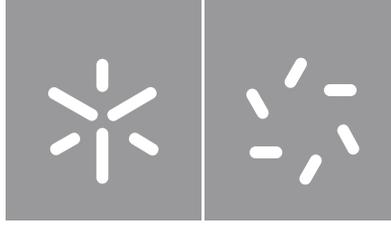


Universidade do Minho
Escola de Ciências

Samuel Lopes da Rocha

Ilhas de Calor na cidade de Braga - localização e estudo dos impactos no consumo de energia resultantes da sua mitigação



Universidade do Minho

Escola de Ciências

Samuel Lopes da Rocha

**Ilhas de Calor na cidade de Braga -
localização e estudo dos impactos no
consumo de energia resultantes da sua
mitigação**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Ciência e Tecnologias do Ambiente -
Ramo em Energia

Trabalho efetuado sob a orientação do
Doutor Mário Rui Cunha Pereira
Doutor Daniel Souto Rodrigues

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-Não Comercial-Sem Derivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Samuel Lopes da Rocha

Samuel Lopes da Rocha

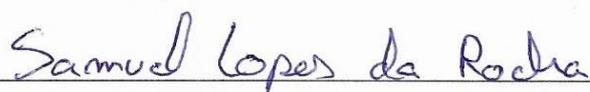
Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, a minha família por me ter apoiado e permitido a realização deste percurso. Em segundo lugar, agradeço a partilha e apoio de amigos e colegas que tornaram esta caminhada mais leve e prazerosa. Por fim, agradeço aos meus orientadores, Dr. Mário Pereira e Dr. Daniel Rodrigues pela ajuda no desenvolvimento desta dissertação

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.



Samuel Lopes da Rocha

Samuel Lopes da Rocha

Ilhas de Calor na cidade de Braga – localização e estudo dos impactos no consumo de energia resultantes da sua mitigação

Resumo

O aumento do fluxo da população rural para os centros urbanos, como o crescimento desorganizado das cidades com ruas e praças estreitas, pouca vegetação e materiais com alto índice de absorção solar têm causado a criação e o aumento de regiões de elevada temperatura em relação à temperatura mais baixa sentida em áreas circundantes, como a área rural. Este fenómeno criado pelo Homem é conhecido como ilhas de calor urbano.

As ilhas de calor impelem ao surgimento de problemas nefastos tanto para o meio ambiente (como alterações bioquímicas, perturbação nos processos metabólicos de espécies e mudanças nos fenómenos climáticos) como também para o ser humano (como agravamento de problemas de saúde, aumento do stress térmico e aumento do consumo da água e da energia que reflete no pagamento final do consumidor).

O objetivo desta dissertação consiste na análise e determinação de regiões da cidade de Braga com efeito de ilha de calor através do mapeamento da temperatura de superfície por deteção remota, utilizando o software ArcGis. Neste estudo são considerados os possíveis fatores responsáveis pela intensificação deste efeito e são propostas medidas de mitigação para reduzir a temperatura nessa região. A simulação da implementação das medidas de mitigação causou uma diminuição na temperatura do ar, que permitiu uma redução do consumo energético de 6.68% na área de estudo.

Palavras-chave: ilhas de calor, fatores influenciadores, medidas de mitigação, consumo enérgico.

Heat Islands in the city of Braga – location and study of impacts on energy consumption resulting from their mitigation

Abstract

The increase rural population flow to urban centers, as the disorganized growth of cities with narrow streets and squares, few vegetation and materials with a high solar absorption rate, have caused the appear and increase of high temperature regions in relation to the lower temperature felt in surrounding areas, such as rural areas. This man-made phenomenon is known as urban heat islands.

Heat islands lead to the emergence of harmful problems both to the nature (such as biochemical changes, disturbance in the metabolic processes of species and changes in climatic phenomena) and also to humans (such as aggravation of health problems, increased heat stress and increased consumption of water and energy, which is reflected in the final payment of the consumer).

The objective of this dissertation is the analysis and determination of regions of the city of Braga with heat island effect through mapping the surface temperature by remote sensing, using the ArcGis software. In this study, the possible factors responsible for the intensification of this effect are considered and mitigation measures are proposed to reduce the temperature in this region. The simulation of the implementation of mitigation measures motivated a decrease in air temperature, which allowed a reduction in energy consumption by 6.68% in the study area.

Keywords: heat islands, influencing factors, mitigation measures, energy consumption.

Índice

Resumo	V
Abstract	VI
Índice de figuras	IX
Índice de tabelas	XI
Abreviaturas	XII
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	4
2. Ilhas de Calor	4
2.1. Magnitude da ilha de calor	7
2.2. Causas	9
2.2.1. Geometria/construção	9
2.2.2. Atividade humana	14
2.3. Efeitos	14
2.3.1. Intensificação do calor	15
2.3.2. Recursos naturais	16
2.3.3. Saúde	17
2.3.4. Ecossistemas	19
2.3.5. Clima	20
2.4. Medidas de Mitigação	22
2.4.1. Medidas de simples implementação	22
2.4.2. Medidas de complexa implementação	24
2.5. Alguns estudos publicados sobre o tema	25
2.5.1. Determinação do UHI	25
2.5.2. Consumo energético	27

3. Metodologia	27
3.1. Temperatura da superfície Terrestre	28
3.2. Média do LST	31
3.3. Efeito da ilha de calor	32
3.4. Parâmetros Influenciadores	32
3.5. Análise da aplicação das medidas de mitigação	35
3.6. Avaliação do consumo energético	37
3.7. Diagrama resumo da metodologia	39
4. Caracterização do local de estudo	40
5. Resultados	41
5.1. Determinação do LST	41
5.2. Localização do efeito de ilha de calor	42
5.3. Descrição da cidade utilizando vários parâmetros	43
5.4. Análise de zonas com elevado efeito UHI	47
5.4.1. Minho Center	47
5.4.2. Parque industrial	49
5.4.3. Rua do Raio e departamento de Música	50
5.5. Medidas de mitigação propostas	52
5.6. Análise da implementação das medidas de mitigação	53
5.7. Avaliação do consumo energético	54
6. Conclusão	55
7. Considerações finais	55
8. Bibliografia	57

Índice de figuras

Figura 1 - Concentração global média atmosférica de CO ₂ medida em partes por milhão (ppm) entre 1629 e 2018	2
Figura 2 - Variação da temperatura média global em relação à temperatura média de 1961-1990 entre 1850 e 2019	3
Figura 3 - Crescimento da população mundial desde o aparecimento das primeiras civilizações até ano de 2019	4
Figura 4 - Número de pessoas no planeta vivendo em ambiente urbano e rural entre 1500 e 2021 ..	5
Figura 5 - Representação do efeito de ilha de calor	7
Figura 6 - Representação do <i>canyon</i> numa planta urbana	10
Figura 7 - Diferentes cenários que demonstraram a alteração do fator SVF	13
Figura 8 - Esquema descritivo vertical do efeito de ilha de calor numa área urbana	20
Figura 9 - Representação de um telhado fresco e de um telhado verde	23
Figura 10 - Mapa da localização das estações meteorológicas	36
Figura 11 - Localização da cidade de Braga	40
Figura 12 - Mapa da temperatura de superfície terrestre da cidade de Braga	41
Figura 13 - Mapa das áreas com efeito de ilha de calor na cidade de Braga	42
Figura 14 – Mapa topográfico da cidade de Braga	43
Figura 15 – Mapa do albedo da cidade de Braga	44
Figura 16 - Mapa do índice de vegetação ajustado ao solo da cidade de Braga (SAVI)	45
Figura 17 - Mapa do índice de humidade da cidade de Braga (NDMI)	46
Figura 18 - Mapa do índice de área construída da cidade de Braga (IBI)	47
Figura 19 – Imagem do centro comercial Minho Center	49

Figura 20 – Imagem do parque industrial	50
Figura 21 – Imagem da rua do Raio e do Departamento de Música	51
Figura 22 - Esboço do centro comercial Minho Center com as alterações com vista a mitigar o efeito de ilha de calor nesta região	52
Figura 23 - Shopping Gaia, Centro comercial Intermarché, Campo do Castelo	53

Índice de tabelas

Tabela 1 – Propriedades térmicas de materiais presentes nos centros urbanos	11
Tabela 2 - Valores do albedo estimados para os seguintes materiais	12
Tabela 3 - Descrição das bandas detetadas pelo satélite Landsat 8	29
Tabela 4 - Irradiância solar espectral exoatmosférica ($ESUN_{\lambda}$) das bandas do satélite Landsat 8	34
Tabela 5 - Intervalo de valores de LST e UHI para as respetivas localizações	43

Lista de abreviaturas e siglas

β - Razão de Bowen

CoP- Coeficiente de Desempenho (*Coefficient of Performance*)

GEEs - Gases de efeito de estufa

HW – Ondas de Calor (*Heat Waves*)

IBI – Índice de Área Construída (*Index-based Built-up Index*)

LCZ - Zonas Climáticas Locais (*Local Climate Zones*)

LST - Temperatura da Superfície Terrestre (*Land Surface Temperature*)

NDMI - Índice de Humidade por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Moisture Index*)

NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*)

PCM 's - Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Materials*)

PM - Material Particulado Suspenso (*Particulate Material*)

Ppm - Parte por Milhão

SAR - Fator Superfície/Área (*Surface Area Ratio*)

SAVI - Índice de vegetação ajustado ao solo (*Soil Adjusted Vegetation Index*)

SVF - Fator de Visão do Céu (*Sky View Factor*)

TOA - Radiação de Topo da Atmosfera (*Top-of-Atmosphere*)

UCZ - Zonas Climáticas Urbanas (*Urban Climate Zones*)

UHI – Ilha de Calor Urbano (*Urban Heat Island*)

VOC – Compostos Orgânicos Voláteis (*Volatile organic compounds*)

1. Introdução

Os temas referentes às alterações e perturbações climáticas têm vindo a se tornar, cada vez mais, o centro de análise e debates. O aumento da temperatura urbana e, conseqüentemente, os seus efeitos negativos são fatores constantemente mais frequentes à volta do planeta. Nos inícios do século XVIII, Luke Howard foi o primeiro a relatar este fenómeno em Londres e, na segunda metade do século XIX, Tim Oke aprofundou melhor este tema (Howard, 1833; Oke, 1968).

