-D, evidenciou-se a expansão do bairro Sarandi, localizado no final do perfil.

Outro método empregado que auxiliou nesta análise foram os mapas de distribuição espacial das frequências de calor e frescor. As frequências de frescor nos indicaram principalmente as ilhas ao noroeste do município e as regiões de morros ao sul como áreas frescas. Este produto demonstrou ser eficaz ao evidenciar áreas frescas dentro do ambiente urbano. As frequências de calor confirmaram a conclusão obtida na análise dos perfis, sendo evidente que as áreas periféricas ao nordeste do

município foram expandidas e adensadas ao longo da série histórica, resultando nas maiores frequências de calor. Aparentemente, o material utilizado na construção das edificações e o adensamento das construções influenciam nessa resposta térmica.

A análise do Índice de Alteração de Frequência (IAF) permitiu sintetizar as alterações espaciais no campo térmico urbano, destacando padrões de mudança ao longo do tempo. A comparação entre os períodos analisados revelou tendências importantes. A partir dos resultados desse índice, constata-se que a região central de Porto Alegre demonstrou uma estabilidade na dinâmica térmica ao longo do tempo, já que representa uma área sem possibilidade de adensamento ou expansão. As maiores alterações são observadas nos arredores da mancha urbana original, especialmente no nordeste da cidade, como nos bairros Sarandi e Mário Quintana, e em aglomerados urbanos mais afastados da mancha urbana ao sul, como o bairro Restinga.

Com base nos resultados apresentados, concluímos que não é possível observar por sensoriamento remoto a influência das ilhas de frescor associadas às áreas verdes no entorno, considerando a baixa correlação de Pearson entre as variáveis de distância euclidiana, altimetria e desvio de temperatura. Os dados de temperatura superficial, embora úteis em modelos de temperatura do ar, mostraram limitações na captura da influência local de pixels individuais em seu entorno, o que enfatiza a importância de abordagens mais refinadas para a análise do campo térmico urbano.

Em suma, a compreensão do campo térmico urbano é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação dos efeitos das ilhas de calor nas cidades. A seleção de materiais de construção adequados, a promoção de áreas verdes e a implementação de medidas de adaptação ao clima são essenciais para garantir a sustentabilidade das cidades no contexto das mudanças climáticas globais. Este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre o clima urbano, além de destacar a importância de considerar a dinâmica térmica na formulação de políticas urbanas voltadas para a qualidade de vida da população. A utilização de tecnologias como a plataforma Google Earth Engine e o software ArcGIS 10.5 mostrou-se eficaz na análise do comportamento do campo térmico, destacando a importância da integração de ferramentas geoespaciais na investigação do clima urbano.



## Referências

- ABUBAKAR, G.A; WANG, K; KOKO, A.F; HUSSEINI, M.I; SHUKA, K.A.M; DENG, J; GAN, M. Mapping Maize Cropland and Land Cover in Semi-Arid Region in Northern Nigeria Using Machine Learning and Google Earth Engine. **Remote Sensing and Environment**. 2023.
- ABUNNASR, Yaser; MHAWEJ, Mario. Towards a combined Landsat-8 and Sentinel-2 for 10-m land surface temperature products: The Google Earth Engine monthly Ten-ST-GEE system. **Environmental Modelling & Software**, v.155, p.105456. 2022.
- BALEW, Abel; KORME, Tesfaye. Monitoring land surface temperature in Bahir Dar city and its surrounding using Landsat images. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v.23, n.3, p.371-386. 2020.
- CARDALL, A.C; HALES, R.C; Tanner, K.B; Williams, G.P. Regularization for Development of Sparse Remote-Sensing Models with Applications in Optical/ly Complex Waters Using GEE Tools. **Remote Sensing and Environment**. v.15, p.1670. 2023.
- CHANG, C.R; LI, M.H; CHANG, S.D. A Preliminary Study on the Local Cool-Island Intensity of Taipei City Parks. *Landsc. Urban Plan.* v.80, p.386–395. 2020.
- CHEN, J; WANG, L; MA, L; FAN, X. Quantifying the Scale Effect of the Relationship between Land Surface Temperature and Landscape Pattern. **Remote Sensing and Environment**. v.15, p.2131. 2023.
- CORRADINO, C; AMATO, E; TORRISI, F; Del Negro, C. Data-Driven Random Forest Models for Detecting Volcanic Hot Spots in Sentinel-2 MSI Images. **Remote Sensing and Environment**. 2022.
- DE ZORZI, LÍZIA de Moraes; SORRIBAS, Mino Viana; SILVEIRA, André Luiz Lopes. Estudo de Ilhas de Frescor Urbano em Porto Alegre - RS. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. 2017.
- ERMIDA, S.L. et al. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. **Remote Sensing and Environment**, v.2, p.1471. 2020.
- ESTOQUE, R.C; MURAYAMA, Y. Monitoring Surface Urban Heat Island Formation in a Tropical Mountain City Using Landsat Data (1987–2015). **Remote Sensing and Environment**. v.133, p.18–29. 2017.
- FAISAL, Abdullah-Al- et al. Assessing and predicting land use/land cover, land surface temperature and urban thermal field variance index using Landsat imagery for Dhaka Metropolitan area. **Environmental Challenges**, v.4. 2021.
- FENG, S; LI, W; XU, J; LIANG, T; MA, X; WANG, W; YU, H. Land Use/Land Cover Mapping Based on GEE for the Monitoring of Changes in Ecosystem Types in the

Upper Yellow River Basin over the Tibetan Plateau. **Remote Sensing and Environment**. v.14, p.5361, 2022.

FRITZSONS, E; MANTOVANI, L. E; WREGE, M. S. Os biomas e o clima das capitais do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.10, n.4, p.1152-1160, 2017.

GANEM, Khalil Ali. **Classificação da Cobertura do Solo na Caatinga a partir de Imagens do Landsat-8 e da Ferramenta Google Earth Engine: uma comparação entre dados com e sem correção atmosférica**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) —Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

GERMANO, P. J. M. M. T. **Investigação multitemporal de ilhas de calor e de frescor em Maringá, Paraná, utilizando imagens do satélite Landsat 5 – 2000 a 2010**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.

GUO, L; ZHAO, S; GAO, J; ZHANG, H; ZOU, Y; XIAO, X. A Novel Workflow for Crop Type Mapping with a Time Series of Synthetic Aperture Radar and Optical Images in the Google Earth Engine. **Remote Sensing and Environment**. v.14, p.5458. 2022.

HEAVISIDE, C; MACINTYRE, H; VARDOULAKIS, S. The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. **Current Environmental Health Reports**, v.4, p.296-305, 2017.

HOWARD, L. **The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it**. v. 3. London, 1833.

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. **NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DO BRASIL: PERÍODO 1991-2020**. Brasília - DF. 2022

JAMALI, Ali Akbar et al. Modeling relationship between land surface temperature anomaly and environmental factors using GEE and Giovanni. **Journal of Environmental Management**, v.302, p.113970. 2022.

MASOUDI, M; TAN, P.Y; LIEW, S.C. Multi-City Comparison of the Relationships between Spatial Pattern and Cooling Effect of Urban Green Spaces in Four Major Asian Cities. **Ecol. Indic.** v.98, p.200–213. 2019.

MUKHERJEE, F; SINGH, D. Assessing Land Use–Land Cover Change and Its Impact on Land Surface Temperature Using LANDSAT Data: A Comparison of Two Urban Areas in India. **Earth Syst Environ**. v. 4, p. 385–407. 2020.

OKE, T.R. et al. **Urban Climate**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017

PORTO ALEGRE, **Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental**. 2010.

RAKOTO, Y; DEILAMI, K; HURLEY, J; AMATI, M; SUN, Q. Revisiting the Cooling Effects of Urban Greening: Planning Implications of Vegetation Types and Spatial Configuration. **Urban Green**. V.64, P.127266. 2021.

ROMERO, Marta Adriana Bustos et al. **Mudanças Climáticas e Ilhas de Calor Urbanas. Brasília:** Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. 2019.

SEKERTEKIN, A; BONAFONI, S. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation. **Remote Sensing and Environment.** p.12, v.294, 2020.

SERBOUTI, I; RAJI, M; HAKDAOUI, M; EL KAMEL, F; PRADHAN, B; GITE, S; ALAMRI, A; MAULUD, K.N.A; DIKSHIT, A. Improved Lithological Map of Large Complex Semi-Arid Regions Using Spectral and Textural Datasets within Google Earth Engine and Fused Machine Learning Multi-Classifiers. **Remote Sensing and Environment.** v. 14, p. 5498. 2022.

SHAN, Y; DAI, X; LI, W; YANG, Z; WANG, Y; QU, G; LIU, W; REN, J; LI, C; LIANG, S; ZENG, B. Detecting Spatial-Temporal Changes of Urban Environment Quality by Remote Sensing-Based Ecological Indices: A Case Study in Panzhihua City, Sichuan Province, China. **Remote Sensing and Environment.** v. 14, p. 4137. 2022

SOBRINO, 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 Sensing and Environment.** v.12, p.2052. 2020.

SUN, X.; TAN, X.; CHEN, K.; SONG, S.; ZHU, X.; HOU, D. Quantifying Landscape-Metrics Impacts on Urban Green-Spaces and Water-Bodies Cooling Effect: The Study of Nanjing, China. **Urban Green.** 2020.

