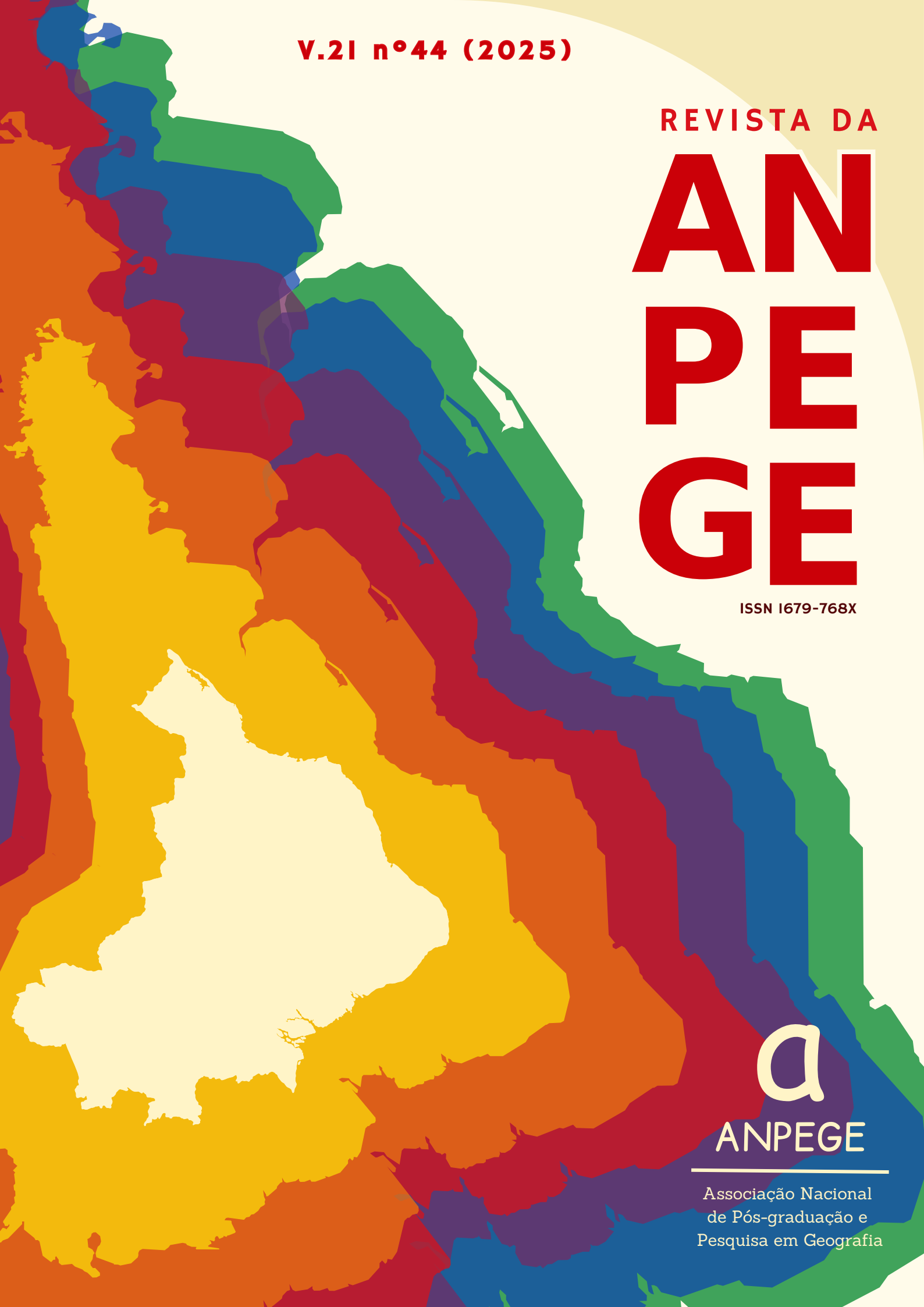
V.21 nº44 (2025)

# REVISTA DA ANPEGE

ISSN 1679-768X



ANPEGE

Associação Nacional
de Pós-graduação e
Pesquisa em Geografia

REVISTA DA
ANPEGE



DOSSIÊ GEOGRAFIA BRASILEIRA NA UGI

# LCZ4r, um pacote R para análise de zonas climáticas locais e ilhas de calor urbanas

*LCZ4r, an R package for analysing local climatic zones and urban heat islands*

*LCZ4r, un paquete R para analizar zonas climáticas locales e islas de calor urbanas*

DOI: 10.5418/ra2025.v21i44.19763

**MAX WENDELL BATISTA DOS ANJOS**
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

**DAYVID CARLOS DE MEDEIROS**
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

**FRANCISCO JABLINSKI CASTELHANO**
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

V.21 n°44 (2025)
e-issn : 1679-768X

**RESUMO:** Zonas Climáticas Locais (LCZ) são o sistema de classificação para estudos climáticos urbanos, oferecendo uma abordagem que distingue áreas com base no uso e cobertura do solo, e propriedades físicas. Este artigo apresenta o LCZ4r, um pacote R projetado para analisar LCZ's e Ilhas de Calor Urbana (UHI). Desenvolvido na plataforma de programação R de código aberto, suas funções são categorizadas em dois tipos: as funções gerais, permitem a extração do mapa de LCZ para qualquer área seca no mundo - variando de bairros a cidades, bem como o cálculo de áreas de classes LCZ e obtenção de parâmetros físicos; e as funções locais, que requerem dados primários de variáveis ambientais para tarefas como calcular anomalias térmicas entre LCZ's, interpolação da temperatura e avaliação da intensidade da UHI. Destaca-se a importância do LCZ4r na busca por novas formas de planejamento urbano, combate à crise climática e promoção da democratização da ciência.

**Palavras-chave:** zonas climáticas locais; modelagem climática; ilhas de calor urbanas; software; LCZ4r.

**ABSTRACT:** Local Climate Zones (LCZ) are the most suitable classification system for urban climate studies, offering a structured approach that distinguishes urban areas based on land use, land cover patterns, associated local physical properties. This paper introduces LCZ4r a R package designed to analyze LCZ and Urban Heat Island (UHI). Developed on the open-source R statistical programming platform, the LCZ4r's functions are categorized into two types: the general functions, enable the extraction of LCZ map for any land area worldwide - ranging from neighborhoods to cities, as well as calculation of LCZ classes areas. The local functions require primary data from environment variable readings for tasks such as calculating thermal anomalies between LCZ classes, interpolating air temperature, and assessing UHI intensity. This highlights the importance of LCZ4r in the search for new ways of urban planning, combating the climate crisis and promoting the democratization of science.

**Keywords:** local climate zones, climate modeling, Urban Heat Islands, Software, LCZ4r.

Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional. CC BY - permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.

**RESUMEN:** Las zonas climáticas locales (LCZ) son el sistema de clasificación para los estudios del clima urbano y ofrecen un enfoque que distingue áreas según el uso del suelo, la cobertura del suelo y las propiedades físicas. Este artículo presenta LCZ4r, un paquete R diseñado para analizar LCZ y islas de calor urbanas (UHI). Desarrollado en la plataforma de programación de código abierto R, sus funciones se categorizan en dos tipos: las funciones generales, permiten la extracción del mapa LCZ para cualquier área seca del mundo - desde barrios hasta ciudades, así como el cálculo de áreas de clase LCZ y la obtención de parámetros físicos; y funciones locales, que requieren datos primarios sobre variables ambientales para tareas tales como el cálculo de anomalías térmicas entre LCZ, la interpolación de temperatura y la evaluación de la intensidad de UHI. Se destaca la importancia de LCZ4r en la búsqueda de nuevas formas de planificación urbana, la lucha contra la crisis climática y la promoción de la democratización de la ciência.

**Palabras clave:** zonas climáticas locales, modelado climático, islas de calor urbanas, software, LCZ4r.

## Introdução

A classificação das Zonas Climáticas Locais (LCZ) fornece uma base científica sólida para caracterizar áreas da superfície terrestre, facilitando estudos globais sobre ilhas de calor urbano (UHI) (Stewart e Oke, 2012). Sua utilidade é amplamente reconhecida, como demonstrado por um número crescente de pesquisas dedicadas a investigar a relação entre os 17 tipos de zonas e a temperatura do ar em diferentes regiões de macroclima (Huang et al., 2012; Lehnert et al., 2023; Ma et al., 2021; Zhu et al., 2022).

Metodologias e ferramentas existentes, como a iniciativa World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) e o aplicativo web LCZ Generator, facilitaram com sucesso o mapeamento das paisagens urbanas em LCZs. O projeto WUDAPT, por exemplo, oferece diretrizes padronizadas para coletar e analisar dados de morfologia urbana em todo o mundo, utilizando imagens de observação da Terra (por exemplo, Landsat, Sentinel), áreas/polígonos de treinamento (TAs), Google Earth e o software Sistema para Análises Geo-Científicas Automatizadas - SAGA (Bechtel et al., 2015; Ching et al., 2018). O LCZ Generator por sua vez, é uma plataforma web que simplifica a criação de mapas LCZ usando arquivos de TAs e metadados, fornecendo avaliações automatizadas de precisão e gerando vários derivados de LCZ, como a área total da superfície (Demuzere et al., 2021). Embora essas ferramentas tenham aprimorado a adoção global dos LCZs para aplicações científicas, muitas vezes elas exigem conhecimento especializado em Sistema de Informação

Geográfica (SIG) e podem ser dispendiosas em termos de tempo, representando uma barreira para usuários sem conhecimento em SIG.