1.1. Enquadramento

Não é novidade que a temperatura média do planeta tem aumentado ao longo dos anos. Desde a revolução industrial, setores como a indústria, a agricultura e os transportes desenvolveram-se de forma rápida produzindo como consequência enormes quantidades de gases nocivos com propriedades de aumentar o efeito de estufa (GEEs).

O efeito de estufa corresponde a um fenómeno natural que contribui para manter a temperatura terrestre dentro de um intervalo de valores comportáveis com o desenvolvimento de vida no planeta (Mishra *et al.*, 2010). Este fenómeno consiste na presença de gases como o vapor de água, o dióxido de carbono, o metano, entre outros, que evitam que a radiação infravermelha seja emitida para o espaço na sua totalidade, e reenviam-na para a superfície terrestre. No entanto, o aumento da quantidade destes gases por meio das atividades antrópicas tem vindo a aumentar este efeito, o que leva ao aumento da temperatura terrestre e ao crescimento do aquecimento global.

Entre os fatores que contribuem para este aumento salientam-se a utilização de combustíveis, alterações do uso da terra, produção desorganizada e excessiva de animais e desflorestação (Mishra *et al.*, 2010).

Na figura 1 nota-se que antes da revolução industrial, a concentração de CO₂ não ultrapassava os 300 ppm, no entanto, nas últimas décadas, esse valor foi ultrapassado com a concentração de CO₂ a crescer rapidamente com o passar dos anos. Por outro lado, na figura 2, os registos demonstram que as temperaturas médias globais, nas últimas décadas, aumentaram acentuadamente (aproximadamente 0.7°C) acima da linha de base de 1961/1990. Em comparação à temperatura registrada em 1850 revela-se um aumento médio de temperatura na ordem dos 1.1°C. Demonstrando que o aumento do CO₂ tem certa percentagem significativa no aumento da temperatura média do planeta.

Em 2015, foi aprovado o acordo de Paris que clarificou que o aumento da temperatura não deve ultrapassar os 2°C face aos níveis pré-industriais. Preferencialmente, a temperatura deve aproximar-se de 1.5°C ao longo do século XXI, evitando graves consequências no clima, agricultura, economia, saúde, entre outros (Michaelowa *et al.*, 2018).

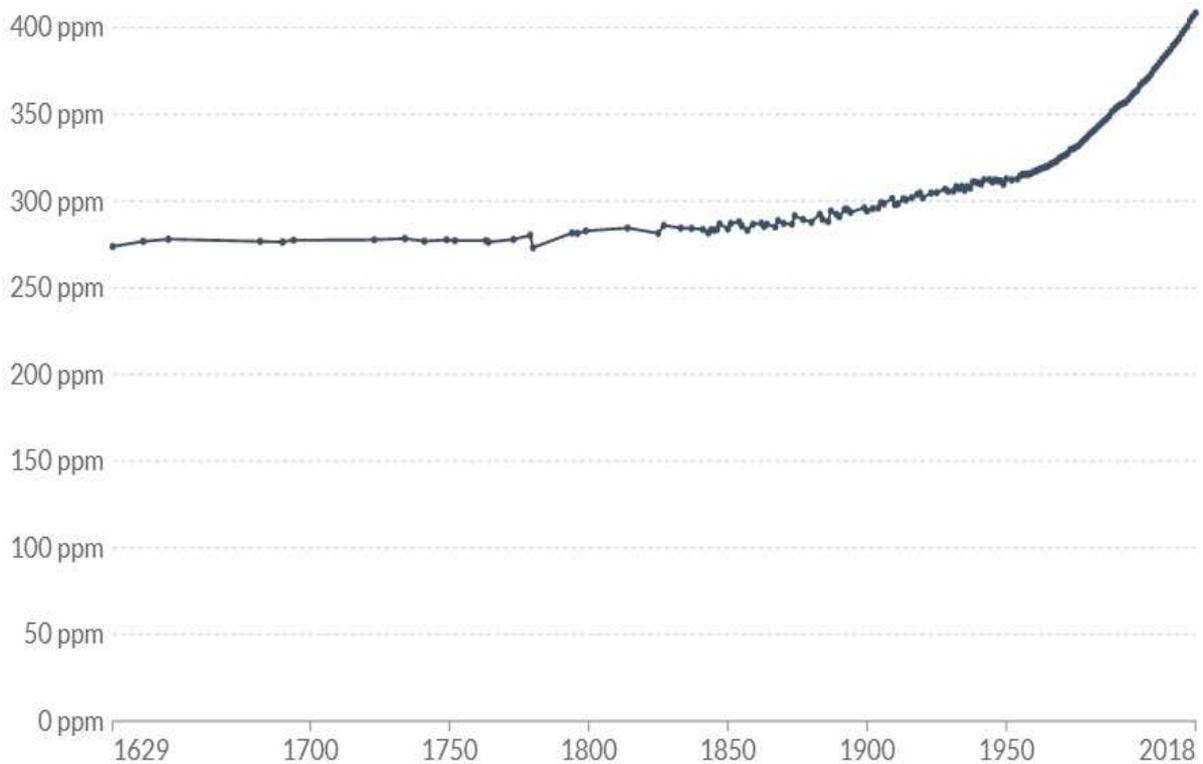


Figura 1 - Concentração global média atmosférica de CO₂ medida em partes por milhão (ppm) entre 1629 e 2018. (Our World in Data, 2020)

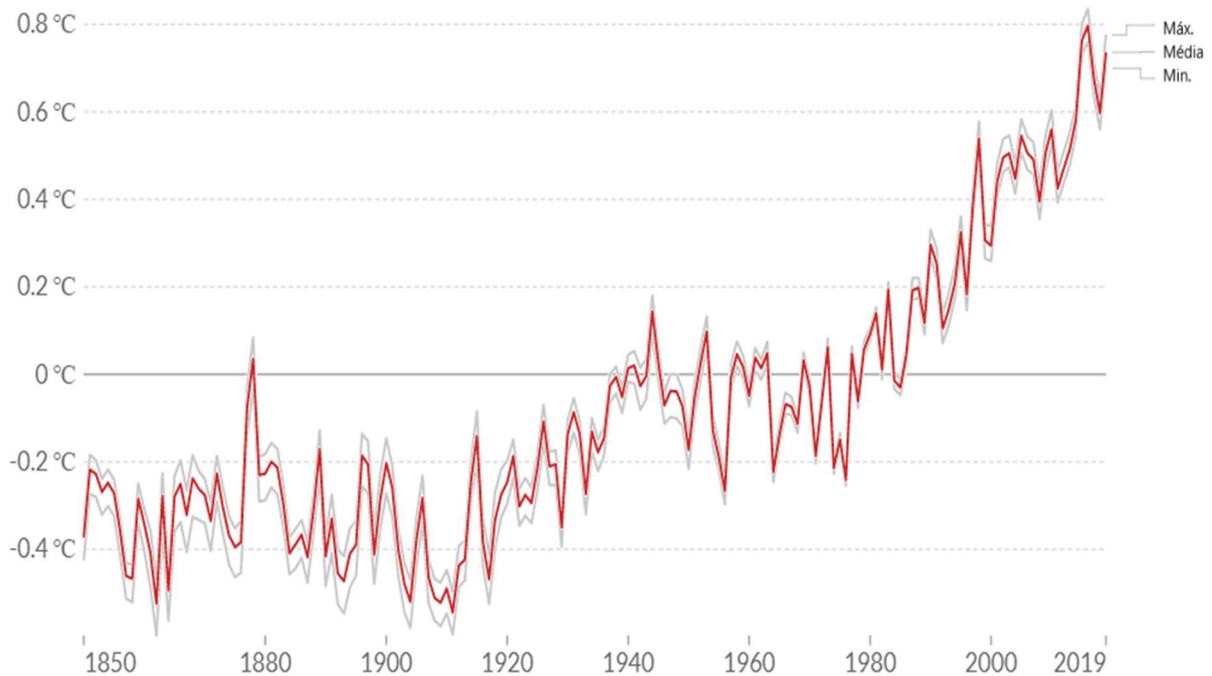


Figura 2 – Variação da temperatura média global em relação à temperatura média de 1961-1990 entre 1850 e 2019. (Adaptado de Our World in Data, 2020)

O aumento da temperatura está a causar danos ao redor do planeta, participando em alterações na flora e da fauna em diferentes regiões como na variação da frequência de eventos climáticos ou meteorológicos, tais como secas e inundações, o que leva por sua vez à degradação dos recursos hídricos e ao aparecimento de pragas e doenças (Mishra *et al.*, 2010). Estas alterações, para além, de afetarem os ecossistemas também atingem negativamente a saúde pública e a economia das populações.

Embora estes efeitos sejam sentidos gradualmente de forma uniforme por todo o planeta, a temperatura média global subiu entre 1.1°C e 1.2°C em 2021, os impactos negativos são sentidos de forma mais acentuada nos centros urbanos (United Nations Environment Programme, 2021). Nos centros urbanos, as temperaturas atingem valores superiores, na ordem de 1°C ou 8°C (e, por vezes, podem alcançar os 15°C), em relação a temperatura média global, devido ao denominado efeito das ilhas de calor (Mohajerani *et al.*, 2017).

1.2. Objetivos

Como será analisado na secção seguinte, a presença do efeito da ilha de calor amplia diversas consequências com impacto no ambiente, clima, saúde humana e economia. Dessa forma, este trabalho concentra-se na análise deste fenómeno urbano e a sua relação com o consumo energético. Esta avaliação procede-se tanto ao nível energético como ao nível do valor monetário.

Escolheu-se a cidade de Braga como área para estudar o efeito da ilha de calor em várias regiões e averiguar que possíveis causas estarão a promover esse aumento de temperatura. Em seguida, pretende-se escolher medidas de mitigação para reduzir o efeito de ilha de calor numa específica área com o objetivo para averiguar a possível quantidade de energia elétrica amortizada utilizada pelos sistemas de arrefecimento, como também, o possível valor monetário poupado.