TAHERI DEHKORDI, A; VALADAN ZOEJ, M.J; GHASEMI, H; JAFARI, M; MEHRAN, A. Monitoring Long-Term Spatiotemporal Changes in Iran Surface Waters Using Landsat Imagery. **Remote Sensing and Environment.** v. 14, p. 4491. 2022

TAHERI QAZVINI, A; CARRION, D. A Spatiotemporal Drought Analysis Application Implemented in the Google Earth Engine and Applied to Iran as a Case Study. **Remote Sensing and Environment.** v. 15, p. 2218. 2023.

TANG, Lujia et al. Exploring the impacts of greenspace spatial patterns on land surface temperature across different urban functional zones: A case study in Wuhan metropolitan area, China. **Ecological Indicators.** v. 146, p. 109787. 2023.

TIAN, P; LIU, Y; LI, J; PU, R; CAO, L; ZHANG, H; AI, S; YANG, Y. Mapping Coastal Aquaculture Ponds of China Using Sentinel SAR Images in 2020 and Google Earth Engine. **Remote Sensing and Environment.** v. 14, p. 5372. 2022.

TIAN, L; TAO, Y; LI, M; QIAN, C; LI, T; WU, Y; REN, F. Prediction of Land Surface Temperature Considering Future Land Use Change Effects under Climate Change Scenarios in Nanjing City, China. **Remote Sensing and Environment** 2023, v. 15, p. 2914. 2023

VU, T.T.P; PHAM, T.D; SAINTILAN, N; SKIDMORE, A; LUU, H.V; VU, Q.H; LE, N.N; NGUYEN, H.Q; MATSUSHITA, B. Mapping Multi-Decadal Mangrove Extent in the

Northern Coast of Vietnam Using Landsat Time-Series Data on Google Earth Engine Platform. **Remote Sensing and Environment**. v. 14, p. 4664. 2022.

WANG, L; LU, Y; YAO, Y. Comparison of Three Algorithms for the Retrieval of Land Surface Temperature from Landsat 8 Images. **Sensors**. v. 19, p. 5049. 2019.

WANG, M et al. An Efficient Framework for Producing Landsat-Based Land Surface Temperature Data Using Google Earth Engine. *IEEE Journal of Selected Topics. Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 13, p. 4689-4701, 2020.

XIAO, X.D; DONG, L; YAN, H; YANG, N; XIONG, Y. The Influence of the Spatial Characteristics of Urban Green Space on the Urban Heat Island Effect in Suzhou Industrial Park. *Sustain. Cities Soc.* v. 40, p. 428–439. 2018.

Yan, X; Li, J; Yang, D; Li, J; Ma, T; Su, Y; Shao, J.; Zhang, R. A Random Forest Algorithm for Landsat Image Chromatic Aberration Restoration Based on GEE Cloud Platform: A Case Study of Yucatán Peninsula, Mexico. **Remote Sensing and Environment**. v. 14, p. 5154. 2022.

YANG, K; LUO, Y; LI, M; ZHONG, S; LIU, Q.; LI, X. Reconstruction of Sentinel-2 Image Time Series Using Google Earth Engine. **Remote Sensing and Environment**., v. 14, p. 4395. 2022.

ZHANG, Y; MURRAY, A.T; TURNER, B.L. Optimizing Green Space Locations to Reduce Daytime and Nighttime Urban Heat Island Effects in Phoenix, Arizona. *Landsc. Urban Plan.* v. 165, p.162–171. 2017.

ZHANG, Y; WANG, Y; DING, N; YANG, X. Assessing the Contributions of Urban Green Space Indices and Spatial Structure in Mitigating Urban Thermal Environment. **Remote Sensing and Environment**. v. 15, p. 2414. 2023.

ZHAO, Z; LI, T; ZHANG, Y; LÜ, D; WANG, C; LÜ, Y; WU, X. Spatiotemporal Patterns and Driving Factors of Ecological Vulnerability on the Qinghai-Tibet Plateau Based on the Google Earth Engine. **Remote Sensing and Environment**. v.14, p.5279. 2022.

ZHAO, L; WANG, S; XU, Y; SUN, W; SHI, L.; YANG, J.; DASH, J. Evaluating the Capability of Sentinel-1 Data in the Classification of Canola and Wheat at Different Growth Stages and in Different Years. **Remote Sensing and Environment**. v.15, p.2731. 2023.

## 5 ARTIGO 2: REGIONALIZAÇÃO TÉRMICA A PARTIR DA TEMPERATURA SUPERFICIAL E SUA RELAÇÃO COM OS SETORES CENSITÁRIOS DE PORTO ALEGRE/RS

**Resumo:** O estabelecimento da população humana em aglomerações urbanas resulta em alterações do microclima local, essas alterações não são idênticas em toda a extensão das cidades resultando em múltiplos microclimas que dependem de uma série de variáveis como das características dos lotes, planejamento, modo de vida e materiais empregados. Este artigo tem como objetivo analisar a relação entre a temperatura superficial e as variáveis socioeconômicas dos setores censitários em Porto Alegre/RS, utilizando dados de temperatura e dos censos de 2000 e 2010. A metodologia desse trabalho envolve a correlação dos dados do IBGE de Renda per capita, população absoluta e razão de sexo com dados de temperatura superficial estimados por sensoriamento remoto a partir da plataforma *Google Earth Engine*. Outra métrica aplicada nesse trabalho é o índice de autocorrelação espacial de Moran, que quantifica a dependência espacial das variáveis analisadas. A partir do índice de Moran, foi produzida uma regionalização térmica do município a partir de mapas LISA (*Local Indicators of Spatial Association*), utilizando a temperatura superficial média de cada setor censitário de 2000 e 2010. O índice de correlação linear de Pearson mais expressivo foi o entre renda e temperatura, apresentando uma correlação inversa entre temperatura e renda, com valores de -0,40 e -0,23 nos censos de 2000 e 2010, respectivamente. Em relação ao índice de Moran, a variável de temperatura obteve os maiores valores, sendo 0,75 em 2000 e 0,74 em 2010. Esses valores indicam que existe uma forte dependência espacial em relação à temperatura quando leva-se em conta os setores censitários como unidades espaciais.

**Palavras Chave:** LST; Setores censitários; GEE; autocorrelação espacial.

### 5.1 Introdução

A urbanização de Porto Alegre ao longo das décadas apresenta um cenário complexo de crescimento populacional e desenvolvimento urbano. O crescimento demográfico acelerado na segunda metade do século XX, movido por uma rápida migração das áreas rurais para o ambiente urbano. No entanto, esse crescimento não

ocorreu de maneira uniforme, resultando em desafios significativos. A criação de novos bairros e a ampliação da cidade foram acompanhadas pela emergência de problemas sociais, como a formação de núcleos habitacionais precários e a proliferação de áreas de sub-habitação, alterando assim o clima urbano local. (TROLEIS; BASSO, 2007; BARBOSA; VECCHIA, 2009; BARROS, 2016).

O clima urbano desempenha um papel de extrema importância na qualidade de vida e na sustentabilidade das cidades. A climatologia urbana investiga como as características do ambiente urbano, como edifícios, ruas e espaços verdes, influenciam o clima local, impactando diretamente a saúde e o bem-estar dos habitantes (ANDRADE, 2004). Um fenômeno significativo nesse contexto é a ilha de calor urbana, onde as temperaturas nas áreas urbanas são mais elevadas do que nas áreas adjacentes. Esse fenômeno é resultado da absorção de calor pelos materiais urbanos, como concreto e asfalto, combinado com a redução de vegetação e espaços verdes. Minimizar a ilha de calor tornou-se um objetivo primordial no planejamento urbano sustentável, envolvendo estratégias como o aumento de áreas verdes, a utilização de materiais refletivos e a redução do consumo energético para o controle climático (MASSON et al., 2020).

A plataforma Google Earth Engine (GEE) pode ser utilizada para realizar análises climáticas massivas via processamento em nuvem, a partir de dados de sensores que captam o comprimento de onda do infravermelho termal. Esses dados são cruciais para análises da temperatura superficial. Estudos recentes têm contribuído para a compreensão das ilhas de calor urbanas, analisando a relação entre áreas urbanas e mudanças de uso e cobertura da terra, destacando a importância do monitoramento contínuo e da análise histórica desses fenômenos (ROMERO et al., 2019; SOBRINO; IRAKULIS, 2020; ESTOQUE; MURAYAMA, 2017; MUKHERJEE; SINGH, 2020; FAISAL et al., 2021; BALEW; KORME, 2020; SEKERTEKIN; BONAFONI, 2020; TIAN et al., 2023; CHEN et al., 2023).

Os censos promovidos pelo IBGE são uma grande fonte de dados estatísticos especializados, que permitem compreender a dinâmica populacional do país. Esses dados são amplamente utilizados em pesquisas científicas, muitas vezes associados a outros dados espaciais (OLIVEIRA; SIMÕES, 1989). Cavenaghi e Alves (2013), por sua vez, investigaram a precisão das estimativas de fecundidade a partir do censo de 2010, evidenciando problemas de subnumeração diferencial por idade. Cunha (2012)

ênfatiou a relevância dos censos na compreensão da mobilidade espacial no Brasil, com foco na migração. Esses estudos demonstram a importância vital dos censos do IBGE como uma fonte fundamental para a pesquisa demográfica e socioeconômica no Brasil, fornecendo informações valiosas sobre a dinâmica populacional e suas complexas interações com fatores socioeconômicos e educacionais. Assim, eles atestam a relevância do censo demográfico do IBGE como uma fonte de dados indispensável para pesquisas acadêmicas, abordando diversos aspectos da população brasileira.