Enquanto linguagens computacionais como R, Python e Matlab também exigem uma compreensão básica de codificação em linha de comando, elas oferecem funcionalidades para processamento de dados, análise estatística, análise espacial e visualização, o que simplifica a análise de dados LCZ. Essas linguagens surgiram como alternativas acessíveis ao sistema baseado em SIG. No entanto, a integração do sistema LCZ e modelagem de UHI com essas linguagens computacionais permanece limitada. Por exemplo, o pacote WUDAPT-to-WRF (W2W) baseado em Python incorpora as classes LCZ e seus respectivos parâmetros de dossel urbano no modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) (Demuzere et al., 2022). Na plataforma R, o pacote *Lczexplore* compara mapas LCZ do WUDAPT com *shapefiles* de SIG do e fornece o nível de confiança da classificação de qualidade do LCZ (Gousseff et al., 2023).

Em levantamento realizado acerca do uso desta técnica em cidades brasileiras Araujo et al. (2021) destacam que seu no Brasil ainda é incipiente e como muito potencial de desenvolvimento e aplicação no país. Os autores reforçam as áreas de Geografia e Arquitetura como aquelas com maior concentração de teses e dissertações que fizeram uso desta técnica.

Neste contexto, apresentamos o LCZ4r, um conjunto de ferramentas projetado para simplificar a análise de LCZ e UHI dentro de um ambiente de linguagem computacional. O LCZ4r permite que os usuários trabalhem com dados de LCZ sem a necessidade de conhecimento extenso em SIG. Desenvolvido na plataforma R de código aberto, renomada por suas capacidades de computação estatística (TIOBE, 2024; Tippmann, 2015), o LCZ4r aproveita os esforços globais e regionais de mapeamento LCZ (Demuzere et al, 2022a; Demuzere et al, 2020; Demuzere et al., 2022b) para fornecer um conjunto de funções para pesquisa sobre clima urbano. Essas funções permitem que os usuários extraiam mapas de LCZ para qualquer área do mundo em várias escalas, calculem áreas superficiais por classe LCZ e obtenham parâmetros físicos-chave, como a fração de superfície impermeável, albedo, calor antropogênico, fator de visibilidade do céu, rugosidade do terreno, entre outros. Além disso, a partir de dados primários inseridos pelo usuário, o pacote LCZ4r gera séries temporais de temperatura do ar e anomalias entre as classes LCZ, realiza modelagem espaço-temporal de leituras de temperatura e calcula a intensidade de UHI.

A ferramenta LCZ4r traz outras vantagens ao permitir que os usuários interpolarem dados utilizando LCZ como plano de fundo. A interpolação baseada em LCZ incorpora o sistema de classificação de solos em questão no modelo de krigagem, considerando não apenas as distâncias entre os pontos de medição como na krigagem tradicional, mas também os padrões de uso e cobertura do solo associados aos LCZs. Como resultado, ela pode levar a uma melhor representatividade da distribuição espacial da temperatura do ar, particularmente em áreas urbanas com medições esparsas, em comparação com métodos convencionais de

interpolação que não utilizam dados LCZ. Além disso, o LCZ4r automatiza o cálculo da intensidade de UHI usando a estrutura LCZ, tornando-o o primeiro pacote R especificamente projetado para modelagem de UHI.

Este manuscrito se propõe a apresentar as funções do pacote, cujo desenvolvimento visa expandir a aplicação da estrutura LCZ na pesquisa climática e no planejamento urbano no Brasil. Este artigo apresenta uma visão geral das funcionalidades do LCZ4r, destacando sua utilidade para a análise espaço-temporal de UHI e incentivando pesquisadores a incorporar essa ferramenta em seus estudos climáticos.

**Design do Software**

O LCZ4r v0.1.0 é um conjunto de funções que abrange várias tarefas computacionais, incluindo pré-processamento de dados (Hadley et al, 2023; Carslaw e Ropkins, 2012; Kuhn e Wickham, 2021; Kuhn e Wickham, 2023), operações geoestatísticas (Pebesma e Bivand, 2005; Hiemstra et al., 2021); e visualização (Wickham,2016). O LCZ4r é compatível com os sistemas operacionais Windows, Ubuntu e iOS, sendo recomendado o uso do R integrado com o RStudio (Rstudio, 2022) para um desempenho ideal. Os usuários podem acessar os recursos mais recentes do pacote instalando a versão de desenvolvimento a partir do GitHub. Para facilitar o uso, o LCZ4r fornece documentação, diretrizes de usuário e tutoriais no site (https://bymaxanjos.github.io/LCZ4r/index.html).

As funções do LCZ4r são designadas como *lcz_*( )* e divididas em dois grupos principais: funções gerais e funções locais (Figura 1).

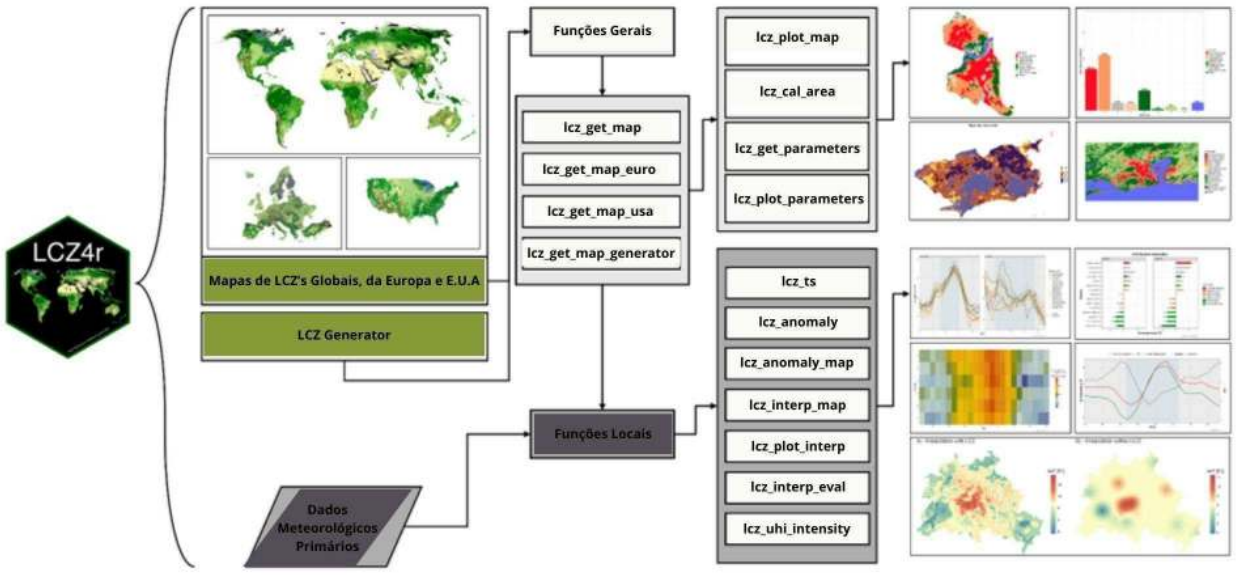



Figura 1: Estrutura do Pacote LCZ4r versão 0.1.0.

As funções gerais têm como objetivo facilitar o acesso, análise e visualização de classes relacionadas ao LCZ e parâmetros do dossel urbano, enquanto as funções locais são projetadas para realizar séries temporais, anomalias, interpolação e avaliação de UHI usando conjuntos de dados primários, como leituras de temperatura do ar de transectos móveis e/ou redes de monitoramento. A Tabela 1 resume todas as funções do LCZ4r.

Tabela 1: Sumário das Funções, descrições, dados de entrada e produtos do LCZ4r v 0.1.0.

| **Tipo** | **Função** | **Descrição** | **Dados de Entrada** | **Produtos** |
|---|---|---|---|---|
| Funções Gerais | lcz_get_map( ) | Download de Mapa de LCZ para uma cidade ou região específica. | Nome da cidade ou Shp da região de interesse | Mapa LCZ raster (.tif) |
| | lcz_get_map_euro( ) | Download de Mapa de LCZ para uma cidade ou região específica na Europa | Nome da cidade ou Shp da região de interesse | Mapa LCZ raster (.tif) |
| | lcz_get_map_usa( ) | Download de Mapa de LCZ para uma cidade ou região específica nos E.U.A | Nome da cidade ou Shp da região de interesse | Mapa LCZ raster (.tif) |
| | lcz_get_map_generator( ) | Recupera mapa LCZ da Plataforma LCZ Generator | Identificador (ID) | Mapa LCZ raster (.tif) |
| | lcz_plot_map( ) | Cria uma representação gráfica de um mapa LCZ com cores padronizadas para cada classe. | Mapa LCZ raster (.tif) | Mapa personalizado de LCZ (.png) |
| | lcz_cal_area( ) | Calcula a área ocupada por cada classe de LCZ expressa em porcentagem, ou km² | Mapa LCZ raster (.tif) | Porcentagem das áreas (.png) e tabela com dados de área (.csv) |
| | lcz_get_parameters( ) | Extrai 12 Paramâtros do Dossel Urbano Extracts 12 (UCPs) baseado em Stewart e Oke (2012). | Mapa LCZ raster (.tif) | Parametros como conjuntos de raster (.tif) ou shapefiles (.shp) |
| | lcz_plot_parameters( ) | Gera um mapa gráfico de UCP's para análises visuais | Conjuntos de Rasters de UCP (.tif) | Mapa de Parametros de LCZ (.png) |
| Funções Locais | lcz_ts( ) | Produz uma série temporal de dados de temperatura | Mapa LCZ raster (.tif) e dados primários | Série temporal gráfica (.png) e |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | categorizado por classe de LCZ. | | tabela de dados (.csv) |
| | lcz_anomaly( ) | Cria representação gráfica de anomalias térmicas baseados em classes de LCZ. | Mapa LCZ raster (.tif) e dados primários | Gráfico de anomalias (.png) e tabela de dados (.csv) |
| | lcz_anomaly_map( ) | Gera interpolações espaciais de anomalias térmicas. | Mapa LCZ raster (.tif) e dados primários | Mapa de anomalias térmicas (.tif) |
| | lcz_interp_map( ) | Gera mapa de interpolação espacial de temperatura do ar. | Mapa LCZ raster (.tif) e dados primários | Mapa de interpolação de temperaturas (.tif) |
| | lcz_interp_eval( ) | Avalia a acurácia dos mapas de Interpolação espacial por LCZ. | Mapa LCZ raster (.tif) e dados primários | Resultados da Avaliação(.csv) e shapefile de metadados(.shp) |
| | lcz_plot_interp( ) | Gera representação gráfica de anomalias de temperatura interpoladas por LCZ. | Mapa de interpolações raster (.tif) | Mapa de interpolações (.png) |
| | lcz_uhi_intensity( ) | Avalia a intensidade das Ilhas de Calor Urbanas baseadas nas classes de LCZ. | Mapa LCZ raster (.tif) e dados primários | Plotagem de intensidade de UHI (.png) e tabela de dados (.csv) |

***Funções Gerais***

As funções lcz_get_map*( ) desempenham um papel central no design do LCZ4r, pois facilitam o processo de obtenção do mapa LCZ para uma cidade ou região de interesse especificada, sem exigir TAs ou software GIS, por meio de um simples comando de linha no *R: my_map = lcz_get_map(city = "sua cidade")*.