2. Ilhas de calor

Desde meados e finais do século XVIII, a população mundial tem vindo a crescer de forma exponencial, atingindo em 2021 o patamar de 7.88 mil milhões (figura 3). Este enorme crescimento deveu-se (e deve-se) aos progressos na indústria alimentícia, aos desenvolvimentos tecnológicos e à enorme evolução no campo da medicina/farmacologia (Thomson, 2020).

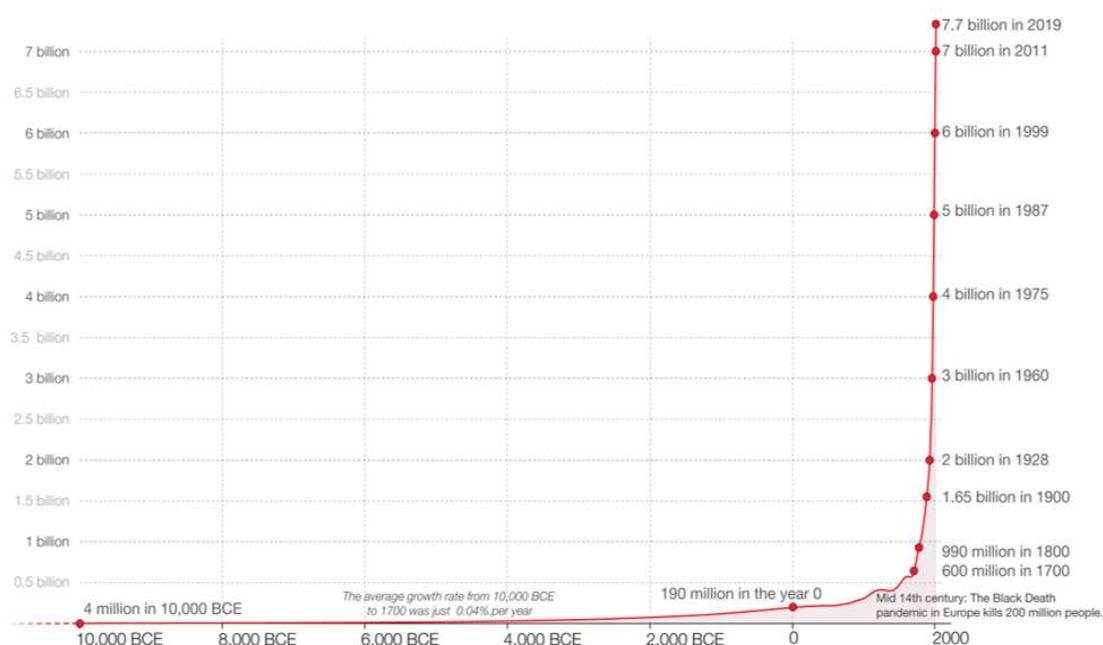


Figura 3 - Crescimento da população mundial deste o aparecimento das primeiras civilizações até ano de 2019 (Our World in Data, 2020)

Por outro lado, esta explosão demográfica tem sido acompanhada pelo contínuo fenómeno social denominado de êxodo rural (figura 4). Por volta da mesma altura que ocorreu a enorme explosão demográfica, as populações começaram a sair do campo para ir viver para as cidades ou centros urbanos, que ofereciam trabalho e benefícios económicos (Deschacht e Winter, 2015). Em 2021, a população que vive em meio urbano ultrapassou os 4 mil milhões enquanto que no meio rural o número atingiu apenas 3.42 mil milhões.

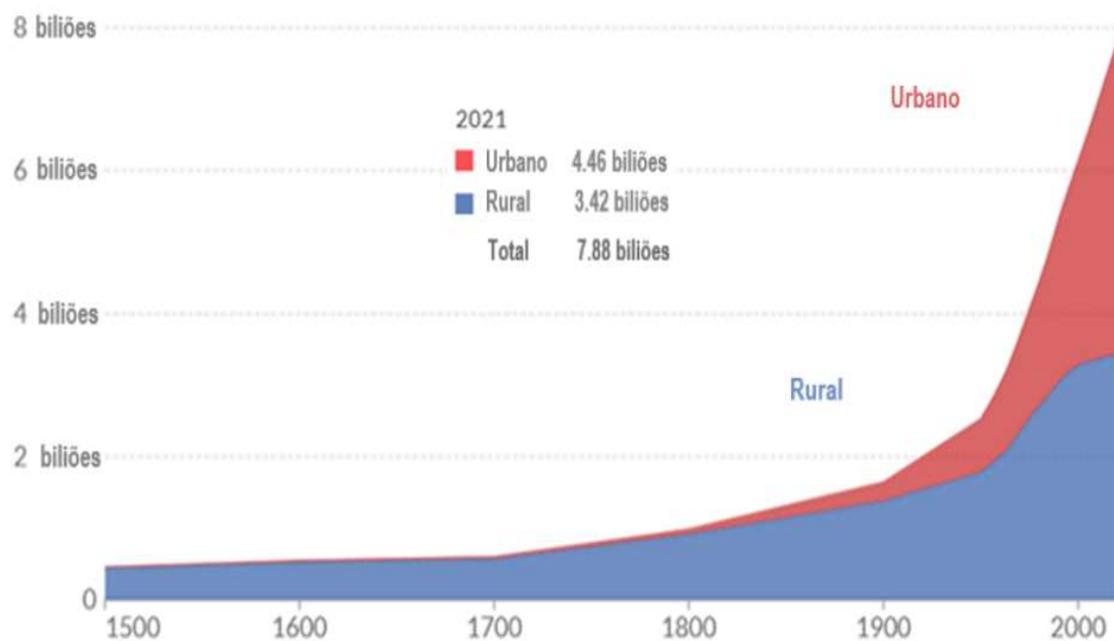


Figura 4 - Número de pessoas no planeta vivendo em ambiente urbano e rural entre 1500 e 2021 (Adaptado de *Our World in Data*, 2021)

Deste modo, em consequência do aumento da população com um estilo de vida urbana, as cidades começaram a expandir por todo o mundo tanto em quantidade como em dimensão, o que aumentou a nossa atenção sobre a ocorrência das ilhas de calor.

As ilhas de calor são áreas, volumes ou regiões, tais como as cidades, caracterizadas por temperaturas significativamente mais altas do que as regiões circundantes, como as zonas rurais que apresentam temperaturas mais baixas (Mohajerani *et al.*, 2017). Estudos revelaram que este fenómeno é mais predominante à noite, quando as construções libertam calor armazenado durante o dia, como também é mais perceptível no inverno do que no verão. Geralmente, os valores mais altos são atingidos em locais de pouca nebulosidade com pouco ou nenhum vento (Pótrolniczak *et al.*, 2017). Além disso,

este efeito não natural pode diferir de magnitude consoante a região em que o centro populacional, em questão, se localiza. Ou seja, segundo vários dados, cidades situadas em climas secos têm um efeito de ilha de calor menor se tivessem localizadas noutras regiões de climas diferentes. Em climas mais húmidos, diferenças na taxa de evapotranspiração e eventos de convecção são determinantes para o comportamento e a intensidade da temperatura nas cidades em relação às áreas circundantes.

Por exemplo, durante períodos mais quentes, o efeito de ilha de calor nas cidades americanas de grande envergadura pode exceder os 12°C, enquanto nas cidades europeias, em média, pode atingir aproximadamente 10°C. Em Madrid, a magnitude máxima deste efeito, nos meses de verão, pode chegar aos 5°C e em Roma pode aproximar-se dos 3°C ou 4°C durante a estação quente (Pótrolniczak *et al.*, 2017) e 2°C durante o inverno. Por outro lado, num estudo realizado em Lisboa, em Portugal, em 2006, revelou que o UHI (ilha de calor urbano) durante a noite variou entre os 0.5°C e os 4°C. Enquanto que, mais a norte, em Aveiro, a valor máximo medido de UHI foi de 7.5°C (Faheda *et al.*, 2020).

A intensidade do efeito de ilha de calor depende, como foi mencionado, tanto de características meteorológicas (presença de nuvens, velocidade do vento e humidade) como de características físicas da região (impermeabilidade e propriedades térmicas dos materiais, geometria da região, entre outros). A escala deste fenómeno pode ser aplicada em qualquer cenário, desde áreas de poucos metros quadrados até a áreas de vários milhares de quilómetros quadrados (Vujovic *et al.*, 2021).

As variações de temperatura entre a zona urbana e rural podem ser representadas no gráfico ilustrado na figura 5, onde o início e o fim do gráfico representa o espaço rural associado as suas baixas temperaturas e o centro do gráfico representa o espaço urbano associado as temperaturas mais altas registradas. O termo 'ilha' faz referência, precisamente, ao grande pico no centro do gráfico caracterizado pelas altas temperaturas em relação às outras regiões com temperaturas mais baixas.