Os impactos ambientais das mudanças climáticas tendem a causar grandes alterações na dinâmica de vida humana. Essas mudanças têm maior ou menor impacto dependendo das características da população. A população de maior renda geralmente tem acesso a mais recursos para se adaptar a essas mudanças, enquanto a população em situação de vulnerabilidade econômica enfrenta dificuldades para acessar recursos essenciais, como alimentos, segurança e moradias preparadas para temperaturas elevadas. Isso destaca a desigualdade climática em nossa sociedade, que tende a se agravar nas próximas décadas (MILANEZ; FONSECA, 2011). Os danos causados às populações vulneráveis resultam em um longo período de recuperação e contribuem para o aprofundamento da pobreza em sociedades já desiguais. A saúde é outra área em que as populações vulneráveis sofrem mais intensamente, já que dependem exclusivamente de sistemas públicos de saúde, quando disponíveis (MASSAÚ; BERTOLDI, 2022).

Doenças infecciosas e parasitárias são maximizadas em condições de temperaturas elevadas, como dengue e malária, devido à reprodução acelerada dos mosquitos e melhores condições de sobrevivência. As doenças diarreicas se agravam com o aumento da temperatura, resultando em mais hospitalizações, especialmente entre menores de 5 anos. Temperaturas elevadas podem sobrecarregar os sistemas circulatório e respiratório, além de influenciar negativamente na gravidez e na recuperação de mulheres no puerpério. Além das doenças físicas, transtornos mentais e comportamentais são influenciados pelo calor, como transtorno bipolar, depressão e esquizofrenia, a temperatura têm forte correlação com índices de suicídio em regiões mais quentes (SILVA; PROCOPIO, 2024).

Este artigo tem como objetivo analisar como as variáveis socioeconômicas dos censos de 2000 e 2010 se relacionam com a temperatura superficial do espaço urbano

no município de Porto Alegre. Como objetivos específicos, tem-se primeiramente a análise espacial da distribuição das variáveis de renda, população e gênero e sua correlação com índices térmicos. O segundo objetivo específico é calcular a autocorrelação espacial a partir do índice de Moran em relação à temperatura superficial dos setores e aos dados dos censos. O terceiro objetivo específico é a produção de mapas LISA (Índice Local de Associação Espacial), buscando regionalizar a temperatura superficial dos setores e realizar uma análise de suas variáveis socioeconômicas, com o objetivo de compreender as características dos habitantes das regiões quentes e das regiões mais frescas do município de Porto Alegre.

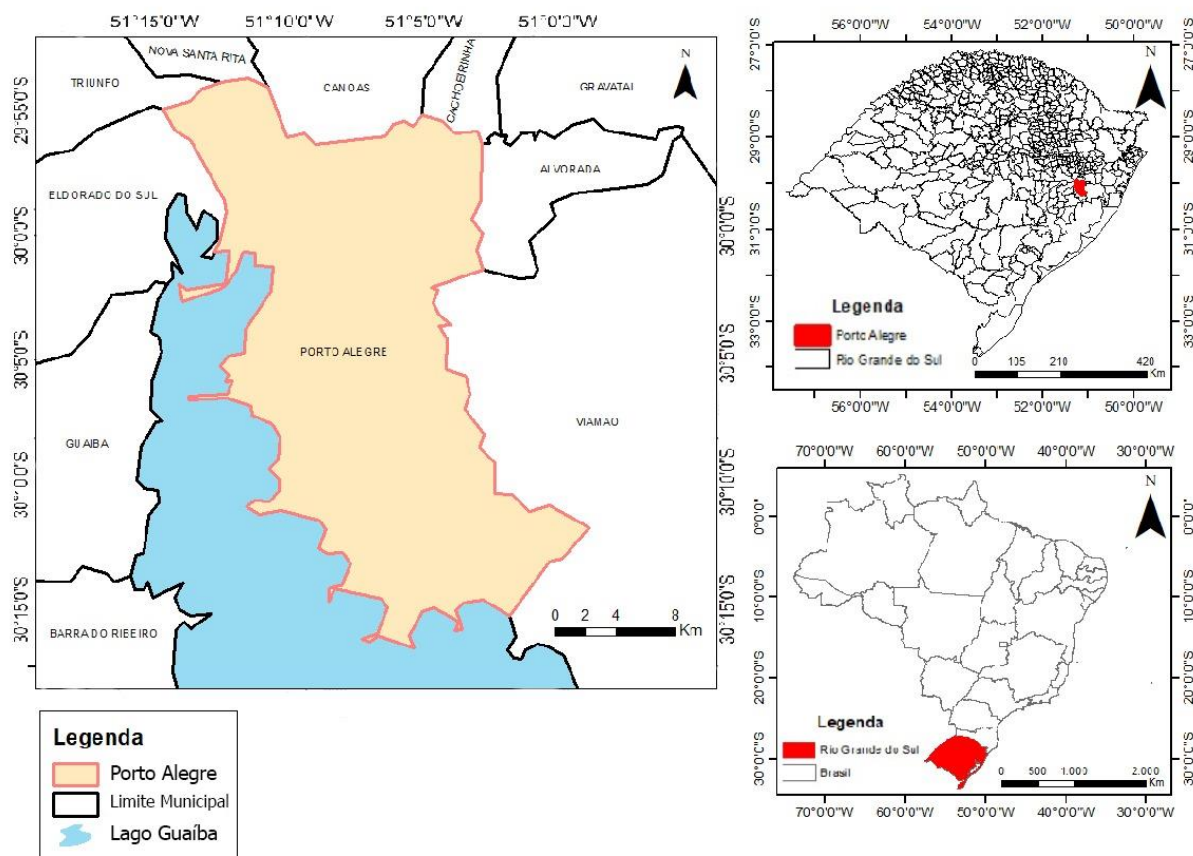
## **5.2 Área de estudo**

Porto Alegre, reconhecida como a maior aglomeração urbana do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, ocupa uma localização geográfica na região sul do país, junto às margens do lago Guaíba. Abrangendo uma área aproximada de 496,8 km<sup>2</sup>. O clima predominante em Porto Alegre é classificado como subtropical úmido com influência marítima, enquadrando-se na classificação Köppen-Geiger como Cfa. Vale destacar que a cidade registra uma temperatura média anual de 19,7°C (FRITZSONS; MANTOVANI; WREGE, 2017). Geograficamente, a cidade está posicionada nas coordenadas 30° 01' 58" S 51° 13' 48" O, possibilitando uma conexão direta com o Lago Guaíba, o que confere à cidade uma centralidade econômica.

O número de habitantes contabilizados no último censo, em 2022, é de 1.332.570. Destaca-se a densidade demográfica, que atinge 2.689,94 indivíduos por Km<sup>2</sup> (IBGE, 2012). Contextualizando ainda o ambiente demográfico, é reportado um Índice de Desenvolvimento Humano (IDHM) de 0,80, calculado em 2012 (IBGE, 2012). A extensão urbanizada do município abrange uma área de 214,91 km<sup>2</sup> (IBGE, 2019) Em uma perspectiva regional, a influência do município abrange o Arranjo Populacional de Porto Alegre/RS - Metrópole (1C) (IBGE, 2015). Esses parâmetros essenciais formam a base para investigações analíticas subsequentes, em consonância com fontes autorizadas como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).



Figura 21 - Mapa de Localização de Porto Alegre/RS

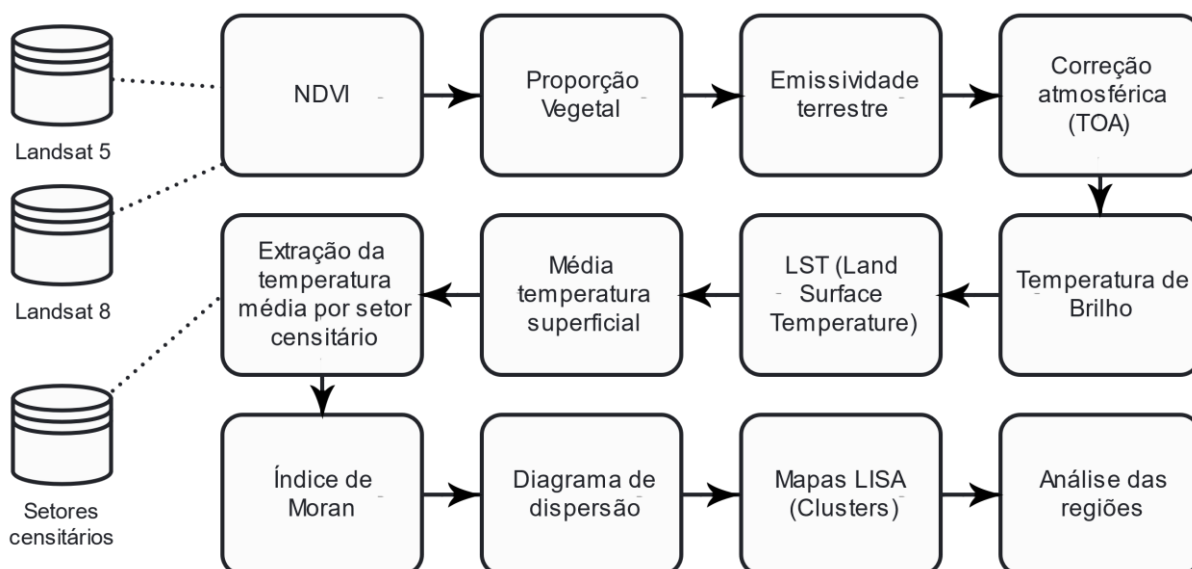


Fonte: Elaboração do autor

### 5.3 Metodologia

A metodologia representada na Figura 22 deste trabalho foi dividida em três etapas principais. Na primeira etapa, são detalhados os dados utilizados no estudo além das ferramentas e softwares utilizados. A segunda etapa apresenta a metodologia utilizada para estimar a temperatura superficial da superfície terrestre a partir das imagens de satélite, posteriormente, são descritos os passos para transferir os dados para o *software ArcGIS 10.5*, calcular a média da Temperatura de Superfície Terrestre (LST) e determinar os desvios de temperatura para cada pixel nas imagens. Na terceira etapa são apresentados os passos para calcular o Índice de Moran e gerar mapas LISA para analisar a autocorrelação espacial das variáveis de interesse, como temperatura superficial e variáveis socioeconômicas.