Essas funções acessam dados de características espaciais do OpenStreetMap (OSM) por meio da *API Overpass* diretamente no R e do mecanismo de busca Nominatim para localizar shapefiles https://nominatim.openstreetmap.org/ui/search.html (acessado em 24.03.2024). Elas então importam automaticamente a versão 3 do mapa global LCZ do repositório Zenodo (https://zenodo.org/records/8419340). O mapa global LCZ, desenvolvido por Demuzere et al. (2022a), cobre 410 regiões de interesse em 16 ecorregiões ao redor do mundo. O mapa global é recortado para a cidade ou região de interesse de interseção, gerando um raster GeoTIFF de resolução 100 metros com valores representando as classes padrão LCZ (1-17). As funções *lcz_get_map_euro( )* e *lcz_get_map_usa( ),* fornecem mapas LCZ para a Europa (Demuzere et al, 2019) e os Estados Unidos continentais (Demuzere et

al, 2020), respectivamente. A função *lcz_get_map_generator* amplia essa funcionalidade ao permitir o acesso a mapas LCZ GeoTIFF otimizados para nuvem hospedados na Plataforma *LCZ Generator* usando um identificador único (ID) (Demuzere et al, 2021).

Embora as funções *lcz_get_map* ofereçam uma maneira rápida e conveniente de acessar os mapas de LCZ, elas dependem de conjuntos de dados globais e regionais, o que às vezes pode levar a classificações incorretas e reduzir a precisão. Em contraste, a função *lcz_get_map_generator()* permite que os usuários criem mapas de LCZ personalizados adaptados às suas áreas de estudo específicas, garantindo uma representação mais precisa da morfologia urbana local. Isso é particularmente importante para aplicações como interpolação de temperatura do ar, onde a precisão do mapa afeta diretamente os resultados.

Além disso, essas funções *lcz_get_map*( )* servem como entrada para outras funções no LCZ4r. Por exemplo, a função *lcz_plot_map( )* utiliza o raster recortado para representar visualmente o mapa LCZ com as classes padrão coloridas. A função *lcz_cal_area( )* calcula a área ocupada por cada classe LCZ, enquanto a função *lcz_get_parameters( )* apresenta 12 Parâmetros do Dossel Urbano (UCP), incluindo o Fator de Visibilidade do Céu (SVF), Fração de Superfície de Edificação (BSF), Fração de Superfície Perviável (PSF) e classe de Comprimento de Rugosidade (z0), e os converte em *shapefile* ou raster para representação espacial.

Esses mapas de UCP são representados através dos valores máximo, mínimo e médio, por exemplo, a média do Fator de Visibilidade do Céu (SVFmean) é derivada da diferença entre os valores máximo e mínimo. Os parâmetros são baseados em intervalos de referência fornecidos por Stewart e Oke (2012) para cada classe LCZ. Os UCPs disponíveis no LCZ4r v. 0.1.0 podem ser acessados em https://bymaxanjos.github.io/LCZ4r/articles/Introd_general_LCZ4r.html.

***Funções Locais***

As funções locais exigem estruturas específicas de dados de entrada para operar de forma eficiente. Normalmente, os usuários devem importar dados de temperatura do ar ou outras variáveis ambientais para o R como um *data frame* estruturado. Este *data frame* deve incluir colunas para a data, identificadores das estações meteorológicas e coordenadas geográficas das localizações das estações. É importante garantir que o formato de data e hora siga as convenções do R, como "YYYY-mm-dd", "2024-03-24 11:00:00", ou até "1/9/1986". Para auxiliar os usuários, o pacote LCZ4r fornece um conjunto de dados de exemplo, *lcz_data("lcz_data")*, que contém medições de temperatura do ar de Berlim e serve como modelo para estruturar os dados.

Uma característica chave das funções locais é a flexibilidade que oferecem na seleção temporal dos dados, permitindo que os usuários ajustem suas análises a períodos específicos. Os usuários podem agregar

dados por ano, estação, mês, dia ou hora e filtrar períodos específicos, como fins de semana, dias de semana ou horas de luz do dia. As estações são determinadas com base no hemisfério do mapa de sua LCZ, enquanto os períodos de luz do dia são calculados utilizando algoritmos astronômicos que estimam os horários de nascer e pôr do sol. Essa capacidade é particularmente benéfica para analisar variações diurnas de temperatura e a intensidade de UHI.

As funções locais auxiliam nas análises detalhadas de tendências e variações de temperatura do ar entre diferentes classes de LCZ. A função *lcz_ts()* gera séries temporais de dados de temperatura do ar categorizados por classes de LCZ, permitindo que os pesquisadores monitorem tendências temporais. A função *lcz_anomaly()* calcula anomalias de temperatura para cada classe de LCZ. Aqui, uma anomalia é definida como a diferença entre a temperatura de uma estação LCZ e a temperatura média de todas as estações LCZ durante um período específico. Assim, a anomalia em cada estação LCZ é calculado pela função 1 (Alexander e Mills, 2014; Anjos et al., 2020):

$$T'_{F(i)} = \overline{T}_{F(i)} - \frac{\sum \overline{T}_{F(i)}}{n} \quad ,(1)$$

onde $T'_{F(i)}$ é a temperatura média (aritmética) das estações urbanas LCZ e n é o número de estações na LCZ. Anomalias positivas de temperatura indicam que uma determinada LCZ está mais quente em comparação com as outras LCZs. Esta informação pode ser importante para avaliar contrastes de temperatura do ar e identificar áreas com desvios da temperatura média dentro de uma área de estudo.

Outra característica importante das funções locais são as operações geoestatísticas. Funções como *lcz_interp_map()* e *lcz_anomaly_map()* são projetadas para mapear valores de temperatura do ar e anomalias de forma avançada, pois operam sob a suposição de que os valores de temperatura obtidos a partir de células de grade amostradas - onde as estações das LCZ estão localizadas, podem ser extrapolados para células de grade não amostradas que compartilham a mesma classe LCZ. Para isso, pontos de amostra são gerados aleatoriamente no mapa LCZ, garantindo que cada ponto receba um valor de temperatura do ar e a respectiva classe LCZ. Em seguida, os valores dos pontos amostrados e não amostrados são interpolados usando o método de Kriging. O Kriging Universal incorpora o conceito de aleatoriedade na modelagem espacial da variação da temperatura. Ele se baseia na suposição de que os valores de temperatura medidos em locais vizinhos tendem a ser mais semelhantes do que os valores medidos em locais mais distantes. Esse método utiliza um variograma ou covariância para quantificar e interpretar a autocorrelação espacial dos dados (Pebesma e Bivand, 2005; Hiemstra et al, 2021).

Apesar de ser amplamente utilizado para modelagem de temperatura do ar, o método de Kriging depende exclusivamente das distâncias entre os locais de medição para modelar a variação de temperatura no espaço. Ao incorporar informações de LCZ no processo de interpolação, as funções *lcz_anomaly_map()* e

*lcz_interp_map()* levam em consideração fatores como cobertura do solo, forma urbana e mudanças locais induzidas por atividades humanas, o que pode resultar em uma representação mais precisa das anomalias de temperatura e das variações espaciais de temperatura dentro das áreas urbanas. A função *lcz_interp_eval()* foi projetada para avaliar os resultados da interpolação em diferentes resoluções espaciais e temporais, comparando os mapas estimados com os dados observados das estações.

Em relação a Ilha de Calor Urbana, a função *lcz_uhi_intensity()* fornece dois métodos para calcular a intensidade do UHI: LCZ e manual. No método LCZ, o UHI é definido para um determinado momento usando a equação (Stewart et al., 2014) :

$$UHI = \underline{LCZx}_{urbano} - \underline{LCZy}_{rural} \quad (2)$$

onde $\underline{LCZx}_{urbano}$ *e* $\underline{LCZy}_{rural}$ referem-se aos valores médios (aritméticos) de temperatura do ar em todas as estações que representam as áreas urbanas e rurais, respectivamente. Essa abordagem está alinhada com as recomendações propostas por Stewart et al., que defendem o uso de médias espaciais para obter valores representativos localmente.

Identificar estações de referência para áreas urbanas e rurais pode ser difícil em algumas cidades, mas a própria classificação LCZ pode facilitar essa tarefa. Por exemplo, tipos de LCZ como 1 (compacto de alta densidade), 2 (compacto de média altura), 3 (compacto de baixa altura) e 4 (alto edifício aberto) geralmente indicam áreas densamente povoadas com espaços verdes limitados, tornando-as candidatas ideais para representação urbana. Por outro lado, tipos de LCZ como B (árvores dispersas), C (arbustos, vegetação rasteira) e D (plantas baixas) ou até LCZ 9 (raramente construído) e LCZ 6 (baixa altura aberta) são mais indicativos de áreas periféricas e rurais. Especificamente, o tipo LCZ A (árvores densas) exige atenção especial, pois pode complicar a análise de UHII ao estudar variações microclimáticas de temperatura do ar causadas pelos efeitos de parques urbanos.