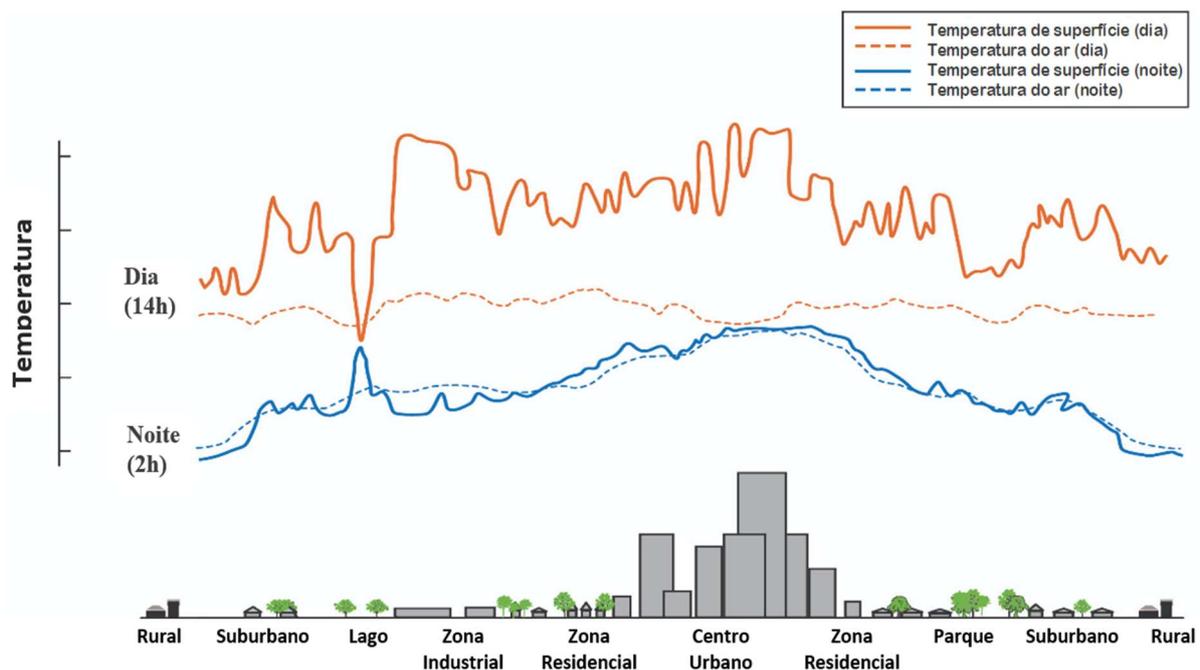


Figura 5 – Representação do efeito de ilha de calor (Adaptado de UNEP, 2021)

2.1. Magnitude da ilha de Calor

Geralmente, a diferença entre as duas regiões (cidades e área rural) é mais perceptível durante a noite e/ou na presença de ventos de fraca intensidade (Vujovic *et al.*, 2021). Esta diferença traduz a magnitude do efeito da ilha de calor da cidade. No entanto, nem sempre é simples determinar a zona com características rurais para delinear a magnitude do efeito referido (o adjetivo “rural”, nestes casos, é utilizado para definir qualquer localização não urbana ou como ponto de referência para determinar as ilhas de calor). Idealmente, o ponto “não urbano” deve situar-se simultaneamente próximo à cidade e ser uma zona que não tenha sofrido grandes alterações por parte do ser humano. Ou seja, corresponde a regiões com uma insignificante produção de calor antropogénico e desprovida de materiais pouco permeáveis como o asfalto e o cimento, demonstrando uma relação entre a quantidade de calor sensível e latente semelhante ao que é encontrado numa área de cobertura natural/florestal (Martin-Vide *et al.*, 2015). Porém, os limites da cidade são muitas vezes imprecisos, dependendo inclusive do país e da região do globo. Uma grande parte das cidades não faz fronteira com o espaço rural, mas com zonas periurbanas e rurbanas que são influenciadas, até certo ponto, pela cidade e pelas suas atividades.

Com o objetivo de ultrapassar esta dificuldade, algumas soluções foram propostas. No trabalho de Oke, em 2006, foram propostas sete Zonas Climáticas Urbanas (UCZ – *Urban Climate Zones*): desde zonas urbanas com edifícios altos, apresentando mais de 90% de superfície construída até regiões semirrurais espalhadas numa área natural ou agrícola (por exemplo fazendas e herdades) com menos de 10% de superfície construída (Martin-Vide *et al.*, 2015). Em 2009, Stewart e Oke reformularam a classificação UCZ para um sistema mais abrangente denominado de Zonas Climáticas Locais (LCZ – *Local Climate Zones*). Este modelo divide a “paisagem” em 19 LCZ pertencentes a quatro grupos paisagísticos (cidade, agrícola, natural e misto) de acordo com a cobertura superficial e estrutura superficial (Martin-Vide *et al.*, 2015). Este modelo foi empregue, por exemplo, num estudo em Hong Kong, devido à natureza complexa do seu território.

Por outro lado, a escolha da localização da área não urbana tem de seguir determinados requisitos face à disposição geográfica para determinação do valor correto da intensidade do efeito da ilha de calor. Os fatores correspondentes à altura e à distância do mar/costa são importantes e significantes, ao contrário da latitude que não provoca alterações significativas no resultado (Martin-Vide *et al.*, 2015). Desta forma, tanto a localização da zona urbana como a não urbana têm de se situar à mesma altura em relação ao nível médio do mar, caso contrário, o efeito urbano poderia ser camuflado no cálculo da diferença de temperatura. Considerando o gradiente médio de temperatura vertical ($-0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$), constata-se que 30.8 m causa uma variação de 0.2°C e, por este motivo e como regra geral, a altitude da região escolhida não deve diferir da outra zona selecionada em mais de 30 m (aproximadamente). No entanto, em noites com intensa inversão térmica terrestre (fenómeno natural que corresponde à inversão das camadas atmosféricas de forma que o ar frio permanece em baixas altitudes e o ar quente nas camadas mais elevadas), 30 m de diferença entre as duas regiões escolhidas pode causar diferenças substanciais no resultado. Nesses casos, é preferível utilizar regiões com uma diferença de altura inferior a 10 m, caso contrário deve ser adicionado a correção adequada.

Em relação ao outro fator, é importante escolher áreas que estejam à mesma distância do mar ou da costa (Martin-Vide *et al.*, 2015). Todos os corpos de água (rio, mar, lagos, entre outros) regulam, de certa forma, a temperatura e atenuam as diferenças de temperatura diárias e sazonais. Numa grande área urbana interior de clima continental, uma diferença de dezenas de quilômetros de distância do mar entre a zona urbana e não urbana não causa diferenças significativas de temperatura. Por outro lado, ao lado da costa ou à beira de um grande lago, o efeito do corpo de água diminui ou aumenta rapidamente à medida que nos afastamos ou aproximamos dele, respetivamente. No entanto,

a relação entre a distância ao corpo de água e a temperatura não é linear. Além disso, o fator "distância do mar" pode depender tanto da época do ano, da latitude, da temperatura do ar como também das correntes marinhas. Por exemplo, nas planícies de Valência, em Espanha, a temperatura mínima média em janeiro diminui aproximadamente 0.23°C/km e em julho 0.11°C/km com a distância do mar.

2.2. Causas

Considerando o que abordado anteriormente, quando o equilíbrio energético de uma área urbana é alterado, ocorre um aumento de temperatura ou um processo de arrefecimento mais lento (situação após o pôr do sol) em relação às áreas circundantes. Este desequilíbrio pode decorrer como resultado de um fator ou, normalmente, da combinação de vários fatores.

2.2.1. Geometria/construção

Como foi referido anteriormente, o fator com mais impacto no efeito das ilhas de calor é o aumento da urbanização. As cidades de hoje continuam a aumentar em tamanho e número, e as áreas abertas com vegetação diminuem gradualmente, contribuindo para um aumento de episódios de ilhas de calor. De acordo com o Fundo de População das Nações Unidas, 61% da população mundial viverá em cidades até 2030. Por este motivo e da alta densidade urbana, as cidades apresentam um fator superfície/área (SAR- *Surface Area Ratio*) maior do que as regiões rurais, ou seja, a área de superfície urbana é maior em relação à sua área horizontal (Mohajerani *et al.*, 2017). Enquanto que as áreas rurais tendem a ter um SAR próximo a 1, as áreas residenciais exibem um SAR na ordem de 2 ou 3 e os núcleos urbanos de 5 ou superior. Por exemplo, na cidade de Manhattan, o SAR aproxima-se de valores iguais ou superiores a 10.

Além disto, o aumento das cidades acarreta um aumento da construção baseada em materiais de alta capacidade térmica, como a pedra, o cimento, o asfalto, o tijolo, entre outros. As características hidráulicas, radiativas e térmicas destes materiais são completamente diferentes em comparação com as do solo natural, rocha e/ou vegetação (Mohajerani *et al.*, 2017).

Entre as construções com mais impacto no efeito das ilhas de calor destacam-se os *canyons* (Figura 6). Os *canyons* urbanos são estruturas geométricas representas por uma estrada/corredor

linear cercada por extensas “paredes” de construções urbanas altas (como edifícios) em dois lados e aberta nos outros dois lados. Estas estruturas urbanas influenciam de forma significativa a magnitude do efeito da ilha de calor (Sen e Roesler., 2020). Por um lado, promovem a dissipação turbulenta da energia cinética do vento, alterando a sua velocidade e a dissipação do calor. Por outro lado, devido a sua orientação no perfil do mapa urbano e a sua dimensão, os *canyons* favorecem diferentes perfis de temperatura local.

Em estudos realizados numa cidade semiárida de Constantine, na Argélia, descobriu-se que a temperatura nos *canyons* pode atingir cerca de 3 - 6 °C em comparação com as áreas rurais circundantes (Bakarmana e Chang., 2015). Enquanto que, em Fez, Marrocos, verificou-se que a forma compacta dos *canyons* tem efeito de arrefecimento durante o dia, provavelmente devido ao efeito de sombra, que promove o conforto térmico dos habitantes.



Figura 6 – Representação do canyon numa planta urbana (Bakarmana e Chang., 2015)

Além destas estruturas, os pavimentos contribuem, também, para o aumento do UHI. Os pavimentos que constituem as vias de circulação ocupam uma área significativa dos centros urbanos. Estas estruturas são constituídas por materiais como o asfalto que resulta da combinação de diferentes proporções de agregados de variadas dimensões, compostos minerais e um aglutinante betuminoso. Estas combinações conferem diferentes propriedades como a absorção térmica e a capacidade volumétrica de calor, que se refere a quantidade de energia que o material consegue reter por metro cúbico (Vujovic *et al.*, 2021). Além disso, as propriedades dos materiais que constituem estes compostos, como a dimensão e o grau de porosidade, são responsáveis pela condutividade térmica do pavimento. Geralmente, os pavimentos apresentam uma condutividade térmica baixa, o que leva a

uma diminuição da velocidade de dissipação da energia absorvida para camadas inferiores ou para o solo (tabela 1).