Figura 22 - Fluxograma de metodologia Artigo 2



Fonte: Elaboração do autor.

### 5.3.1 Dados e programas

As imagens utilizadas neste trabalho são provenientes dos satélites *Landsat 5* e *Landsat 8*, nas categorias *Tier 2* e *Collection 2*, com as órbitas ponto 221 e a 81. As imagens foram adquiridas nos intervalos de anos de 1997 a 2003 e de 2007 a 2013. Essa seleção de anos foi baseada em uma janela de 7 anos, considerando as datas dos censos de 2000 e 2010 dos sensores TM, OLI e TIRS. Os materiais essenciais para a condução deste estudo incluem diversos *shapefiles* utilizados nos processamentos. O *shapefile* da área de análise abrange toda a extensão do município de Porto Alegre e suas imediações. Além, dos *shapefiles* dos setores censitários dos censos de 2000 e 2010, associados aos dados agregados por setores censitários, que contêm os dados brutos do censo.

Outro recurso empregado foi a plataforma *Google Earth Engine* e seu ambiente de codificação, conhecido como *Code Editor*, onde é possível acessar bibliotecas de imagens termais via satélite. Além disso, o *software ArcGIS 10.5* foi empregado para processar os dados obtidos do *Google Earth Engine*. O recurso módulo de construção de modelos do *ArcGIS 10.5* desempenhou um papel fundamental na realização no processamento em grande escala, permitindo a criação de fluxos de trabalho automatizados para a manipulação e processamento dos dados. Para análise dos dados obtidos, o *software Excel* foi utilizado para conduzir análises estatísticas. Para

análises espaciais, foi adotado o *software Geoda*, que possibilita o cálculo do índice de Moran e a elaboração de mapas LISA, ampliando o escopo das análises realizadas.

### 5.3.2 Estimativa de temperatura superficial

Calcular a emissividade da superfície terrestre é fundamental para compreender a capacidade de liberar energia por meio de radiação a partir do pixel. Essa estimativa será realizada para cada data examinada no estudo. O primeiro passo foi processar o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Esse cálculo utilizou as bandas do infravermelho próximo e do vermelho. O NDVI é então usado para calcular a proporção de vegetação, levando em conta os valores mínimos e máximos do NDVI. A partir dos dados de proporção de vegetação, é possível estimar a emissividade da superfície terrestre.

Continuando com a abordagem metodológica, o passo subsequente envolve a realização dos processamentos nas bandas térmicas dos sensores, especificamente a banda 6 do *Landsat 5* e a banda 10 do *Landsat 8*. As imagens utilizadas são as que não possuem cobertura de nuvens, já corrigidas em Termos de Refletância de Superfície (TOA) fornecidas pelas bibliotecas do *Google Earth Engine* (Jesus, 2017). As imagens originalmente expressas em radiância espectral ( $L\lambda$ ) no topo da atmosfera foram transformadas em Temperatura de Brilho do Satélite (T) conforme a Equação 1. Por fim, é necessário calcular a Temperatura de Brilho (T), resultado da Equação 2 que se baseia constante de Planck e na constante de Boltzmann para estimar a temperatura superficial.

$$T = K2 / \ln(K1 / L\lambda + 1) \quad (1)$$

Em que: T = Temperatura de brilho do satélite em Kelvin (K);  $L\lambda$  = Radiância espectral no topo da atmosfera; K1 = Conversão térmica específica da banda K1 K2 = Conversão térmica específica da banda K2.

$$LST = T / (1 + W * (T/p) * \ln(e)) \quad (2)$$

Em que: LST = Temperatura de superfície; T = Temperatura de brilho Kelvin (K); W = Comprimento de onda da radiação emitida (11.5  $\mu$ m); p =  $h * C / S$  (1.438 \* 10<sup>-2</sup> mk); h = constante de Planck (6.626 \* 10<sup>-34</sup> Js); s = Constante de Boltzmann (1.38 \* 10<sup>-23</sup> J/K); C = Velocidade da luz (2.998 \* 10<sup>8</sup> m/s); p = 14380.

A próxima etapa consistiu na transferência dos arquivos de interesse para o ambiente do *software ArcGIS 10.5*, onde foi utilizado o módulo de construção de modelos, uma ferramenta que desempenha um papel crucial na simplificação e organização das operações subsequentes. Uma vez os dados importados, foi efetuado o cálculo da média da Temperatura de Superfície Terrestre (LST) para cada imagem termal nas datas de interesse. Prosseguindo, a análise avançou para a determinação dos desvios de temperatura para cada pixel nas imagens, comparados à média estabelecida. Isso foi concretizado por meio de operações de subtração entre os valores térmicos de cada pixel e a média calculada por data. Os resultados desse cálculo elucidaram a magnitude das disparidades térmicas em relação à média, contribuindo para um entendimento mais profundo dos padrões térmicos e suas implicações na região em análise.

### 5.3.3 Índice de Moran e mapas LISA

O próximo passo da metodologia foi a extração dos valores de temperatura superficial média dos setores e o cálculo do desvio padrão média de cada setor para cada data de captação. Para isso, foi utilizado a ferramenta módulo de construção de modelos. A partir do resultado desse processo, foi calculada a temperatura média do setor utilizando a janela de 7 anos do ano do censo. Assim, calcula-se a correlação entre os dados de temperatura e os dados socioeconômicos dos censos.

O próximo passo da pesquisa consiste no cálculo do índice de Moran para as variáveis analisadas, que incluem renda, gênero, população e temperatura superficial. O índice de Moran é uma ferramenta aplicada aos dados com o propósito de compreender se o conjunto apresenta um padrão de associação espacial quando se trata de variáveis não aleatórias. O índice de Moran tem como hipótese nula a independência espacial, o resultado igual a 0 indica que os dados não têm relação espacial em sua distribuição, valores positivos indicam correlação direta e valores negativos indicam correlação inversa. Para este estudo, foi utilizado o método Queen de primeira ordem para determinar as matrizes de pesos espaciais. A fórmula do índice de Moran está expressa na Equação 3 (ALMEIDA, 2012; CÂMARA *et al.*, 2004).

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z^2} \quad (3)$$

Em que:  $I$  = índice de Moran;  $n$  é o número de unidades espaciais,  $z$  é a variável de interesse padronizada, e  $Wz$  representa os valores médios da variável de interesse padronizada nos vizinhos,  $W$ . O elemento  $w_{ij}$  representa o peso espacial para o par de unidades espaciais  $i$  e  $j$ , medindo o grau de interação

Para a análise de autocorrelação espacial, foi utilizado o diagrama de dispersão de Moran via *software Geoda*, esse diagrama apresenta quatro classificações de associação linear espacial, sendo elas:

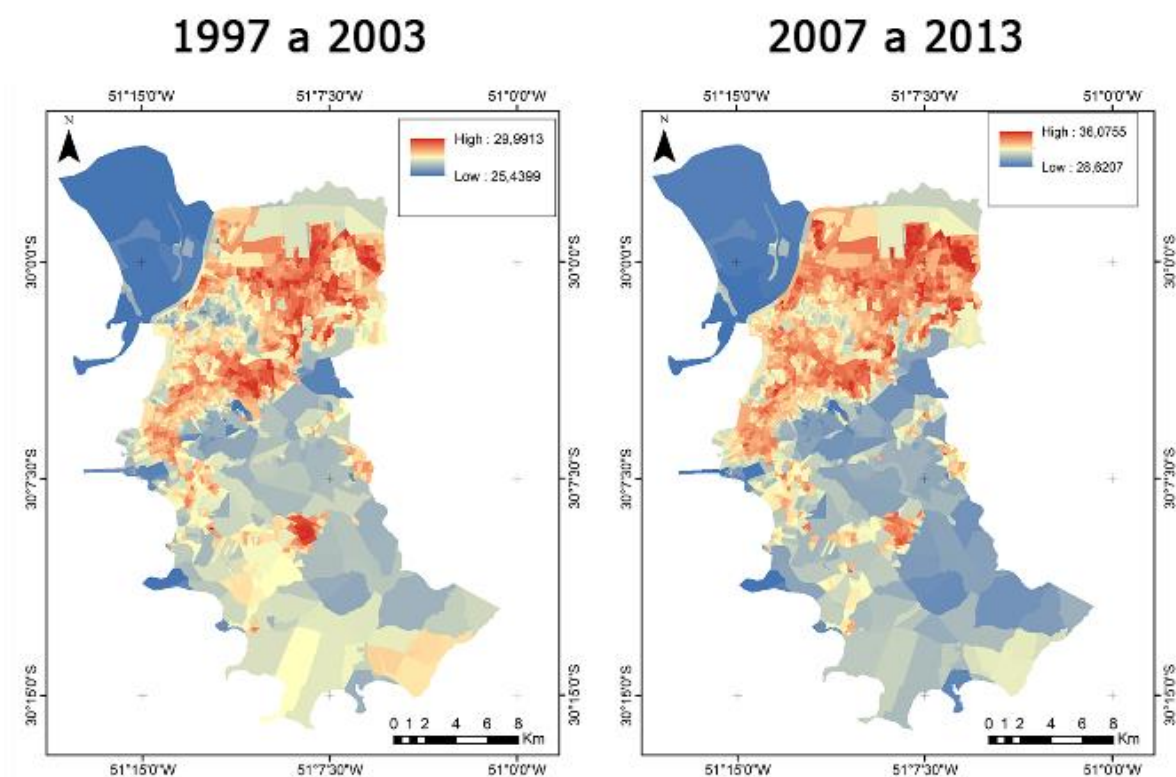
1. **Alto-Alto:** agrupa unidades espaciais onde a variável de interesse apresenta valores altos e tem unidades vizinhas com valores altos (ALMEIDA, 2012).
2. **Baixo-Baixo:** agrupa unidades espaciais onde a variável de interesse apresenta valores baixos e tem unidades vizinhas com valores baixos (ALMEIDA, 2012).
3. **Alto-Baixo:** agrupa unidades espaciais onde a variável de interesse apresenta valores altos e tem unidades vizinhas com valores baixos (ALMEIDA, 2012).
4. **Baixo-Alto:** agrupa unidades espaciais onde a variável de interesse apresenta valores baixos e tem unidades vizinhas com valores altos (ALMEIDA, 2012).