No método LCZ, a função *lcz_uhi_intensity(..., method="LCZ")* identifica automaticamente os tipos de LCZ, começando pelo LCZ 1 e avançando até o LCZ 8 para representar a área LCZxurbana, enquanto começa do LCZ natural (B, C, D) até o LCZ 9 (raramente construído) para representar a área LCZyrural. Uma vez determinados os tipos de LCZ, a função calcula os valores médios de temperatura do ar para os tipos $\underline{LCZx}_{urbano}$ *e* $\underline{LCZy}_{rural}$.

Embora a seleção automática de tipos de LCZ forneça uma abordagem padronizada, também se reconhece a importância do julgamento do usuário na análise do UHII. Para acomodar isso, a função *lcz_uhi_intensity(..., method="manual")* oferece um método manual, permitindo que os usuários escolham

estações como referências para as áreas urbanas e rurais. Usando o método manual, o UHII é calculado para um determinado momento com base na seguinte equação:

$$UHII = T_{urban} - T_{rural}, (3)$$

onde T_(urbano) e T_(rural) representam os valores de temperatura do ar para as estações que representam as áreas urbanas e rurais, respectivamente.

## Resultados e Discussões

### Aplicações das Funções Gerais

O principal objetivo do LCZ4r é fornecer acesso conveniente e eficiente aos mapas LCZ. A Figura 2 exibe mapas deLCZ para cidades nos Estados Unidos, Europa, América Latina, Ásia e Oceania, permitindo uma comparação entre diferentes classes LCZ em diversos contextos de uso e cobertura da terra.

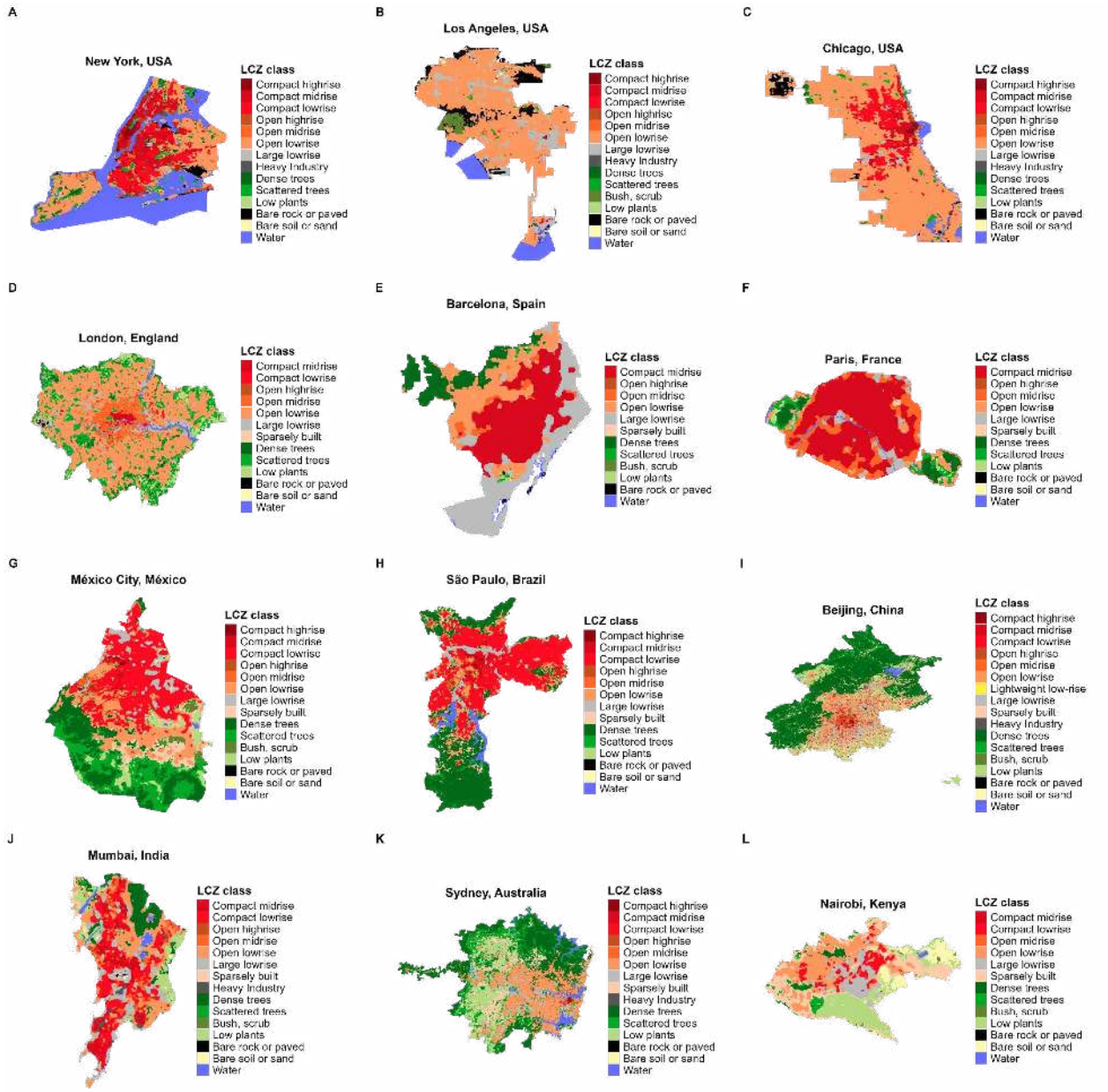



Figura 2: Mapas LCZ obtidos com as funções lcz_get_map(), lcz_get_map_euro() e lcz_get_map_usa() do pacote LCZ4r.

A Figura 3 apresenta as áreas percentuais calculadas em quilômetros quadrados para cada classe de LCZ. Desta forma, é possível que os usuários avaliem a composição da paisagem, facilitando a comparação entre ambientes urbanos e não urbanos diversos. Por exemplo, a LCZ 6 (Baixa altura aberta) apresenta uma cobertura maior em áreas metropolitanas como Nova York, Los Angeles, Chicago e Londres, enquanto a LCZ 2 (Média altura compacta) predomina em cidades como Barcelona e Paris, e a LCZ 3 (Baixa altura compacta) em cidades como Cidade do México e São Paulo. Qi et al. (2024) analisaram as proporções de

composição LCZ em seis áreas metropolitanas dos EUA de 1986 a 2020 e encontraram um declínio consistente nas proporções de classes naturais, que representaram apenas 11% em 2020 devido à expansão urbana. Durante esse período, a LCZ 6 apresentou o maior crescimento, com um aumento de 20%. Esse crescimento veio principalmente às custas da LCZ 9 (construção esparsa), LCZ C (arbustos, matagal), LCZ D (plantas baixas) e LCZ F (solo ou areia expostos), que contribuíram com 8%, 7%, 3% e 2%, respectivamente.

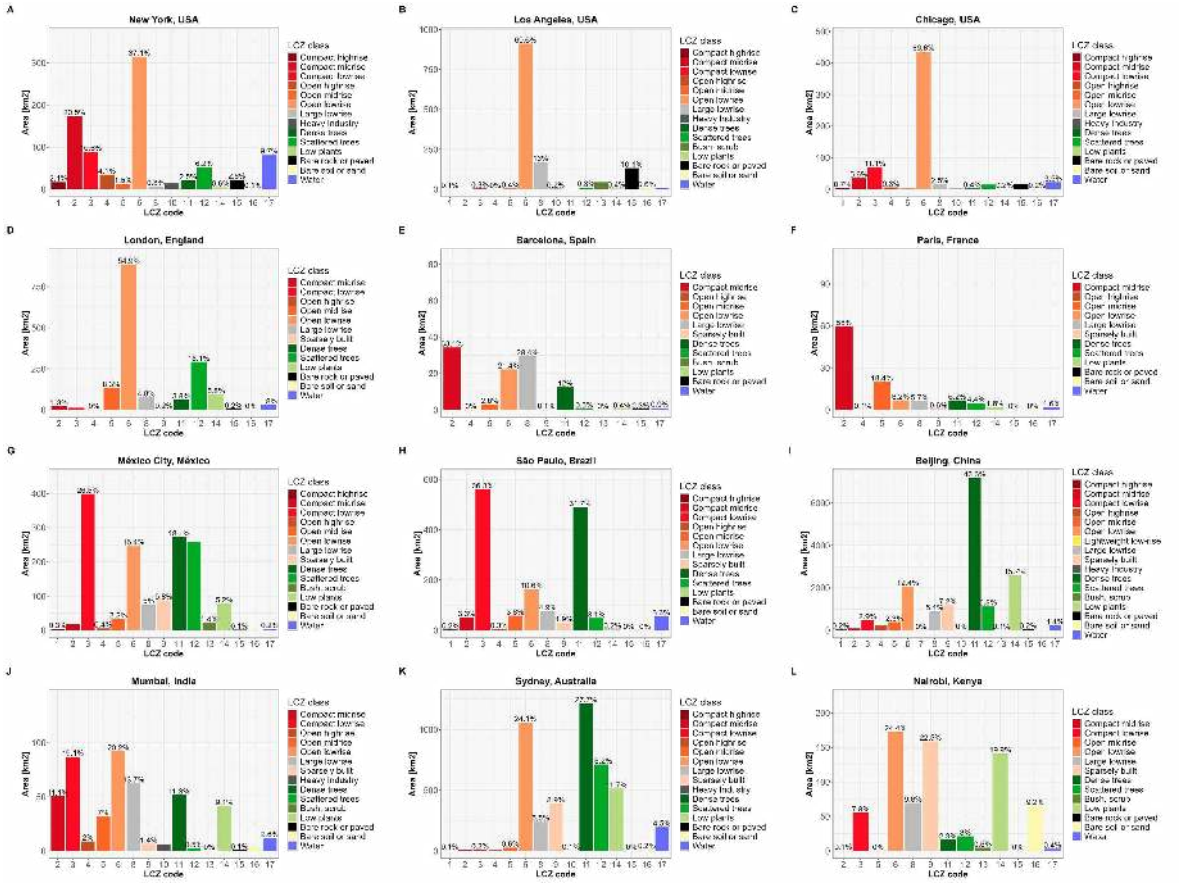



Figura 3: Percentual da área coberta por cada classe LCZ em quilômetros quadrados calculado com a função lcz_cal_area() do pacote LCZ4r.