A combinação e a incorporação destes materiais no desenvolvimento dos centros urbanos resultam em novas condições de superfície e atmosféricas, alterando o equilíbrio do processo de troca de energia, tal como a evapotranspiração e o fluxo de ar. Uma dessas alterações está associado ao baixo albedo efetivo que as cidades manifestam face às regiões rurais (Mohajerani *et al.*, 2017). Ou seja, a radiação refletida/emitida pelas superfícies e materiais da região urbana é inferior à radiação que recebe do sol, o que pode originar um aumento de temperatura em situações específicas, como a ausência de vegetação nas proximidades. Esta condição provém tanto do baixo albedo de cada material constituinte (tabela 2), resultante do alto grau de absorção e/ou baixa refletividade desses materiais como da morfologia da planta urbana.

Tabela 1 – Propriedades térmicas de materiais presentes nos centros urbanos (Adaptado de Vujovic et al., 2021)

Material (Estado seco)	Observações	Densidade (kg m⁻³ × 10³)	Calor específico (J kg⁻¹ K⁻¹ × 10³)	Capacidade calorífica (J m⁻³ kg⁻¹ K⁻¹ × 10⁶)	Condutividade Térmica (W m⁻¹ K⁻¹)
Asfalto		2.11	0.92	1.94	0.75
Concreto	Granulado	0.32	0.88	0.28	0.08
	Denso	2.40	0.88	2.11	1.52
Pedra		2.68	0.84	2.25	2.19
Tijolo		1.83	0.75	1.37	0.83
Telhas de barro		1.92	0.92	1.77	0.84

Tabela 2 – Valores do albedo estimados para os seguintes materiais (Adaptado de Vujovic et al., 2021)

Superfície	Albedo
Asfalto	0.125
Concreto	0.225
Tijolo	0.3
Pedra	0.275
Vidro	0.305
Madeira	0.15
Telha	0.225
Telhado de alcatrão	0.13
Floresta	0.15
Água	0.5

Devido à geometria particular e complexa das cidades, o calor fica aprisionado e o arrefecimento radiativo das superfícies urbanas durante a noite para o céu mais frio é dificultado pelas obstruções da área urbana (paredes, pontes, estruturas, entre outros). Quanto maior for a altura dos edifícios ou outro tipo de estruturas, maior é o número de reflexões e maior é a quantidade de energia absorvida, o que leva à sua concentração e aquecimento da cidade (Mohajerani *et al.*, 2017). Este aspeto está relacionado ao fator de visão do céu (SVF), que corresponde à fração de céu visível em uma área ou região. Este fator determinar o balanço de radiação da superfície. Por exemplo, a radiação de ondas curtas dentro de um terreno aberto (com um SVF próximo a 1) atinge a superfície sem ser bloqueado, enquanto num terreno saturado de todo o tipo de estruturas (com um SVF menor que 1) ocorre obstrução, aumentando o número de reflexões da radiação (Dirksen *et al.*, 2019). Por outro lado, a radiação de onda longa emitida pela superfície de um campo aberto é refletida em todas as direções em direção à atmosfera, enquanto que numa cidade, a radiação sofre reflexões, e é parcialmente absorvida pelos edifícios e outras estruturas (figura 7).

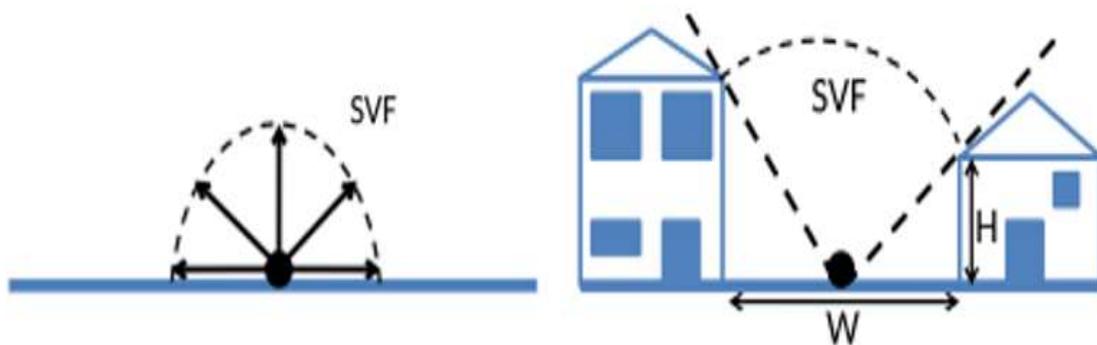


Figura 7 – Diferentes cenários que demonstraram a alteração do fator SVF. Na situação de campo aberto, o SVF aproxima-se de 1 e na situação de terreno com edifícios, o SVF é menor do que 1 (Dirksen *et al.*, 2019)

O SVF relaciona a área de céu obstruída (se for o caso) e a área total da abóbada celeste visível. Os valores de SVF são importantes, pois fornecem informação tanto da geometria da rua e da densidade do edifício como da magnitude do efeito da ilha de calor. Uma área de visão do céu reduzida resulta em um aumento do armazenamento de radiação, levando ao aumento do efeito da ilha de calor. As árvores também reduzem o valor do SVF, no entanto não contribuem muito para o aumento da temperatura como as construções de origem humana, devido a processos biológicos intrínsecos e a sombra que proporcionam.

Por outro lado, por causa do crescimento das cidades através da implementação de materiais impermeáveis e a diminuição da presença de áreas com vegetação ou corpos de água, os fluxos de calor latente e de calor específico são alterados. Estaticamente, foi previsto que até 2050, a expansão do solo urbano e, conseqüentemente, o grau de impermeabilidade aumentará entre 78 e 171%, sendo os continentes da Ásia (entre 46 e 49%) e da África (entre 16 e 25%) os principais responsáveis (Vujovic *et al.*, 2021). Esta expansão causará, no planeta, um aumento da temperatura média global do ar no verão na ordem dos 0,5°C até 3°C.

Desta forma, a razão de Bowen (β) (relação entre calor específico e o calor latente) nas regiões urbanas é maior do que nos subúrbios, devido a baixa ocorrência de processos de evaporação ou arrefecimento evaporativo, o que causa um aumento da temperatura do ar (Mohajerani *et al.*, 2017). Em áreas urbanas, normalmente, os valores de β são aproximadamente 4 ou 5 e 0,2 para as florestas tropicais.

2.2.2. Atividade humana

Nas regiões urbanas ocorre um aumento acentuado do aquecimento antropogénico que promove o crescimento da temperatura no ar como no solo. Em consequência a este aumento, o fator β aumenta em consequência ao crescimento do calor específico (Mohajerani *et al.*, 2017). As fontes podem ser diversas, desde transportes, chaminés, eletrodomésticos, tecnologias de arrefecimento ou aquecimento de edifícios, atividade industrial, centrais de produção energética, entre outros. No entanto, este fluxo de calor é difícil de determinar, sendo calculado por forma indireta ou através da conversão do consumo energético de edifícios escolhidos para o caso. Normalmente, o fluxo de calor antropogénico em áreas residenciais são da ordem de 10 W/m² ou 20 W/m² e em centros urbanos densos aproximadamente de 50 W/m² ou 100 W/m². Em casos específicos ou pontuais a densidade de fluxo pode atingir 500 W/m², como foi relatado no Japão (Moriwaki *et al.*, 2008).

Em último lugar, é de salientar a correlação que os poluentes concentrados nas cidades produzidos pelos transportes ou pelo consumo de energia através do uso de eletrodomésticos têm com o efeito das ilhas de calor. A presença de enormes concentrações de poluentes atmosféricos, tais como dióxido de sulfato, (SO₂), dióxido de nitrogénio (NO₂) e material particulado (PM) podem intensificar o efeito da ilha de calor em áreas urbanas (Ngarambe *et al.*, 2021). Ou seja, as concentrações de poluentes na atmosfera aprisionados na área urbana formam uma camada que captura a radiação infravermelha emitida pela superfície urbana, tentando escapar para a camada exterior da cidade, e reemite-a de volta para o centro urbano, aumentando a intensidade do efeito da ilha de calor. Num estudo realizado nas cidades chinesas de regime semiárido, em 2016, demonstrou-se que a neblina de poluentes aumentou a intensidade do efeito em 0,7°C à noite (Li *et al.*, 2018). Em alguns casos, o aumento de poluentes pode promover o arrefecimento, principalmente substâncias/partículas que conferem alguma “opacidade” à atmosfera, refletindo a radiação solar recebida para atmosfera antes de atingir a superfície urbana.

2.3. Efeitos

Como resultado da presença ou combinação de fatores como a geometria dos centros urbanos, a incorporação de materiais com propriedades impermeáveis e absorventes, e um excesso de atividade antropogénica, o efeito das ilhas de calor são constantes em vários centros urbanos. O aumento da temperatura nestas áreas em relação às regiões circundantes causa consequências

negativas tanto ao nível da habitabilidade, do conforto, do equilíbrio do meio ambiente e da saúde humana, que desencadeiam consequências econômicas e sociais desfavoráveis.

2.3.1. Intensificação do calor

Em consequência das alterações climáticas, os períodos de calor extremo são mais frequentes e mais comuns em todo o planeta. Durante a ocorrência destes episódios de ondas de calor (HW – *Heat Wave*), os centros urbanos que sofrem do efeito das ilhas de calor são atingidos com maior intensidade (Bao *et al.*, 2021). Por exemplo, em Atenas, na Grécia, a intensidade do efeito da ilha de calor durante os períodos de HW pode ser 3.5°C mais alto do que em condições sem o efeito da ilha de calor. Em Chicago, EUA, no ano de 1995, o efeito da onda de calor de julho intensificada pelo efeito da ilha de calor provocou a perda de 525 vidas sob stress térmico extremo (Lo e Quattrochi, 2003). Por outro lado, a Organização de Saúde do Canadá afirmou que em sete cidades canadenses, quando a temperatura média ultrapassa os 20°C, a mortalidade relativa aumenta em 2.3% em cada grau de aumento da temperatura (Faheda *et al.*, 2020).

No entanto, por causa de fatores como a localização geográfica e o tipo de região, a combinação entre o efeito da ilha de calor e o fenómeno de HW não são sempre lineares. Em estudos realizados em Pequim (clima continental húmido) e Xangai (clima subtropical húmido), durante períodos de HW, os efeitos de ilha de calor, durante o dia, foram ampliados na ordem de 0.2°C e 0.9°C, respetivamente, enquanto que em Guangzhou (clima subtropical húmido) o efeito foi amenizado em 0.2°C (Shaojing *et al.*, 2019). Em certas regiões da Índia, o efeito da ilha de calor foi minimizado aproximadamente em 0.3°C sob condições de HW, em comparação com condições sem HW.