Buscando promover uma regionalização térmica, foi utilizado o *software Geoda* para processar mapas LISA que buscam identificar padrões locais a partir de clusters que seguem o diagrama de dispersão de Moran. Para isso, foram processados os valores de média de temperatura dos dois períodos processados anteriormente, utilizando o método de *Univariate Local Moran's I* com uma significância de 95% em relação a autocorrelação espacial das variáveis com o intuito de identificar os *clusters*. Após o processamento dos *clusters*, foram selecionados os que tiverem maior relevância para uma análise do comportamento socioeconômico, buscando entender o comportamento dessas variáveis nas áreas mais quentes e mais frescas da cidade a partir dos valores médios, mínimos e máximos das variáveis de renda, gênero e população absoluta dos setores que compõem essas regiões (VERDANA *et al.*, 2019).

## 5.4 Resultados

O primeiro resultado apresentado neste trabalho é o mapa da temperatura média nos setores censitários ilustrado na Figura 23. O mapa que considera os dados do censo dos anos 2000, utiliza o período de 1997 a 2003 para o cálculo da média, analisando os valores menores em comparação com o mapa que leva em conta o período de 2007 a 2013, referente ao censo de 2010. É interessante notar que a região central no mapa do censo de 2000 apresenta uma temperatura mais amena em comparação com a mesma região no mapa de 2010. As regiões periféricas expandiram-se e densificaram-se durante o segundo de análise, resultando em temperaturas mais elevadas, especialmente na região nordeste do município.

Figura 23 - Mapa de Temperatura superficial média dos anos de 1997 a 2003 e 2007 a 2013 por setor no município de Porto Alegre



Fonte: Elaboração do autor

Outro resultado extraído, foi o coeficiente de correlação da temperatura e variáveis socioeconômicas dos censos. A variável que apresentou o menor valor no coeficiente foi a razão sexual, com valores muito próximos de 0. Entre as variáveis, ela possui a distribuição mais dispersa, o que pode justificar esse resultado. A

população absoluta teve uma redução em sua correlação com a temperatura ao comparar os censos de 2000 e 2010, passando de 0,14 para 0,01, isso pode estar relacionado a alterações na dinâmica populacional do município. A variável de renda, apesar de também ter sofrido uma redução em sua correlação, ainda apresenta valores que indicam uma correlação negativa moderada. Isso nos permite afirmar que, de modo geral, que nos setores cuja população residente possui maior renda, a temperatura superficial tende a ser mais baixa, por consequência as populações mais vulneráveis estão alocadas nas regiões com maiores temperaturas. Os resultados da correlação podem ser observados no Quadro 2.

Quadro 2 - correlação da temperatura com as variáveis de renda, razão de sexo e população no município de Porto Alegre/RS

<b>Variáveis</b>	<b>Coefficiente de Correlação</b>
Renda/Temperatura	-0,40
População/Temperatura	0,14
Razão sexual/Temperatura	-0,01
Renda/Temperatura	-0,23
População/Temperatura	0,01
Razão sexual/Temperatura	0,01

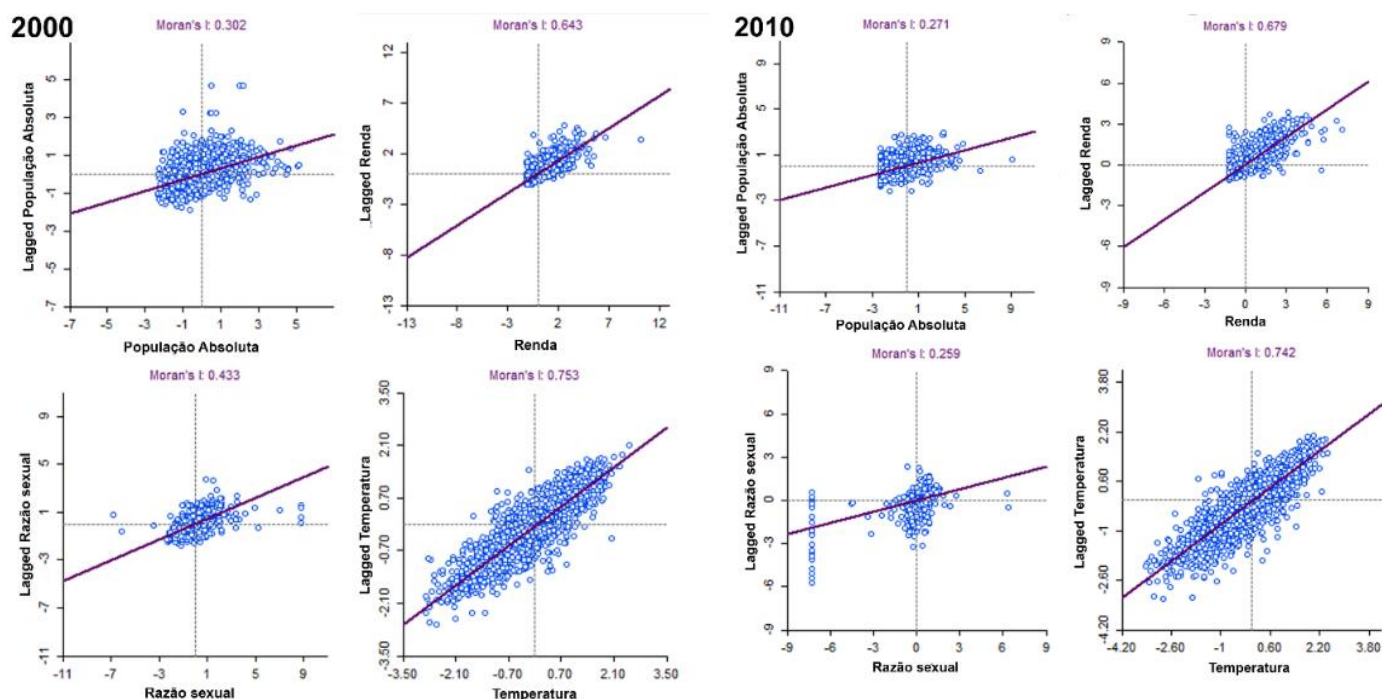
Fonte: Elaboração do autor

O índice de autocorrelação de Moran foi aplicado às variáveis analisadas, com o objetivo de compreender a dependência espacial dessas métricas nos censos de 2000 e 2010. A Figura 24, representa o índice de Moran e a distribuição de cada conjunto de dados no diagrama de dispersão de Moran. Todos os conjuntos apresentaram valores positivos, o que indica que em todos os casos, eles apresentam dependência espacial.

A variável de renda obteve resultados muito próximos nos censos de 2000, com um valor de 0,64, e em 2010, com um valor de 0,67. Esses valores indicam uma alta autocorrelação espacial na distribuição da renda. As variáveis de população absoluta e razão de sexo apresentaram valores menos expressivos. A variável de população obteve valores de 0,30 e 0,27 nos censos de 2000 e 2010, respectivamente, enquanto a variável de razão de sexo apresentou valores de 0,43 e 0,25. Essas alterações podem indicar mudanças na dinâmica de distribuição espacial da população. A variável de temperatura obteve os maiores valores de autocorrelação espacial, sendo

0,75 em 2000 e 0,74 em 2010. Esses valores em relação à temperatura indicam que existe uma forte dependência espacial na variável de temperatura quando leva-se em conta os setores censitários como unidades espaciais.