A Figura 4 apresenta uma série de mapas de parâmetros físicos chaves da cidade do Rio de Janeiro. Esses mapas retratam atributos como estrutura da superfície, cobertura da superfície, material da superfície e atividade humana. O LCZ4r transforma os valores de referência propostos por Stewart e Oke (2012) para várias propriedades físicas em mapas com resolução horizontal de 100 metros. Os mapas de parâmetros relacionados ao LCZ podem servir como entradas para várias aplicações de modelagem e análises climáticas estatísticas. Por exemplo, a fração de superfície perviosa é frequentemente usada em modelos empíricos-biogênicos para estimar fluxos de $CO_2$ em ambientes urbanos e florestais (Beluco et al, 2017); o

Sky View Factor é amplamente aplicado em avaliações de UHI (Diksen et al., 2019); o albedo da superfície, por outro lado, é frequentemente relacionado às concentrações de poluentes do ar (Akbari et al., 2009).

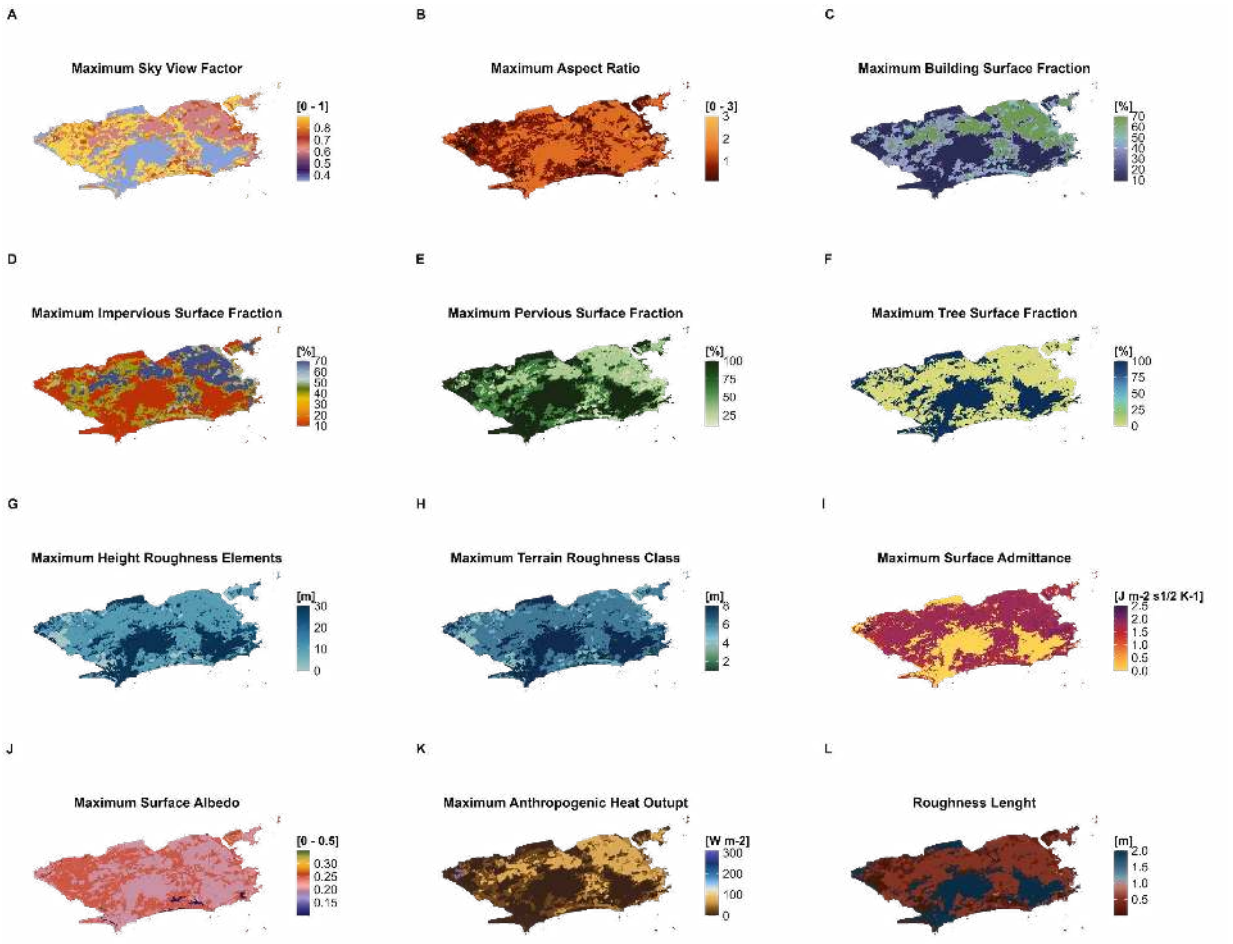



Figura 4: Mapas máximos de parâmetros físicos relacionados ao LCZ agregados em 100x100 m para a cidade do Rio de Janeiro. Foram gerados utilizando a função lcz_plot_parameters() do pacote LCZ4r

## Aplicações de Funções Locais

Para demonstrar as capacidades das funções locais para analisar a temperatura do ar intraurbana e a intensidade do UHI, selecionamos quatro cidades: Berlim, Lisboa, Curitiba e Aracaju (Tabela 2). Essas cidades foram escolhidas com base na disponibilidade de dados de redes meteorológicas urbanas e esforços de monitoramento de campanhas, de modo que os dados utilizados nestas cidades foram coletados segundo critérios rigorosos de qualidade e foram alvos de análises específicas (Meiert et al., 2017; Fenner et al., 2014; Alcoforado et al., 2006; Lopes et al.,2013; Klein et al., 2022; Mendonça et al., 2021; Anjos et al., 2020, Anjos e Lopes, 2017)

Tabela 2: Datasets usados para aplicação de funções locais neste estudo.

| **Cidade, País** | **Tipo Climático** | **Período** | **Número de Estações** |
|---|---|---|---|
| Berlin, Alemanha | Temperao | 1 Jan 2019 – 31 Dez 2020; | 23 Estações meteorológicas |
| Lisboa, Portugal | Mediterraneo | 1 Jul 2021 – 31 Ago 2021 | 15 Estações meteorológicas |
| Curitiba, Brasil | Subtropical | 1 Out 2015 – 15 Ago 2018 | 08 Estações meteorológicas |
| Aracaju, Brasil | Tropical | 1 Out 2014 – 30 Mai 2016 | 06 Estações meteorológicas |

*Séries Temporais*

Um uso prático do LCZ4r utilizando dados de temperatura do ar de Aracaju é apresentado na Figura 5. Ele integra informações do LCZ para cada estação meteorológica, permitindo a caracterização dos regimes de temperatura das diferentes classes LCZ ao longo do tempo. O resultado mostra claramente padrões térmicos distintos associados ao LCZ, principalmente as estações CEN e JAR, classificadas como LCZ 3 (Baixa Altura Compacta) e LCZ 4 (Alta Altura Aberta), respectivamente. Essas estações, localizadas em áreas centrais, apresentam consistentemente temperaturas do ar mais altas em comparação com outras classes LCZ, como a PAR (LCZ 11 - Árvore densa), situada em um parque urbano.

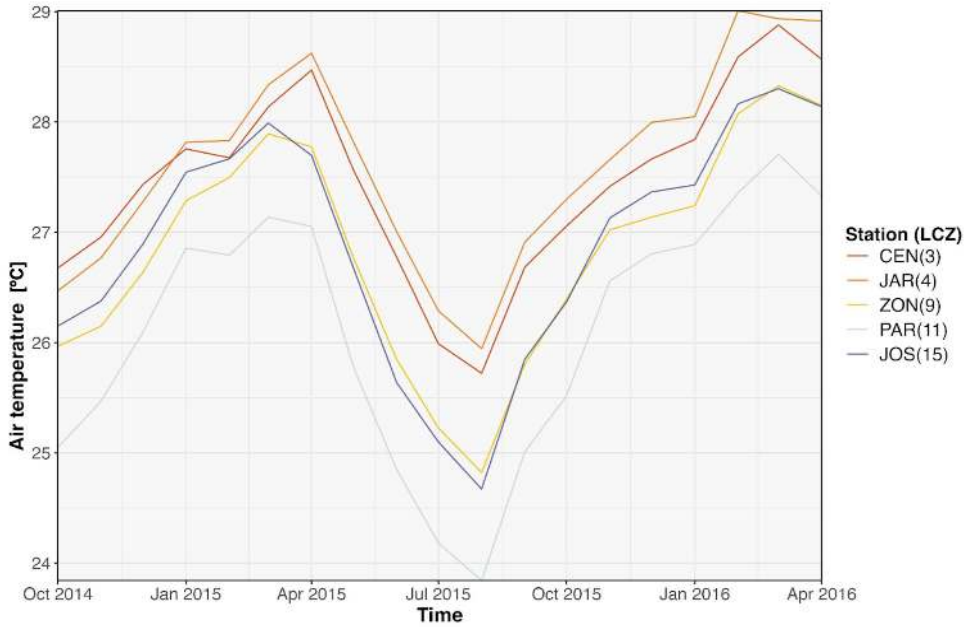



Figura 5: Séries temporais de temperaturas mensais do ar para várias classes LCZ em Aracaju (2014–2016), geradas utilizando as funções lcz_get_map() e lcz_ts() do pacote LCZ4r. A legenda identifica as estações de monitoramento e seus respectivos códigos de classe LCZ.