Embora, Alec Feinberg (2020) afirmou que a bibliografia sobre o tema seja escassa, alguns artigos com grande impacto na climatologia, como os dos investigadores McKittrick e Michael (2004 e 2007) sugerem que a relação do aumento da concentração do CO₂ com a temperatura média do planeta pode ser exagerada (McKittrick, 2010). Explicam que o efeito de calor urbano tem um efeito positivo no aumento da temperatura média global. Porém, os resultados obtidos foram considerados insuficientes, não convencendo, no geral, a comunidade política e científica, o que levou a que o efeito da ilha de calor nas cidades não fosse incluído como campo de intervenção no Acordo Climático de Paris (Alec Feinberg, 2020).

Apesar disso, na China, por exemplo, foram elaboradas pesquisas e descobriu-se que a intensificação do efeito da ilha de calor das cidades chinesas contribuiu para o aumento de 30% da temperatura média na China. Outros modelos de estudo revelaram que cerca de 3% a 36% do aquecimento global podem dever-se às temperaturas altas produzidas nas cidades (Alec Feinberg, 2020).

2.3.2. Recursos naturais

De modo geral, o efeito da ilha de calor, por si só, leva ao aparecimento de episódios de stress térmico nas cidades, causando desconforto e vulnerabilidade aos seus habitantes (Oleson *et al.*, 2015). Com o aumento do desconforto térmico, aumenta a necessidade de soluções de arrefecimento e conforto térmico, como por exemplo os equipamentos de ar condicionado, os ventiladores, entre outros. O aumento da utilização destes equipamentos causa o crescimento da procura de energia elétrica nas cidades (Mohajerani *et al.*, 2017). Além disso, também se observam fatores como a geometria das cidades, como o crescente índice de sombreamento, como estimuladores da procura de energia elétrica. Embora estas soluções promovam a conforto e o bem-estar no interior dos espaços habitáveis, a utilização destes aparelhos leva ao aumento da temperatura na cidade devido à libertação de calor como resultado do seu funcionamento. Este aumento da temperatura, por sua vez, multiplica a procura de energia.

Um estudo realizado na cidade de Toronto, no Canadá, concluiu que se fossem utilizadas estratégias de mitigação do efeito da ilha de calor, tais como a incorporação de matérias com menor capacidade absorvente de calor ou plantação de vegetação na cidade, o consumo anual de eletricidade podia ser reduzido, aproximadamente, em 150 GWh. Ou seja, traduzido em valor monetário, este valor equivaleria a mais de 11 milhões de dólares por ano (Yow, 2007). Um pouco mais a sul, um trabalho desenvolvido por um laboratório em Los Angeles, nos EUA, revelou que cada 1°C de aumento de temperatura do ar acarreta um aumento de 2.9% nas necessidades de energia.

Por outro lado, o aumento das temperaturas nas áreas urbanas também resulta numa maior procura por água, tanto para fins de consumo como para fins recreativos/conforto.

2.3.3. Saúde

Na vertente da saúde, estudos comprovam que efeito da ilha de calor nas cidades tem ligação tanto direta como indireta na saúde física e mental dos seus habitantes. À medida que a temperatura aumenta, o corpo consome energia adicional para promover a seu arrefecimento, o que leva ao aumento do cansaço ou fadiga. Além disso, temperaturas altas acentuam problemas existentes nos habitantes, como diabetes, doenças pulmonares, doenças infecciosas, doenças cardiovasculares e cerebrovasculares (Shahmohamadi *et al.*, 2011). As crianças e as pessoas mais idosas são sobretudo o grupo da sociedade mais vulnerável às altas temperaturas. No caso das pessoas de idade avançada, o débito cardíaco e o volume intravascular são reduzidos, dificultando a libertação de calor. Em casos mais extremos, o efeito da ilha de calor, muitas vezes combinado com eventos de HW, condicionam o equilíbrio da homeostase do corpo, causando problemas (para além no sistema cardiorrespiratório) no sistema renal, no equilíbrio dos eletrólitos, que pode causar hipoglicemia, e no sistema neurológico e cognitivo. Estudos pontuais evidenciam que temperaturas corporais acima de 38.8°C comprometem a memória (Nidhi *et al.*, 2020). Além disso, elevadas temperaturas podem causar insolação que acarreta perturbações no mecanismo de regulação da temperatura do corpo como febre, pele quente e seca, frequência cardíaca acelerada ou distorções ao nível psicológico. Pesquisas descobriram que o aumento do calor associado, muitas vezes, às HW tem um efeito sobre a mortalidade. Por exemplo, mais de 50% da mortalidade total em West Midlands, no Reino Unido, em 2003, foi relacionada com as altas temperaturas ambientais (Clare *et al.*, 2017).

Embora o número de infeções a nível mundial esteja, de certa forma, moderado, tanto ao nível local (ilha de calor nas cidades) como ao nível planetário (alterações climáticas), a probabilidade de crescimento e expansão de doenças infecciosas aumenta. No entanto, uma vez que cada patogénico apresenta uma curva de desempenho térmico própria, a reação perante o aumento da temperatura é diferente (Lafferty e Mordecai, 2016). Por exemplo, o aumento da temperatura leva a que protozoários como a dengue, vírus como o zika e o chikungunya e certos fungos proliferem e se desenvolvam em locais mais distantes. Além disso, o aumento da temperatura leva à diminuição imunológica do hospedeiro (por exemplo o ser humano), o que o deixa mais suscetível à contaminação/doença. Por outro lado, existem patogénicos, que por apresentarem uma adaptação a temperaturas mais baixas, estão sujeitos a diminuir com o aumento da temperatura (Lafferty e Mordecai, 2016). A alteração e a invasão de novos microrganismos acarretam uma diminuição e uma mudança da biodiversidade local ou regional, causando problemas nos ecossistemas e na cadeia alimentar natural.

Além disso, os centros urbanos são enormes fontes produtoras de vários poluentes. Um destes poluentes é o ozono troposférico que ao contrário do ozono estratosférico, que protege os seres vivos absorvendo a radiação ultravioleta nociva do sol, é tóxico para a saúde do ser humano. A exposição repetida à poluição por ozono pode causar danos permanentes aos pulmões e pode piorar a bronquite, doenças cardíacas, enfisema e asma. Nos últimos 20 anos, a doença de asma aumentou significativamente na Estados Unidos da América (Lo e Quattrochi, 2003). Da mesma forma, foi verificado que as concentrações de ozono troposférico estão relacionadas com o perfil térmico do Estado da Califórnia.

Com o aumento da temperatura, devido ao efeito da ilha de calor, a matéria vegetal ou material petroquímico são vulneráveis à libertação de razoáveis quantidades de compostos orgânicos voláteis (VOC – *volatile organic compounds*) biogénicos. Além disso, devido a enorme atividade antropogénica, por meio da indústria ou dos transportes, enormes quantidades de NO_x são emitidas para a atmosfera urbana. A combinação destes dois grupos de substâncias precursoras sob radiação solar (reação fotoquímica) produzem o ozono troposférico (Luvall., 2015).

Outros estudos relacionaram o aumento das temperaturas e as altas emissões de VOC com concentrações elevadas de material particulado (PM – *particulate matter*) de 2.5 micrómetros na atmosfera urbana. Este tipo de material fino é considerado perigosíssimo para a saúde, entrando nas vias respiratórias e, por vezes, na corrente sanguínea. A sua exposição prolongada pode acarretar o desenvolvimento de doenças cardíacas ou pulmonares (Zhong *et al.*, 2019). Estas partículas suspensas são responsáveis, juntamente com outros poluentes, pela formação do *smog*, uma camada densa de poluentes nocivos que, entre outras efeitos, reduz a visibilidade nos centros urbanos.

Muitas vezes estes poluentes ficam aprisionados nas cidades devido a circulação vertical do ar que evita a dispersão dos mesmos. As temperaturas altas das cidades levam a que o ar ascendente urbano se mova em direção às áreas circundantes, que em seguida volta em direção ao interior urbano (Taha, 2004). Deste modo, ocorre um acumular de poluentes e material particulado nas cidades que é prejudicial para a população.

2.3.4. Ecossistemas

A expansão urbana promove a modificação do meio ambiente e dos processos biológicos, bioquímicos e físicos envolventes importantes para o equilíbrio dos vários ecossistemas. As altas temperaturas resultantes do UHI afetam a dinâmica natural dos solos, como a decomposição das folhas e as taxas líquidas de mineralização de nitrogénio (Yow, 2007). Estas alterações levam a variações na disponibilidade e composição nutricional dos solos que, conseqüentemente, modificam a produtividade e composição da comunidade vegetal das cidades face às plantas das áreas rurais. Por exemplo, um estudo feito em Asheville, na Carolina do Norte, Estados Unidos da América, observou-se uma taxa de decomposição de folhas mais lenta do que em ambiente urbano, enquanto que as taxas líquidas de N-mineralização, aumentaram em solo urbano (Pavao-Zuckerman e Coleman, 2005).

Além disso, o efeito da ilha de calor afeta tanto a distribuição da fauna como também altera a fenologia das espécies, ou seja, evolução das características e do ciclo da vida das espécies em função das características ambientais/meteorológicas presentes nesse momento. Num estudo de 2014, observou-se uma maior predominância de espécies vegetais termófilas na área urbana de Hamburgo, Alemanha, em relação às áreas rurais circundantes (Čeplová *et al.*, 2017). Por outro lado, as temperaturas altas levam a floração precoce de algumas espécies de plantas e a modificação dos seus tempos de crescimento. Estas conseqüências são observadas tanto dentro como nos arredores das áreas urbanas, o que leva a possíveis problemas na produção e segurança alimentar (Zipper *et al.*, 2016).