Figura 24 - Diagrama de dispersão de Moran das variáveis de razão sexual, renda, população absoluta e temperatura dos censos de 2000 e 2010 do município de Porto Alegre/RS



Fonte: Elaboração do Autor

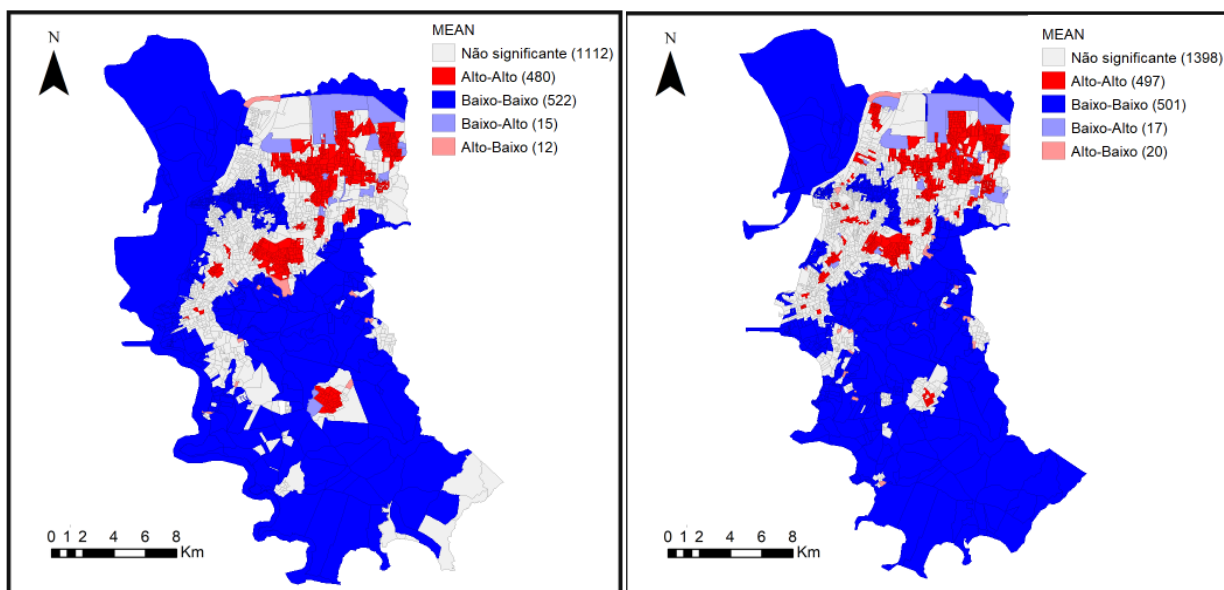
Baseando-se no índice de Moran extraído das variáveis, foi produzido um mapa LISA referente à variável de temperatura para cada censo analisado, que pode ser observado nas Figuras 25 e 26. Ambos os mapas têm em seu entorno uma grande região azul que representa o quartil Baixo-Baixo do diagrama de dispersão, englobando os setores que apresentam grande extensão e têm uma presença dominante de água e/ou vegetação em sua cobertura. Ainda sobre os clusters Baixo-Baixo, a região central de Porto Alegre em 2000, representa um grande *cluster*, e em 2010 ele se divide em dois. Os *clusters* Alto-Alto nos mostram as regiões mais quentes. O maior deles está localizado na região nordeste, que é composta tanto bairros periféricos como bairros de alto padrão, esse *cluster* está presente em ambos os mapas LISA. Outros dois *clusters* que se assemelham muito ao da região nordeste, são o da Restinga, que fica distante da mancha urbana central representando um importante aglomerado urbano, e o cluster localizado ao sul da mancha urbana



composto quase integralmente pela Vila João Pessoa. Os *clusters* mencionados podem ser melhor localizados na Figuras 27 e 28.

Figura 26 - Mapa LISA da temperatura média por setor do censo 2000

Figura 25 - Mapa LISA da temperatura média por setor do censo 2010



Fonte: Elaboração do Autor

Analisando as variáveis socioeconômicas dos clusters, é possível avaliar a composição de sua população. Em relação ao censo de 2000, o cluster com maior temperatura é o Alto-Alto Restinga, que apresenta temperatura média de 29,17 °C, e menor renda per capita média entre os clusters, sendo de R\$ 135. Por outro lado, o cluster com as menores temperaturas é o Baixo-Baixo Centro, com 26,91 °C, apresenta a maior renda média entre os clusters analisados para o censo de 2000, com R\$ 1163, além de ter o menor valor de razão de sexo, equivalente a 78,07. O cluster Alto-Alto Nordeste, que é o de maior extensão, apresentou um padrão semelhante ao cluster de temperaturas mais altas, e renda mais baixa, com valores de temperatura e renda de 28,86 °C e R\$ 357, respectivamente. Enquanto o cluster Alto-Alto Sudeste apresentou os maiores valores de razão de sexo, com 89,76, e a segunda maior temperatura entre os avaliados.

No censo de 2010, os clusters Baixo-Baixo Centro Leste e Baixo-Baixo Centro Oeste apresentam um padrão semelhante ao Baixo-Baixo Centro de 2000, com as menores temperaturas médias, sendo 31,86 °C e 31,68 °C, respectivamente. Eles também possuem as maiores rendas médias, com R\$ 3413,31 e R\$ 6936,11, e os menores valores de razão sexual, com 81,64 e 80,39, além das menores populações, com 418,60 e 519,55. O cluster com a maior temperatura é o Alto-Alto Nordeste, com 34,42 °C, e o Alto-Alto Sudeste de 2010, com 34,2 °C. Ambos apresentam os valores mais altos de razão sexual, com 86,25 e 86,77, respectivamente. O cluster Alto-Alto Restinga apresenta uma temperatura muito próxima, com 34,03 °C, e uma renda média de R\$ 828,61. Essa análise nos evidenciam alguns pontos importantes para a avaliação da população nas diferentes regiões do município, primeiramente, a renda é evidentemente menor nas regiões mais quentes da cidade, como esperado.

Figura 27 - Mapa de localização dos clusters 2000

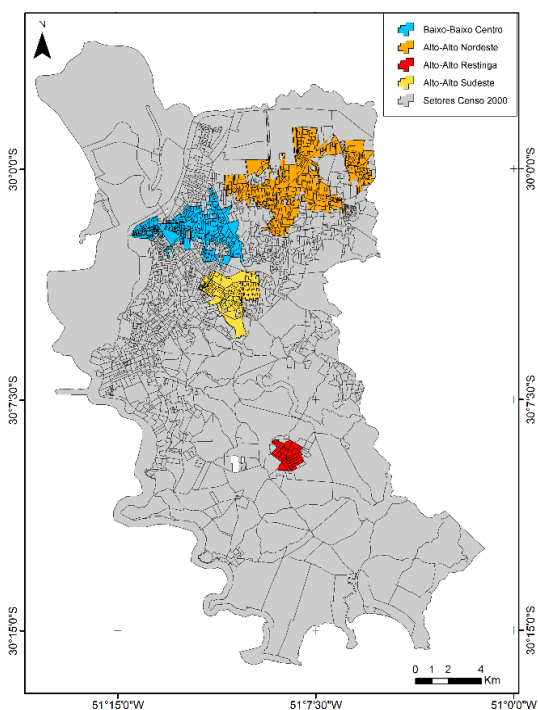
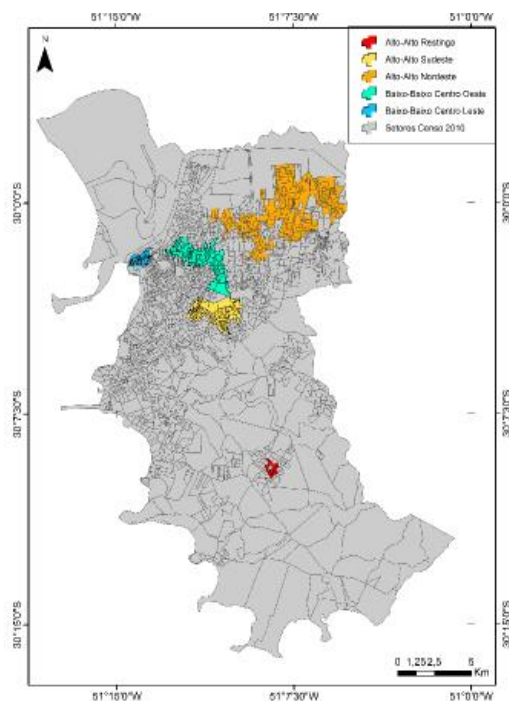


Figura 28 - Mapa de localização dos clusters 2010



Fonte: Elaboração do autor

## 5.5 Discussão

Alterações na dinâmica climática nas cidades atreladas as mudanças climáticas a nível global tendem a afetar a humana de maneira geral, porém alguns grupos sofrerão mais com as consequências dessas alterações especialmente as populações

em vulnerabilidade econômica. Visando isso a regionalização térmica é uma ferramenta importante para a compreensão dos padrões térmicos da cidade quando atrelada a dados socioeconômicos da população.

A partir da metodologia desenvolvida para esse trabalho objetiva-se preencher essa lacuna no planejamento climático urbano. Diversos trabalhos utilizam os mapas Lisa para analisar a temperatura superficial como pode ser visto em Da Majumdar *et al.*, (2016) e Portela *et al.*, (2020), porém os não sugerem regionalizações a partir dos resultados obtidos ou relacionam com os dados socioeconômicos. O *Google Earth Engine*, utilizado para montar a série histórica de imagens de temperatura superficial, se mostrou uma ferramenta efetiva para essa atividade poupando capacidade de processamento e tempo.

O índice de correlação linear de Pearson e as análises estatísticas das regiões analisadas demonstraram que a renda e temperatura tem uma correlação inversa demonstrando que a população em vulnerabilidade econômica lida com as maiores temperaturas superficiais. Considerando as observações sobre as sub-habitações de Troleis e Basso (2007) no município de Porto Alegre, onde 23,38% da população reside em habitações sem as mínimas condições de moradia, fato mais alarmante considerando os resultados deste trabalho, tendo em vista que esse público que vive em sub-habitações majoritariamente reside nas áreas onde se encontram as maiores temperaturas do município.

Esses fatos maximizam a preocupação a desigualdade climática no município, que como visto em Massaú e Bertoldi (2022) e Milanez e Fonseca (2012), atinge com maior impacto a população em vulnerabilidade econômica, considerando as dificuldades de acesso a moradias preparadas para temperaturas elevadas, as populações de baixa renda além de sofrer mais com as alterações climáticas tem longo período de recuperação dos danos, assim contribuindo para o agravamento da pobreza.