O LCZ4r oferece uma análise temporal flexível, permitindo que os usuários explorem variações de temperatura do ar em diferentes escalas de tempo. As opções incluem comparações entre o dia e a noite, tendências sazonais e até flutuações horárias dentro de um único dia, ativando o argumento de seleção temporal. Por exemplo, a Figura 6 ilustra a temperatura diária do ar entre as classes LCZ, separadas por mês, durante o período de 2014 a 2016.

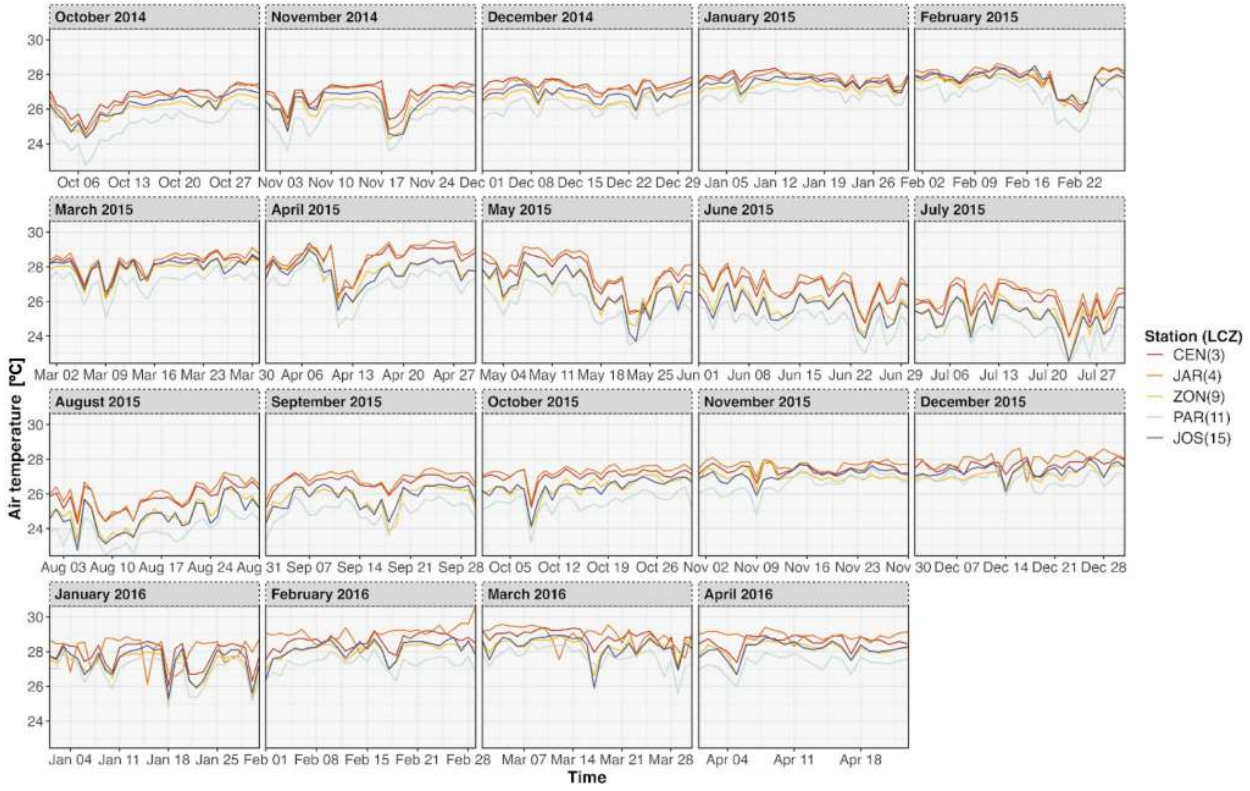



Figura 6: Séries temporais de temperatura diária do ar por mês e ano para diferentes classes LCZ em Aracaju (2014-2016), geradas pelas funções lcz_get_map() e lcz_ts() do pacote LCZ4r. A legenda identifica as estações de monitoramento e seus respectivos códigos de classe LCZ.

## *Anomalias*

A Figura 7 apresenta as anomalias de temperatura do ar para Berlim em um dia específico da primavera, diferenciadas entre os períodos diurno e noturno. Essas anomalias são baseadas em desvios das temperaturas observadas em relação à média de um período específico em cada estação do conjunto de dados. O LCZ4r normaliza as variações de temperatura, levando em consideração as diferenças inerentes nas temperaturas de base associadas a diferentes classes de LCZ.

As anomalias mostram contrastes entre as classes de LCZ, destacando a influência do uso da terra e da cobertura no padrão térmico urbano. Por exemplo, durante o período noturno, as estações classificadas como

LCZ 2 (Média altura compacta) e LCZ 5 (Média altura aberta) exibiram anomalias positivas (+3,9 °C e +3,8 °C, respectivamente), indicando temperaturas noturnas mais altas em áreas urbanas densamente construídas. Em contraste, as estações LCZ 11 (Árvores dispersas) e LCZ 12 (Árvores densas) registraram anomalias negativas (-1,9 °C e -3,8 °C, respectivamente), refletindo temperaturas noturnas mais frescas em áreas com vegetação abundante.

As anomalias diurnas, embora menos pronunciadas, ainda demonstram diferenças. Estações em áreas construídas (por exemplo, LCZ 2 e LCZ 5) apresentaram anomalias positivas leves (+0,7 °C a +1,0 °C), enquanto as estações em áreas vegetadas, como LCZ 11 (-0,8 °C) e LCZ 12 (-1,3 °C), registraram anomalias negativas, enfatizando seus efeitos de resfriamento.

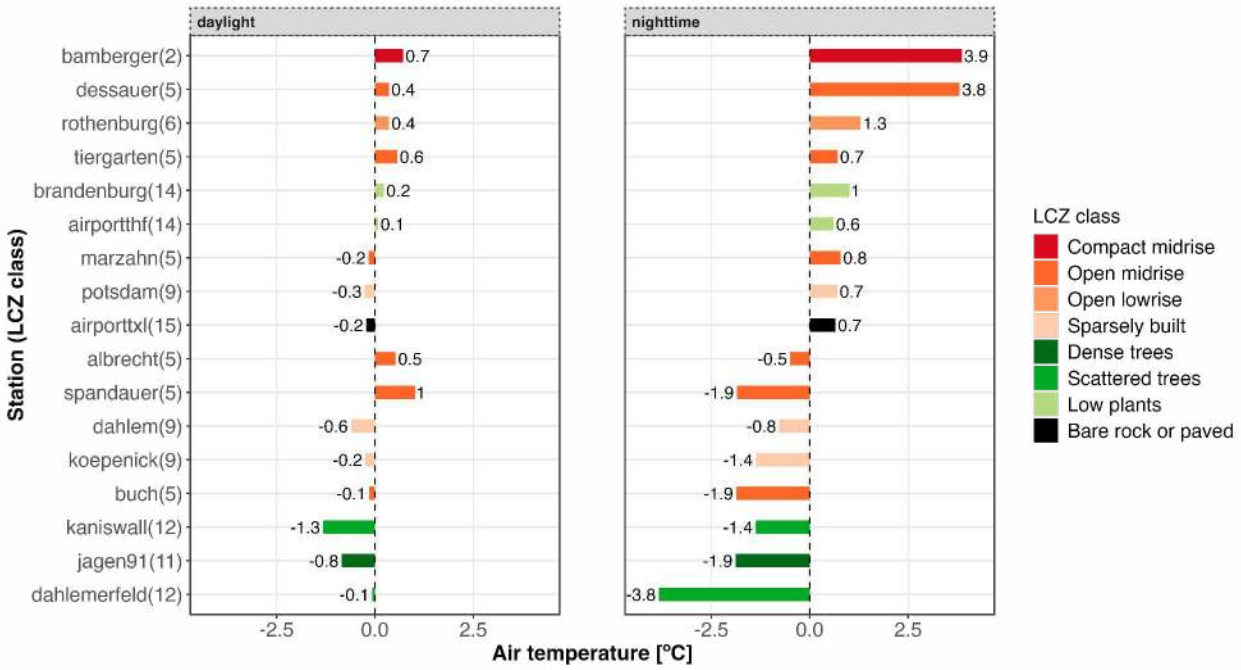



Figura 7: Anomalias horárias da temperatura do ar em diferentes classes LCZ, divididas entre os períodos diurno e noturno, em Berlim no dia 29 de maio de 2019. O gráfico foi gerado utilizando as funções lcz_get_map_generator() e lcz_anomaly() do pacote LCZ4r. A legenda identifica as estações meteorológicas e seus respectivos códigos de classe LCZ

*Modelagem Temporal da Ilha de Calor Urbana*

A técnica das LCZ oferece uma abordagem mais eficaz para a análise da magnitude da Ilha de Calor Urbana em comparação com as diferenças de estações urbanas-rurais comumente usadas. O LCZ4r, portanto, oferece uma funcionalidade que calcula a intensidade da UHI utilizando contrastes de temperatura entre distintas classes LCZ (Rurais e Urbanas). Ao combinar a classe de LCZ com observações de temperatura do

ar, esse método reduz a subjetividade e gera um conjunto de dados de UHI confiável e comparável. Por exemplo, a Figura 8 mostra a intensidade horária do UHI em Berlim de 2019 a 2020 e enfatiza como sua magnitude varia ao longo das estações e ciclos diários