O efeito urbano intensifica também o prolongamento, provocado pelas alterações climáticas, das estações quentes o que gera um aumento do tempo de sobrevivência e atividade de insetos e patogénicos que afetam culturas. Por exemplo, estudos realizados na Inglaterra indicaram que a temporada de voo das libélulas adiantou, aproximadamente, 1.5 dias face ao período habitual (Villalobos-Jiménez e Hassall, 2017). Estudos realizados em laboratório demonstraram que ovos de larvas criadas a 5°C acima da temperatura ambiente eclodiram aproximadamente 3 semanas antes dos ovos da mesma espécie à temperatura ambiente. Na fase adulta, as temperaturas quentes também aumentam o sucesso reprodutivo destes animais. Da mesma forma, o período sazonal de reprodução dos anfíbios e aves e a sua migração são alteradas (Villalobos-Jiménez e Hassall, 2017).

Na vertente do ecossistema aquático, o calor presente nos diversos materiais constituintes das cidades, como telhados, pavimentos de asfalto ou o próprio ar urbano, podem transferir e aquecer corpos de água que escoam para rios, lagos ou ribeiros nas proximidades. O acumular deste calor leva

a poluição térmica dos sistemas aquáticos, interferindo na dissolução de gases importantes na água, como o oxigênio essencial para a vida subaquática. Além disso, este efeito promove a descida do pH que prejudica o desenvolvimento de pequenos crustáceos, entre outros. Em resultado, a diversidade dos ecossistemas diminui, afetando outras espécies que dependem deste meio (Villalobos-Jiménez e Hassall, 2017).

2.3.5. Clima

Em último lugar, vários dados relacionam o UHI com alterações na meteorologia/clima da região. Durante anos, diversas observações registaram um aumento da nebulosidade e chuva, nomeadamente, a precipitação convectiva, resultante da alta rugosidade da superfície urbana (presença de edifícios baixos e altos), que diminui os ventos superficiais (figura 8). Esta precipitação resulta da presença do fenómeno da pluma térmica urbana, formado pelas diferentes densidades do ar. A camada de ar mais quente próxima à superfície da área urbana ascende às camadas superiores da atmosfera, carregando humidade. Ao atingir as camadas mais frias da atmosfera, o vapor condensa e precipita, completando o ciclo convectivo (Marelle *et al.*, 2020).

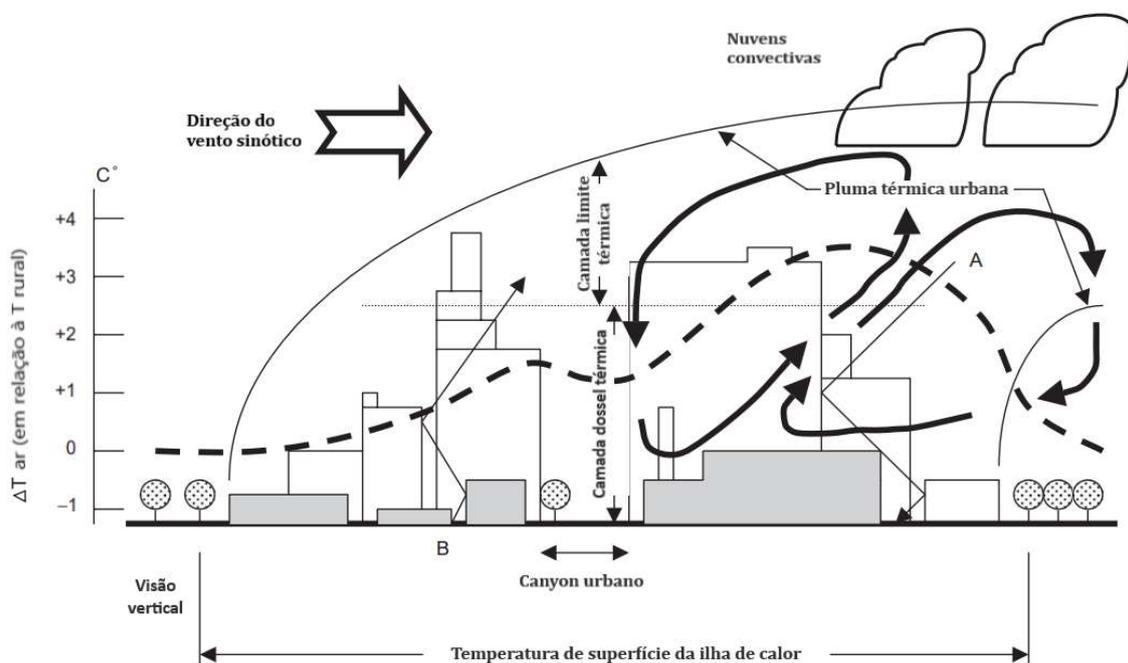


Figura 8 – Esquema descritivo vertical do efeito de ilha de calor numa área urbana (Adaptado de Taha, 2004)

Além disso, a presença de núcleos de condensação (por vezes provocados pelo acúmulo da poluição urbana) também promove o aumento ou a intensificação da precipitação nos centros urbanos (Marelle *et al.*, 2020).

Por outro lado, as altas temperaturas urbanas podem desempenhar um papel no aumento da incidência de raios e tempestades nas redondezas de cidades (Yow, 2007) e na diminuição de eventos de precipitação acompanhados com neve, principalmente em megacidades devido ao seu elevado efeito de ilha de calor.

Estudos baseados em observações da superfície e dados de satélites meteorológicos sugerem que os efeitos de ilha de calor podem causar um aumento até 8% de nebulosidade, 14% de chuva e 15% de trovoadas perto de áreas urbanas em comparação com áreas rurais (Yow, 2007).

Em 2017, em Xangai, China, foi publicado um estudo realizado ao longo de 5 anos, que revelou que o efeito da ilha de calor alterava os padrões de circulação do ar, aumentando, desta forma, a precipitação (Steensen *et al.*, 2022). Em 2020, o trabalho desenvolvido por Marelle e os seus colegas com análise e previsão de 10 a 20 anos em 5 cidade de grande escala (Paris, França; Nova Iorque, EUA; Tóquio, Japão e Xangai, China), conclui que o efeito de ilha de calor aumenta a frequência de precipitação extrema sobre áreas urbanas (Marelle *et al.*, 2020).

Embora a expansão urbana possa intensificar a precipitação extrema, a intensidade da chuva pode ser reduzida dependendo da estação do ano e da localização geográfica da cidade. Em Pequim, na China, observou-se a diminuição da intensidade da precipitação, devido às baixas taxas de evaporação (Steensen *et al.*, 2022).

No entanto, retirar conclusões de estudos observacionais de longo prazo constitui ainda um desafio para separar os efeitos urbanos dos outros fatores de mudança extrema de precipitação nas cidades, como mudanças climáticas e aumento da presença de aerossóis (Marelle *et al.*, 2020).

2.4. Medidas de Mitigação

As consequências do UHI são reais e muito severas, desde ao desconforto e stress térmico até repercussões na saúde humana e no meio ambiente. Desta forma, vários estudos, projetos e estratégias têm vindo a ser realizadas e implementadas visando a redução do efeito da ilha de calor, evitando o agravamento das suas consequências.

2.4.1. Medidas de simples implementação

Uma das medidas que estão a ser implementadas consiste na alteração das propriedades ou configuração das superfícies, como os telhados frescos (figura 9). Corresponde a telhados, muitas vezes revestidos com cores claras como o branco, que apresentam uma maior emissividade térmica e alta refletância solar, diminuindo a carga térmica do edifício e, conseqüentemente, da cidade (Kolokotroni *et al.*, 2018). Estudos recentes demonstram que os telhados frescos podem apresentar, aproximadamente, uma temperatura de 2.3°C menor do que os telhados convencionais. Por exemplo, em Madrid, um estudo revelou que as modificações no albedo do telhado levam a uma redução no consumo total de energia em 4,8% (Kim *et al.*, 2018).

Em combinação, pesquisas em nanomateriais têm criado materiais alternativos para os telhados, como um material composto por microesferas de dióxido de silício (SiO₂) distribuídos num material transparente, RadiCold, oferecendo 96% de reflexão da irradiação solar (Fang *et al.*, 2019).

Vários países da Europa e dos Estados Unidos da América criaram fundos de apoio a pesquisas nesta área. Na Coreia do Sul, foi criado um programa, em 2015, para incentivar os habitantes a pintarem os telhados de forma gratuita. Na Índia, foi oferecido benefícios financeiros para os habitantes com telhados frescos (Khare *et al.*, 2021).

Além desta abordagem, a implementação de telhados verdes tem vindo a crescer. Estes telhados são cobertos com uma camada vegetativa, desde o cultivo simples da relva à inclusão de pequenos arbustos e árvores (figura 9). A aplicação da vegetação ajuda na redução da transferência de calor para o edifício através do maior sombreamento e do processo de evapotranspiração. Por exemplo, Dwivedi e Mohan (2018) no estudo realizado na Índia, demonstraram que os telhados verdes podem reduzir em 3 a 4°C em relação aos telhados convencionais.

Esta medida está legislada como implementação obrigatória em países como o Japão e o Canadá. Em Toronto, no Canadá, a implementação dos telhados verdes é exigida em edifícios com área maior a 2000 m² (Shafique *et al.*, 2018). Enquanto que, no Japão, esta estratégia de mitigação é obrigatória em todo o edificado novo.



Figura 9 – Representação de um telhado fresco (imagem da esquerda, Pratap *et al.*, 2017) e de um telhado verde (imagem da direita, Shafique *et al.*, 2018)

Para além dos telhados, estas medidas são pensadas para ser implementadas igualmente nas fachadas, nas ruas, nos pavimentos, nos estacionamento e noutras superfícies. Muitos estudos revelaram que as áreas vegetativas cultivadas nos centros urbanos trazem benefícios, principalmente no verão. Por exemplo, uma pesquisa realizada em Estocolmo, na Suécia, revelou uma diferença de temperatura na faixa dos 0.5 a 2°C entre o parque verde e a área urbana construída. Por outro lado, as árvores das ruas de Montreal, no Canadá, mostraram uma redução da temperatura do ar na ordem dos 0.2 a 0.3°C (Marando *et al.*, 2022).