## **5.6 Conclusão**

Considerando os resultados obtidos conclui-se que foi possível analisar os padrões térmicos da cidade e sua relação com as variáveis socioeconômicas analisadas, renda per capita, população absoluta e razão de sexo provenientes dos censos censitários de 2000 e 2010 do IBGE. A partir dos dados resultantes, foi

possível observar que a temperatura varia significativamente em diferentes áreas da cidade, a região central de Porto Alegre, demonstrou-se como uma região fresca nos dois períodos analisados, já bairros periféricos como a Restinga, o norte do bairro Sarandi e a Vila João Pessoa foram compreendidos com as regiões mais quentes. Esses resultados demonstram a efetividade do *Google Earth Engine* na regionalização térmica, quando empregado com o *Software Geoda*.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, chegou-se a constatação que há relação entre temperatura superficial e renda per capita, considerando a correlação inversa entre renda e temperatura. Isso sugere que populações em vulnerabilidade econômica enfrentam temperaturas superficiais mais elevadas. Mudanças microclimáticas locais estão alterando a dinâmica climática urbana, o que impactará a humanidade de forma geral, mas com consequências mais severas para grupos economicamente vulneráveis. Outro fator que está relacionado a temperatura superficial é a população absoluta. Foi observado que as áreas com maior população absoluta apresentam temperaturas mais elevadas, o que pode ser explicado pelo adensamento e verticalização das estruturas urbanas

A partir dos resultados nota-se que a análise das variáveis socioeconômicas dos clusters nos censos de 2000 e 2010 permitiu identificar padrões de composição da população em diferentes regiões. Esses clusters revelaram variações significativas na temperatura, renda, razão de sexo e população, proporcionando uma visão mais detalhada das características socioeconômicas das áreas estudadas. Essa abordagem clusterizada pode ser útil para orientar políticas públicas e estratégias de desenvolvimento em áreas específicas, levando em consideração as particularidades de cada região em termos de clima e demografia. Em resumo, essa análise espacial por meio de uma regionalização térmica com auxílio do *Google Earth Engine* oferece uma visão abrangente das dinâmicas socioeconômicas e climáticas ao longo do tempo e pode ser uma ferramenta valiosa para o planejamento e tomada de decisões em nível local.

## Referências

ALVES, Eustáquio Diniz; CAVENAGHI, Marta. Indicadores de desigualdade de gênero no Brasil. Mediações - **Revista de Ciências Sociais**, Londrina, v. 18, n. 1, p. 83–105, 2013.

- ANDRADE, H. O clima urbano – Natureza, Escalas de Análise e Aplicabilidade. **Ambiente Construído, Clima Urbano, Utilização Racional de Energia**. Lisboa, 2004.
- CALDAS, A. D. R; SANTOS, R. V; BORGES, G. M; VALENTE, J. G; PORTELA, M. C; MARINHO, G. L. Mortalidade infantil segundo cor ou raça com base no Censo Demográfico de 2010 e nos sistemas nacionais de informação em saúde no Brasil. **Cadernos De Saúde Pública**, v. 33(7), p. e00046516. 2017.
- BARBOSA, Ricardo Victor Rodrigues; VECCHIA, Francisco Arthur Da Silva. Estudos De Ilha De Calor Urbana Por Meio De Imagens Do Landsat 7 Etm+: Estudo De Caso Em São Carlos (SP). **Revista Minerva**, São Carlos, v. 6, n. 3, p. 273-278. 2009.
- BARROS, Hugo Rogério De. **A Relação Entre Ilha De Calor Urbana, O Uso E Cobertura Do Solo E O Balanço De Energia No Município De São Paulo: Avaliação Do Campo Térmico Nos Parques Públicos De Lazer**. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- CAMPOS, M. B. de; ESTANISLAU, B. R. Demografia dos povos indígenas: os Censos Demográficos como ponto de vista. **Revista Brasileira De Estudos De População**, v. 33(2), p. 441–449. 2016.
- CAMPOS-TABERNER, M; MORENO-MARTÍNEZ, Á; GARCÍA-HARO, F.J; CAMPS-VALLS, G; ROBINSON, N.P; KATTGE, J; RUNNING, S.W. Global Estimation of Biophysical Variables from Google Earth Engine Platform. **Remote Sensing and Environment**. v. 10, p. 1167. 2018.
- CUNHA, J. M. P. da. Retratos da mobilidade espacial no Brasil: os censos demográficos como fonte de dados. REMHU. **Revista Interdisciplinar Da Mobilidade Humana**, v. 20(39), p. 29–50. 2012.
- DAS MAJUMDAR, Dipanjan; BISWAS, Atrayee. Quantifying land surface temperature change from LISA clusters: An alternative approach to identifying urban land use transformation. **Landscape and Urban Planning**. v. 153, p. 51-65. 2016
- GOLDBLATT, R; RIVERA BALLESTEROS, A; BURNEY, J. High Spatial Resolution Visual Band Imagery Outperforms Medium Resolution Spectral Imagery for Ecosystem Assessment in the Semi-Arid Brazilian Sertão. **Remote Sensing and Environment**. v. 9, p. 1336. 2017.
- IBGE. **Arranjos populacionais e concentrações urbanas no Brasil**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2016
- KUMAR, L; MUTANGA, O. Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential. **Remote Sensing and Environment**. v. 10, p. 1509. 2018.
- LOBO, F.D.L et al. Mapping Mining Areas in the Brazilian Amazon Using MSI/Sentinel-2 Imagery. **Remote Sensing and Environment**. v. 10, p. 1178. 2018.

MARKERT, K.N et al. Historical and Operational Monitoring of Surface Sediments in the Lower Mekong Basin Using Landsat and Google Earth Engine Cloud Computing. **Remote Sensing and Environment**. v. 10, p. 909. 2018.

MATEO-GARCÍA, G; GÓMEZ-CHOVA, L; AMORÓS-LÓPEZ, J; MUÑOZ-MARÍ, J; CAMPS-VALLS, G. Multitemporal Cloud Masking in the Google Earth Engine. **Remote Sensing and Environment**. v. 10, p. 1079. 2018.

MASSAÚ, G; BERTOLDI, M. Solidariedade ambiental: entre mudanças climáticas e desigualdade. **Araucária**. v. 24, n. 51. 2022.

MILANEZ, B; FONSECA, I. F. Justiça Climática E Eventos Climáticos Extremos: Uma Análise Da Percepção Social No Brasil. **Revista Terceiro Incluído**, Goiânia, v. 1, n. 2, p. 82–100. 2011.

PARENTE, L; FERREIRA, L. Assessing the Spatial and Occupation Dynamics of the Brazilian Pasturelands Based on the Automated Classification of MODIS Images from 2000 to 2016. **Remote Sensing and Environment**. v. 10, p. 606. 2018.

POORTINGA, A; CLINTON, N; SAAH, D; CUTTER, P; CHISHTIE, F; MARKERT, K.N; ANDERSON, E.R; TROY, A; FENN, M; TRAN, L.H. An Operational Before-After-Control-Impact (BACI) Designed Platform for Vegetation Monitoring at Planetary Scale. **Remote Sensing and Environment**. v. 10, p. 760. 2018.

PORTELA, Carina Inácio; MASSI, Klécia Gili. RODRIGUES, Thanan, ALCÂNTARA Enner. Impact of urban and industrial features on land surface temperature: Evidences from satellite thermal indices. **Sustainable Cities and Society**. v. 56. 2020.

RIGOTTI, José Irineu Rangel. Transição Demográfica. **Educação & Realidade**. Porto Alegre, v. 37, n. 2, p. 467-490, mai-ago. 2012.

ROBINSON, N.P; ALLRED, B.W; JONES, M.O; MORENO, A; KIMBALL, J.S; NAUGLE, D.E; ERICKSON, T.A; RICHARDSON, A.D. A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Product for the Conterminous United States. **Remote Sensing and Environment**. v. 9, p. 863. 2017

SCARAMUZZA, Pasquale; BARSÌ, Julia. Landsat 7 scan line corrector-off gap-filled product development. **Proceeding of Pecora**. p. 23-27. 2005

SILVA, M, R; PROCOPIO, S, A. Panorama geral dos efeitos da temperatura na saúde humana – Revisão sistemática. **Principia: Caminhos da Iniciação Científica**. v. 23. 2024.

SIMÕES, Celso Cardoso da Silva; OLIVEIRA, Luiz Antônio Pinto de. Perfil estatístico de crianças e mães no Brasil: mortalidade infantil e saúde na década de 80. **Coleção Ibgeana**. 129p. 1989.

TRAGANOS, D; AGGARWAL, B; POURSANIDIS, D; TOPOUZELIS, K; CHRYSOULAKIS, N; REINARTZ, P. Towards Global-Scale Seagrass Mapping and Monitoring Using Sentinel-2 on Google Earth Engine: The Case Study of the Aegean and Ionian Seas. **Remote Sensing and Environment**. v. 10, p. 1227. 2018.

TROLEIS, Adriano Lima; BASSO, Luis Alberto. Porto Alegre: urbanização, sub-habitação e consequências ambientais. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 37, p. 109-116, maio. 2011.

TSAI, Y.H; STOW, D; CHEN, H.L; LEWISON, R; AN, L; SHI, L. Mapping Vegetation and Land Use Types in Fanjingshan National Nature Reserve Using Google Earth Engine. **Remote Sensing and Environment**. v. 10, p. 927. 2018.