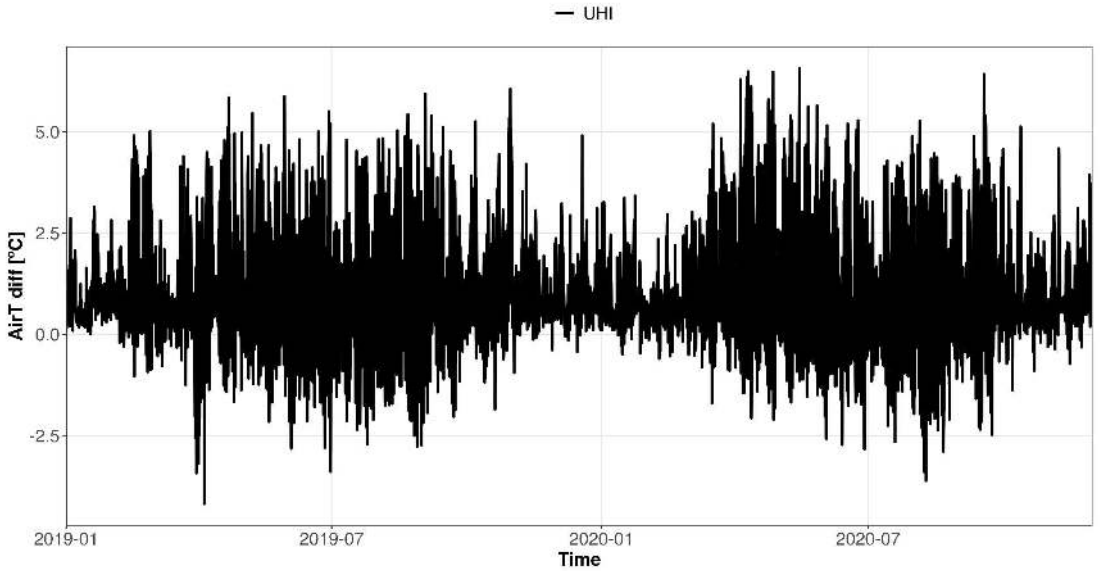



Figura 8: Séries temporais da intensidade horária da Ilha de Calor urbana em Berlim de 2019 a 2020 (Hora Local), calculadas utilizando a função lcz_uhi_intensity() do pacote LCZ4r.

Para analisar a variabilidade intra-diária da UHI, a função lcz_uhi_intensity() permite a avaliação do UHI durante janelas de tempo específicas, como os períodos diurno e noturno. A Figura 9 apresenta a variação do UHI em um dia específico de verão em Lisboa. Note que as temperaturas urbanas e rurais selecionadas estão acompanhadas pelas suas respectivas cores padrão de classe LCZ. Neste caso, as classes LCZ 2 (média altura compacta) e LCZ 14 (plantas baixas) foram selecionadas como referências para os cálculos da intensidade do UHI.

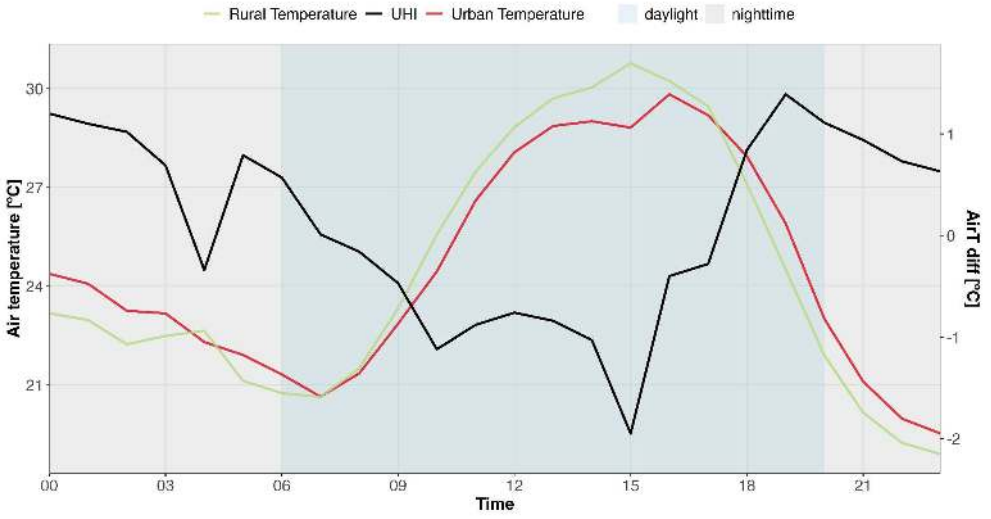



Figure 9: Daytime and nighttime variation of UHI intensity in Lisbon on July 4, 2017 (UTC) calculated using lcz_uhi_intensity(..., by = “daylight”) function from the LCZ4r package.

*Interpolação da temperatura do ar com classes de LCZ*

O pacote LCZ4r oferece duas funções essenciais, lcz_interp_map e lcz_anomaly_map(), projetadas para integrar o framework LCZ na interpolação espacial da temperatura do ar. Essas funções expandem os modelos tradicionais de kriging ao incorporar informações de uso e cobertura do solo específicas para as classes LCZ, além das distâncias espaciais entre os pontos de medição. Essa abordagem inovadora aprimora a representação espacial da variabilidade térmica, resultando em uma representação mais realista dos padrões térmicos urbanos que os métodos convencionais frequentemente ignoram

Para demonstrar os benefícios do uso de interpolação baseada em LCZ, apresentamos o cenário da cidade Curitiba, cuja temperatura foi medida em oito estações diferentes pela cidade.

Na cidade de Curitiba e região metropolitana, a interpolação baseada no LCZ demonstrou sua capacidade de lidar com a escassez de dados (Figura 10). O mapa interpolado com LCZ gera distribuições suaves e realistas de temperatura do ar, mesmo em áreas sem medições diretas (Painel A), além de reduzir o "efeito alvo", um problema comum nos métodos de interpolação convencionais causado por estações distribuídas de forma esparsa (Painel B).

Esse exemplo destaca o potencial das técnicas de interpolação baseadas no LCZ para melhorar a representatividade espaço-temporal das análises de temperatura do ar em cidades com diferentes densidades de estações. Uma melhor distribuição espacial dos dados de temperatura do ar ajuda pesquisadores, urbanistas e tomadores de decisão a tomar ações informadas para combater os efeitos negativos do UHI.

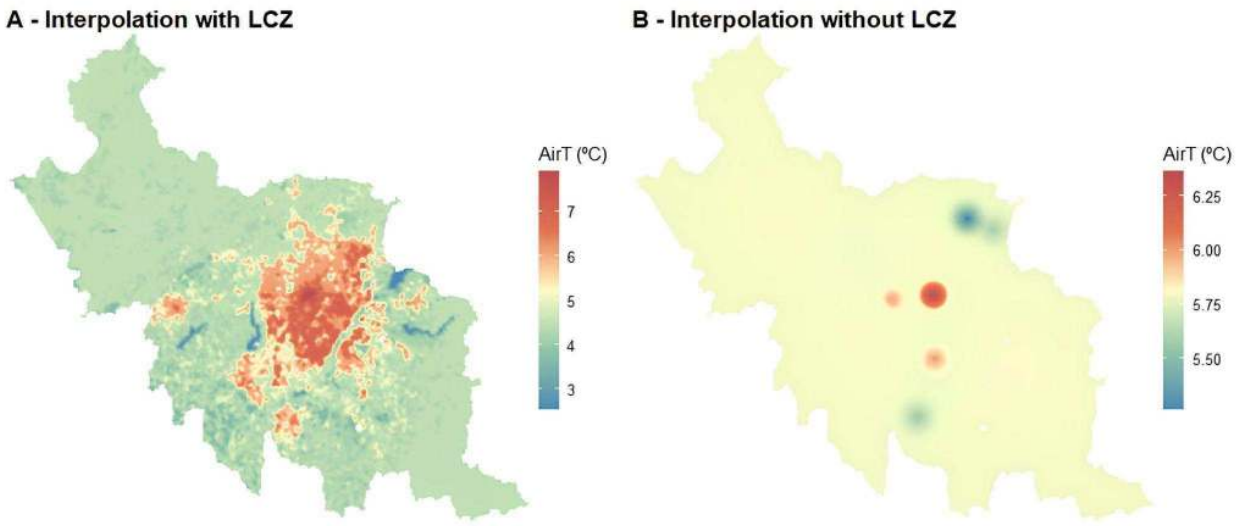



Figura 10: Interpolação diária da temperatura do ar com resolução de 100x100 m para Curitiba e região metropolitana no dia 1º de setembro de 2016 (Hora Local), com (A) classificação LCZ e (B) sem LCZ. O mapa LCZ foi derivado do produto Global LCZ e gerado utilizando a função lcz_get_map_euro(). A interpolação foi realizada com a função lcz_interp_map() do pacote LCZ4r, utilizando oito estações meteorológicas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O pacote LCZ4r em sua versão 0.1.0 possui algumas limitações que devem ser consideradas. Embora tenha mostrado desempenho consistente e confiável na geração de mapas LCZ e resultados em escalas municipais e estaduais, o procedimento de extração de mapas LCZ tem causado problemas significativos de processamento e alocação de memória em escalas regionais e nacionais, resultando em instabilidade nas funções gerais e locais a depender da dimensão da área de estudo.

Os usuários devem ter cuidado ao usar as funções lcz_get_* com rótulos de identificação da plataforma OpenStreetMaps (tags, ids, nomes), pois podem surgir discrepâncias ao comparar o zoneamento oficial, limites e fronteiras com dados OSM gerados pela comunidade. Além disso, os dados OSM podem ter cobertura espacial limitada em determinadas áreas, tornando impossível obter dados de mapa de LCZ. Em casos onde o LCZ4r não funciona bem, particularmente em regiões oceânicas e insulares, é recomendado que os usuários utilizem seus próprios arquivos raster de mapa LCZ e arquivos em formato *shapefile* através do argumento 'ROI' das funções lcz_get_*.

O pacote LCZ4r é uma ferramenta de código aberto e colaborativa. Todas as suas funções estão hospedadas na plataforma GitHub, onde os usuários podem se tornar colaboradores,

permitindo-lhes acessar os códigos em R e fazer alterações em funções específicas do pacote (https://github.com/ByMaxAnjos/LCZ4r/). Valorizamos muito o feedback dos usuários e incentivamos os usuários (e colaboradores) a compartilhar novas ideias e relatar quaisquer problemas ao usar o LCZ4r. Esse feedback é essencial para nos ajudar a melhorar a ferramenta em futuras versões.

Há pelo menos três planos para o desenvolvimento futuro do LCZ4r. Primeiro, enquanto a versão atual do LCZ4r foca na camada de dossel urbano UHI, nossa próxima versão visa ampliar o escopo da análise de UHI. Especificamente, planejamos desenvolver uma função, lcz_uhi_surface(), que gera Temperatura da Superfície Terrestre (LST) para qualquer área terrestre no mundo todo. Essa nova funcionalidade permitirá que os usuários obtenham dados de LST para uma ampla gama de locais, facilitando uma análise mais abrangente do UHI, além das temperaturas do ar de altura.

O segundo plano é melhorar a acessibilidade e usabilidade da classificação LCZ, desenvolvendo uma versão multilíngue e integrando o software LCZ4r a uma interface de Sistema de Informação Geográfica (GIS) fácil de usar (https://bymaxanjos.github.io/LCZ4r/articles/Introd_QGIS_LCZ4r.html). Ao adicionar o script das funções LCZ4r ao ARCGIS e QGIS, podemos melhorar o uso dos dados LCZ por meio do ambiente de Interface Gráfica de Usuário (GUI). Essa integração multilíngue seria benéfica para usuários de diferentes origens linguísticas e culturais que não estão familiarizados com programação por meio de uma interface de linha de comando.

Por fim, planejamos também traduzir o pacote LCZ4r para outras linguagens de programação, como Python e Matlab. Com isso, nosso objetivo é aumentar a acessibilidade dos dados LCZ e modelagem do UHI para uma gama mais ampla de usuários de programação. Essa etapa, juntamente com a ponte LCZ4r-GIS, permitirá que milhões de usuários utilizem o LCZ4r e contribuam para a análise de LCZ e UHI em diferentes plataformas e aplicações de programação.

## Referências Bibliográficas

ALCOFORADO, M.-J.; ANDRADE, H. Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): main features and modelling attempts. Theoretical and Applied Climatology, v. 84, p. 151–159, 2006.

ALEXANDER, P.; MILLS, G. Local Climate Classification and Dublin's Urban Heat Island. Atmosphere, v. 5, p. 755–774, 2014.

AKBARI, H.; MENON, S.; ROSENFELD, A. Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO2. Climatic Change, v. 94, p. 275–286, 2009.

ANJOS, M.; LOPES, A.; LUCENA, A. J. D.; MENDONÇA, F. Sea Breeze Front and Outdoor Thermal Comfort during Summer in Northeastern Brazil. Atmosphere, v. 11, p. 1013, 2020.

ANJOS, M.; LOPES, A. Urban Heat Island and Park Cool Island Intensities in the Coastal City of Aracaju, North-Eastern Brazil. Sustainability, v. 9, p. 1379, 2017.

ANJOS, M. et al. Analysis of the urban heat island under different synoptic patterns using local climate zones. Building and Environment, v. 185, p. 107268, 2020.

ARAÚJO, Christiane Alves; BARBOSA, Ricardo Victor Rodrigues. Zonas Climáticas Locais: breve revisão da literatura em estudos de clima urbano no Brasil. In: CONGRESSO ARAGUAIENSE DE CIÊNCIAS EXATA, TECNOLÓGICA E SOCIAL APLICADA, p. xx, 2021, Santana do Araguaia. Anais... Santana do Araguaia: III CONARA, 2021

BECHTEL, B. et al. Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. ISPRS International Journal of Geo-Information, v. 4, p. 199–219, 2015.

BELLUCCO, V. et al. Modelling the biogenic CO2 exchange in urban and non-urban ecosystems through the assessment of light-response curve parameters. Agricultural and Forest Meteorology, v. 236, p. 113–122, 2017.

CARSLAW, D. C.; ROPKINS, K. openair — An R package for air quality data analysis. Environmental Modelling & Software, v. 27-28, p. 52–61, 2012.

CHING, J. et al. WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 99, p. 1907–1924, 2018.

DEMUZERE, M.; KITTNER, J.; BECHTEL, B. LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. Frontiers in Environmental Science, v. 9, p. 637455, 2021.

DEMUZERE, M.; ARGÜESO, D.; ZONATO, A.; KITTNER, J. W2W: A Python package that injects WUDAPT's Local Climate Zone information in WRF. [S.l.], 2022. Disponível em: https://doi.org/10.5281/ZENODO.7016607.

DEMUZERE, M.; BECHTEL, B.; MIDDLE, A.; MILLS, G. European LCZ map. [S.l.], 2022. Disponível em: https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.13322450.

DEMUZERE, M. et al. Combining expert and crowd-sourced training data to map urban form and functions for the continental US. Scientific Data, v. 7, p. 264, 2020.

DEMUZERE, M. et al. A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. Earth System Science Data, v. 14, p. 3835–3873, 2022.

DEMUZERE, M.; BECHTEL, B.; MIDDLE, A.; MILLS, G. Mapping Europe into local climate zones. PLOS ONE, v. 14, p. e0214474, 2019.

DIRKSEN, M.; RONDA, R. J.; THEEUWES, N. E.; PAGANI, G. A. Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. Urban Climate, v. 30, p. 100498, 2019.

FENNER, D.; MEIER, F.; SCHERER, D.; POLZE, A. Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001–2010. Urban Climate, v. 10, p. 308–331, 2014.

GOUSSEFF, M.; BOCHER, E.; BERNARD, J.; WIEDERHOLD, E. L. S. lczexplore: an R package to explore Local Climate Zone classifications. Journal of Open Source Software, v. 8, p. 5445, 2023.

HIEMSTRA, P.; PEBESMA, E.; TWENHÖFEL, C.; HEUVELINK, G. automap: Automatic interpolation package. 2021.

HUANG, F. et al. Mapping local climate zones for cities: A large review. *Remote Sensing of Environment*, v. 292, p. 113573, 2023.

KLEIN, M.; BAUER, N.; MATICOLLI, G. Dados de Estações Automáticas de Superfície e sua Aplicação para o Estudo da Ilha de Calor em Curitiba-PR. In: Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia, v. 1, p. 204–208, Rio de Janeiro, 2022.

KUHN, M.; WICKHAM, H. recipes: Preprocessing Tools to Create Design Matrices. 2021.

KUHN, M.; WICKHAM, H. recipes: Preprocessing and Feature Engineering Steps for Modeling. Disponível em: https://github.com/tidymodels/recipes. Acesso em: 21 fev. 2025.

LOPES, A.; ALVES, E.; ALCOFORADO, M. J.; MACHETE, R. Lisbon Urban Heat Island Updated: New Highlights about the Relationships between Thermal Patterns and Wind Regimes. Advances in Meteorology, 2013, p. 1–11, 2013.

LEHNERT, M.; SAVIĆ, S.; MILOŠEVIĆ, D.; DUNJIĆ, J.; GELETIČ, J. Mapping Local Climate Zones and Their Applications in European Urban Environments: A Systematic Literature Review and Future Development Trends. ISPRS International Journal of Geo-Information, v. 10, p. 260, 2021.

MA, L.; ZHU, X.; QIU, C.; BLASCHKE, T.; LI, M. Advances of Local Climate Zone Mapping and Its Practice Using Object-Based Image Analysis. Atmosphere, v. 12, p. 1146, 2021.

MEIER, F.; FENNER, D.; GRASSMANN, T.; OTTO, M.; SCHERER, D. Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. Urban Climate, v. 19, p. 170–191, 2017.

MENDONÇA, F. A.; ROSEGHINI, W.; ARAUJO, W.; SCHMITZ, L. Incidência atual e cenários futuros da dengue na capital do Estado do Paraná. In: A DENGUE NO BRASIL: Uma Perspectiva Geográfica. Curitiba, 2021. p. 501–518.

PADGHAM, M.; STEPINiski, T. osmdata: Import OpenStreetMap data as simple features or spatial objects. 2021.

PEBESMA, E.; BIVAND, R. S. gstat: Spatial and spatio-temporal geostatistical modelling, prediction, and simulation. 2005.

QI, M. et al. Mapping urban form into local climate zones for the continental US from 1986–2020. Scientific Data, v. 11, p. 195, 2024.

RSTUDIO TEAM. RStudio: Integrated Development for R. RStudio. PBC, 2022.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, p. 1879–1900, 2012.

STEWART, I. D.; OKE, T. R.; KRAYENHOFF, E. S. Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations. International Journal of Climatology, v. 34, p. 1062–1080, 2014.

TIOBE. TIOBE Index for March 2024. TIOBE Software BV, 2024.

TIPPMANN, S. Programming tools: Adventures with R. Nature, v. 517, p. 109–110, 2015.

WICKHAM, H.; FRANÇOIS, R.; HENRY, L.; MÜLLER, K.; VAUGHAN, D. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. 2023.

WICKHAM, H. ggplot2: Elegant graphics for data analysis. Springer-Verlag, 2016.

ZHU, X. X. et al. The urban morphology on our planet – Global perspectives from space. Remote Sensing of Environment, v. 269, p. 112794, 2022.

## SOBRE OS AUTORES

**Max Wendell Batista dos Anjos,** - Doutor em Geografia, Professor Visitante do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

E-mail: maxanjos@campus.ul.pt

**Dayvid Carlos de Medeiros** - Licenciado em Geografia, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

E-mail: dayvidcarlos.14@gmail.com

**Francisco Jablinski Castelhano** - Doutor em Geografia, Professor Adjunto do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

E-mail: fjcastelhano@gmail.com

**Data de submissão: 01 de janeiro de 2024**

**Aceito para publicação: 23 de abril de 2025**

**Data de publicação: 06 de junho de 2025**