## 6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÃO FINAL

A partir dos resultados obtidos evidencia-se o Google Earth Engine nos permite realizar uma análise temporal e espacial, possibilitando compreender o microclima urbano. Através do sensoriamento remoto termal e da análise integrada de dados de temperatura superficial, variáveis socioeconômicas e setores censitários, foi possível identificar padrões térmicos distintos em diferentes regiões urbanas do município e como se comportam em função do tempo, evidenciando a complexa interação entre elementos urbanos, características da população e condições térmicas superficiais.

A conclusão desta dissertação destaca a importância de considerar a influência de elementos urbanos, como áreas verdes e corpos d'água, na regulação do microclima urbano, uma vez que demonstraram temperaturas mais amenas quando comparadas ao ambiente urbano circunvizinho. Apesar deste fato, não foi possível evidenciar essa influência desses elementos na temperatura superficial em seu entorno a partir da análise via sensoriamento remoto, considerando a baixa correlação entre a temperatura superficial e variáveis como a distância da hidrografia e das áreas verdes. Isso indica a complexidade das interações entre os elementos da paisagem urbana e a temperatura na superfície quando analisada via sensoriamento remoto. Em relação à cobertura verde da área urbanizada, observa-se uma supressão de áreas verdes durante a série histórica. Ressalta-se regiões de interesse para a expansão da mancha urbana ao longo do período analisado modelando a mancha urbana.

Outra conclusão de importância foi a variação sazonal das médias de temperatura superficial, com os meses de verão apresentando temperaturas mais elevadas e os meses de inverno com valores mais baixos. Isso ressalta a influência direta das condições climáticas sazonais na dinâmica térmica superficial da cidade. Em relação à temperatura média da série histórica do município, foi possível observar uma tendência de aquecimento de maneira geral, demonstrando que o cenário do campo térmico de Porto Alegre tende a apresentar dificuldades para o poder público do município quando se analisa esses fatores atrelados às mudanças climáticas futuras.

Foi constatado que o campo térmico de Porto Alegre se expande em direção às áreas periféricas do município, especialmente na região nordeste, onde tem-se os bairros Mário Quintana e Sarandi. Essa afirmação é corroborada pela correlação de



Pearson entre temperatura e renda, com o setor censitário como unidade espacial de análise, onde observa-se uma correlação negativa moderada, indicando que regiões com populações economicamente mais vulneráveis estão inseridas em áreas com temperaturas mais altas. Outra região com comportamento semelhante foi o bairro Restinga, um aglomerado urbano distante do centro de Porto Alegre. Em relação as outras variáveis dos censos de 2000 e 2010 do IBGE ficou evidente a redução dos valores de autocorrelação espacial das variáveis de população absoluta e razão de sexo, quando relacionadas as variáveis de temperatura, indicando mudanças na dinâmica de distribuição espacial da população ao longo da série histórica.

Em relação à área central de Porto Alegre, a partir do Índice de alteração de frequência (IAF), pode-se observar uma estabilidade na dinâmica térmica. Isso é resultado da impossibilidade de expansão e de adensamento, considerando que esta área já representava uma região estabelecida no início da série analisada. O índice ainda pode ser explorado como um método de análise da expansão urbana considerando que as maiores alterações de frequência destacaram as áreas de aumento da mancha urbana.

Esse trabalho também destaca a importância da regionalização térmica a partir da temperatura superficial e sua relação com os setores censitários da cidade. A análise integrada dessas variáveis oferece informações valiosas para o planejamento urbano, permitindo a identificação de áreas mais vulneráveis a fenômenos climáticos extremos e a proposição de medidas para promover ambientes urbanos mais preparados para temperaturas extremas. A integração de dados socioeconômicos, ambientais e climáticos proporciona uma visão aprofundada do microclima urbano, contribuindo para a tomada de decisões embasadas em evidências científicas.

Em síntese, esse trabalho representa uma contribuição significativa para o campo do sensoriamento remoto e da climatologia urbana, fornecendo subsídios para futuras pesquisas e estudos relacionados ao clima urbano, em especial via sensoriamento remoto com o auxílio da plataforma GEE. A compreensão aprofundada dos padrões térmicos da cidade de Porto Alegre, suas implicações socioeconômicas e ambientais são essenciais para o desenvolvimento de estratégias eficazes de adaptação às mudanças climáticas para a promoção de ambientes urbanos menos desiguais.

## **7 FINANCIAMENTO**

Trabalho financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES)

## REFERÊNCIAS

- AKBARI, H; MENON, S; ROSENFELD, A. Global Cooling: Increasing World-Wide Urban Albedos to Offset CO<sub>2</sub>. **Climatic Change**, v. 94, n. 3-4, p. 275-286. 2009.
- ALCOFORADO, M.J; ANDRADE, H. Global Warming and the Urban Heat Island. **Urban Ecology**, Boston, Marzluff, p. 249–262. 2008
- AMORIM, Margarete Cristiane De Costa Trindade. Detecção Remota De Ilhas De Calor Superficiais: Exemplos De Cidades De Porte Médio E Pequeno Do Ambiente Tropical, Brasil. **Finisterra**, Lisboa, n. 105, p. 111-133, ago. 2017.
- BARBOSA, Ricardo Victor Rodrigues; VECCHIA, Francisco Arthur Da Silva. Estudos De Ilha De Calor Urbana Por Meio De Imagens Do Landsat 7 Etm+: Estudo De Caso Em São Carlos (SP). **Revista Minerva**, São Carlos, v. 6, n. 3, p. 273-27. 2009.
- BARROS, Hugo Rogério De. **A Relação Entre Ilha De Calor Urbana, O Uso E Cobertura Do Solo E O Balanço De Energia No Município De São Paulo: Avaliação Do Campo Térmico Nos Parques Públicos De Lazer**. Tese (Doutorado Em Geografia Física) Faculdade De Filosofia, Letras E Ciências Humanas, Universidade De São Paulo, São Paulo. 2016.
- DE JESUS, Janisson Batista; SANTANA, Ighor; DIAQUINO Matias. Estimation Of Land Surface Temperature In Caatinga Area Using Landsat 8 Data. **Journal Of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 7, n. 3, p. 150-157. 2017
- DE ZORZI, LÍzia de Moraes; SORRIBAS, Mino Viana; SILVEIRA, André Luiz Lopes. Estudo de Ilhas de Frescor Urbano em Porto Alegre - RS. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. 2017.
- GANEM, Khalil Ali. **Classificação Da Cobertura Do Solo Na Caatinga A Partir De Imagens Do Landsat-8 E Da Ferramenta Google Earth Engine: Uma Comparação Entre Dados Com E Sem Correção Atmosférica**. Dissertação (Mestrado Em Geociências Aplicadas), Universidade De Brasília, Brasília. 2017.
- HOWARD, Luke. **The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations, Made at Different Places in The Neighborhood Of the Metropolis**. London. 1818.
- JENSEN, John. **Sensoriamento Remoto Do Ambiente: Uma Perspectiva Em Recursos Terrestres**. 2ª Edição Traduzida Pelo Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais - INPE. São Paulo. 2009.
- LUGÃO, Layra Ramos et al. Os efeitos das mudanças climáticas nas condições de conforto térmico urbano. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 13, n. 00, p. e022022. 2022.
- MOTA, Fernanda et al. Google Earth Engine e sua aplicabilidade na gestão de recursos hídricos. **Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais (Wcama)**. p. 161-170. 2020.

MUTANGA O, KUMAR L. Google Earth Engine Applications. **Remote Sensing**. 11(5):591. 2019

NERES, Danillo Lopes et al. Influence of vegetation on thermal and urban comfort in a municipality in the south of Tocantins. **Research, Society And Development**. v. 10, n. 6, p. E47810615999. 2021.

OKE, Timothy Richard. **Boundary Layer Climates**. 2ª Edição. Londres: Routledge. 1987.

OKE, Timothy Richard; VOOGT, James. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing and Environment**. v. 86, p. 370-384, mar. 2003.

ROMERO, Marta Adriana Bustos et al. **Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas**. Brasília: Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. 2019.

ROSE, Leanna Shea; AKBARI, Hashem; TAHA, Haider. **Characterizing the fabric of the urban environment: A case study of Greater Houston, Texas**. United States. 2003.

SOUZA, Maria Clara Ribeiro. **Estudo E Proposta Do Mobiliário Urbano E Do Conforto Térmico Na Praça Dos Girassóis**. Monografia (Graduação) Curso De Arquitetura E Urbanismo. Universidade Federal Do Tocantins. Palmas. 2022.

TROLEIS, Adriano Lima; BASSO, Luis Alberto. Porto Alegre: urbanização, sub-habitação e consequências ambientais. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 37, p. 109-116, maio. 2011.

VALE, Jones Remo Barbosa. **Análise Da Dinâmica Do Uso E Cobertura Da Terra Nas Áreas Desflorestadas Do Estado Do Pará Por Meio Da Plataforma Google Earth Engine**. Trabalho De Conclusão De Curso (Graduação Em Engenharia Cartográfica E Agrimensura) – Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, Pará. 2019.

VIANNA, Elen. **O Campo Térmico Urbano: Ilhas De Calor Em Brasília DF**. Tese De Doutorado Pelo Programa De Pós-Graduação Da Faculdade De Arquitetura E Urbanismo Da Universidade De Brasília, Brasília, Distrito Federal. 2018.

XAVIER, T. C; OLIVEIRA, W. D; FIALHO, E. S. Análise Das Condições De Conforto Térmico Da Cidade De Vitória, ES. **Revista Do Departamento De Geografia**, v. 21 set. 2022.

ZHAO, Qiang et al. Progress and trends in the application of Google Earth and Google Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3778, 2021.