Embora a utilização de cores claras demonstra uma grande vantagem contra o aquecimento urbano, existe a tendência, ao longo do tempo, de ocorrer a diminuição do desempenho destes materiais. Esta redução da refletividade pode dever-se ao acúmulo de detritos, matéria orgânica, inorgânica ou à degradação destes materiais que causa a redução do albedo dos mesmos. No entanto, novas pesquisas têm proposto a aplicação de nanopartículas fotocatalíticas com propriedades de degradar compostos orgânicos sob a incidência de radiação solar, aumento, deste modo, a vida útil dos materiais (Santamouris e Yun, 2020).

Uma outra abordagem contrária à aplicação de cores claras consiste na utilização de materiais de mudança de fases (PCM's) nas estradas (Santamouris e Yun, 2020). Estudos recentes demonstram que os PCM's, para além de aprimorar as propriedades mecânicas dos materiais, podem

moderar ou reduzir a temperatura superficial dependendo da quantidade aplicada no material composto. Estudos revelam uma redução de 2.5°C da temperatura de superfície em materiais com PCM's.

De forma semelhante à vegetação, os corpos de água promovem a redução da temperatura através da evapotranspiração. A temperatura do ar ao redor destas fontes pode diminuir entre 2 a 6°C (Khare *et al.*, 2021). No entanto, o aumento da evaporação leva ao aumento da humidade do ar, o que, em situações com grande taxa de humidade do ar, pode inibir a perda de calor evaporativo pelo suor no corpo humano, essencial na regulação térmica do organismo.

2.4.2. Medidas de complexa implementação

As medidas mencionadas são mais facilmente implementadas, sobretudo, quando a alteração do edificado é difícil. Embora o processo de alteração da geometria e do design urbano seja lento, a sua mudança tem um impacto significativo no combate ao UHI. Por exemplo, a orientação dos *canyons* influencia a quantidade de radiação solar absorvida e constata-se um certo padrão que os *canyons* orientados de norte para sul recebem menor irradiação solar durante o verão em comparação com a orientação de este para oeste (Farhadi *et al.*, 2019). No entanto, dependendo da geografia, do clima e da localização do centro urbano, a orientação ideal pode ser diferente. Na Grécia, as ruas com orientação de este para oeste são menos expostas à radiação solar no verão. No Iraque, região de clima seco, a melhor orientação dos edifícios é entre sudeste e sul, recebendo menor quantidade de radiação no verão e maior quantidade de radiação no inverno. Este método pode mitigar o efeito da ilha de calor até 2.1°C.

Por outro lado, principalmente em edifícios em construção ou em projeto, a utilização de diferentes materiais, incorporados nas paredes, demonstraram resultados tanto na promoção constante de uma temperatura confortável dentro da habitação durante o verão como na mitigação da ilha de calor urbana (Kandya e Mohan, 2018). Num estudo realizado no sul asiático, concluíram que materiais sustentáveis como o bambu e *Rammed earth* revelaram, em comparação com os materiais convencionais de construção como o tijolo, uma redução da necessidade de consumo energético para o arrefecimento dos edifícios na ordem dos 6.5 a 7.9%.

De forma geral, o tipo de medida de mitigação implementada depende das condições geográficas, climáticas e da dimensão do centro urbano. Ou seja, determinadas medidas podem

reduzir a temperatura numa cidade, e não alterar ou aumentar a temperatura noutra cidade de outra região com as mesmas medidas implementadas. Por exemplo, nos Estados Unidos da América, um estudo mostrou que os telhados verdes têm um efeito pouco significativo na mitigação do UHI, enquanto o aumento da taxa de cobertura de relva e arvoredo nos pavimentos foi mais eficaz. Enquanto que em Espanha, as medidas de aumento do albedo mostraram-se mais promissoras (Kim *et al.*, 2018).

2.5. Alguns estudos publicados sobre o tema

Como referido anteriormente, embora a compreensão complexa do efeito da ilha de calor esteja incompleta e em evolução, o estudo deste fenómeno tem vindo a acumular, desde há alguns anos, várias pesquisas e artigos sobre o fenómeno um pouco por todo o planeta. O método mais utilizado tem sido a medição da temperatura da superfície terrestre através dos dados recolhidos por imagens de satélites que permitem a análise e determinação, de forma indireta, do efeito de ilha de calor.

2.5.1. Determinação do UHI

Conforme as várias pesquisas, o continente asiático tem sido o mais estudado e investigado face a problemática do efeito de ilha de calor.

Na região sudeste da China, por exemplo, foi realizado um estudo por Decheng Zhou *et al.* (2018) com o objetivo de calcular a intensidade do efeito anual da ilha de calor nas áreas urbanas envolventes pelas megacidades de Xangai, Nanjing e Hangzhou. Nesta pesquisa foi calculada a temperatura de superfície pela análise através dos dados recolhidos pelo satélite MODIS e utilizaram como temperatura base de referência para o estudo a temperatura registada na zona florestal da região, tendo em conta os parâmetros de longitude, latitude, altitude e distância em relação aos corpos de água. Os resultados finais revelaram que a média anual do UHI foi de 2.7 vezes maior durante o dia ($2.6 \pm 0.9^{\circ}\text{C}$) do que a noite ($0.7 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$). Relativamente às estações do ano, o UHI foi maior no verão ($4.7 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$) do que no inverno ($0.5 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$) com uma diferença média entre verão e inverno de $4.2 \pm 0.9^{\circ}\text{C}$. A mesma situação foi analisada durante a noite, mas com uma diferença de $2.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (Zhou *et al.*, 2018).

No mesmo ano, um outro estudo foi realizado em duas cidades de Itália, Florença (localizada no interior norte) e Nápoles (localizada no litoral sul). Neste trabalho foram utilizadas as imagens da banda 10 do satélite Landsat 8, banda infravermelha térmica no espectro eletromagnético, do dia 10 de julho de 2016 para Florença e do dia 21 de julho de 2016 para Nápoles com o objetivo de determinar o LST (Guha *et al.*, 2018). A média das temperaturas obtidas foram de 32.84°C e 33.11°C para Florença e Nápoles, respetivamente. Além disto, foi determinado a localização como também a intensidade média do efeito de ilha de calor nestas cidades, utilizando a média e a metade do desvio padrão do LST para o cálculo do mesmo. Em Florença, o UHI concentrou-se na região central do território urbano com 3.15°C de média. Em Nápoles, o UHI localizou-se na região mais a este da cidade com 3.31°C de média do UHI. Alguns pontos com mais incidência consistem em regiões com baixa presença de vegetação e grande cobertura por construções humanas como fábricas industriais, edifícios com revestimento metálico e áreas de estacionamento presentes nestas cidades.

Já em 2016, o pesquisador Ngie e colegas procederam à determinação da temperatura de superfície em África do Sul, na cidade de Durban, utilizando como fonte de análise os dados oferecidos pela banda 6 (banda térmica) do satélite Landsat 7 ETM+. Os autores concluíram que os pontos com maior temperatura se concentram no centro de comércio e industrial da cidade, bem como na zona residencial mais acidentada ou semiplana mais densa da região. Em adição, notaram um aumento da temperatura de superfície da cidade de Durban entre 2002 e 2012 de 3°C, em média.

No mesmo continente a norte, Málbéteau *et al.* (2017) estudaram o perfil de temperatura de superfície da região do vale Imlil, Marrocos. A região é composta pela cadeia montanhosa Atlas e a bacia Rheraya com uma variação de elevação do terreno em relação ao mar de 1700 e 3150 metros. A equipa utilizou os dados fornecidos pela banda infravermelha térmica do satélite ASTER para calcular o mapa de temperatura da região. Além disso, utilizaram os dados disponibilizados por instrumentos e estações meteorológicos localizadas na região para determinar a temperatura e a humidade do ar com o objetivo de calcular, através das equações propostas por estes investigadores, diferentes parâmetros como o calor latente, a radiação, a pressão do vapor de água, entre outros. Desta forma, através dos valores obtidos para estes parâmetros, minimizaram-se possíveis variações da temperatura da superfície influenciadas pela enorme irregularidade do terreno. Os autores concluíram que a variação das temperaturas na região, depois da normalização por meio da elevação do terreno, é reduzida face ao perfil das temperaturas antes da normalização, sendo as pequenas variações resultado da vegetação e da composição do solo (Malbéteau *et al.*, 2017).

2.5.2. Consumo energético

O efeito de ilha de calor tem um grande impacto ao nível energético e, conseqüentemente, ao nível económico. Desta forma, pesquisadores têm vindo aprofundar mais a análise deste fenómeno, procurando relacionar o UHI com o consumo energético e soluções de mitigação.

Numa cidade em crescimento populacional como em desenvolvimento económico, Lipardo *et al.* (2020), determinaram um maior efeito de ilha de calor durante a estação chuvosa face aos meses mais secos na cidade de Duran, Equador. Concluíram que a cidade, com uma magnitude de temperatura, em média, em relação ao meio rural de 2 a 4°C, originava um aumento até 70% do consumo energético para os edifícios residenciais e para os edifícios comerciais acarretava um consumo ainda maior. Desta forma, através da utilização do software Arcgis e da ferramenta de simulação UWG (Urban Weather Generator), estimaram a quantidade de energia amortizada com a implementação das medidas de mitigação propostas. O aumento do albedo e o aumento da área verde causou uma redução entre 20 a 30% do consumo energético. A combinação destas medidas mais a redução do tráfico promoveu uma diminuição na ordem dos 30 a 45% do consumo energético (Litardo *et al.*, 2020).

Dois anos antes, um estudo foi realizado na região do mediterrâneo, na cidade de Roma, Itália, por Guattari *et al.* (2018). Destacou-se a grande presença do efeito de ilha de calor na cidade de Roma com valores de magnitude de 3 a 5°C. Além disso, a complexa rede geométrica da cidade dificulta o fluxo do vento, apresentando baixas velocidades que prejudicam o arrefecimento da área urbana. Em comparação com a região de Fiumicino (Itália), a demanda energética das residências de Roma tem tendência a superar o aumento de 60% durante a estação mais quente.

3. Metodologia

Neste trabalho serão avaliados o efeito de ilha de calor e o seu impacto no consumo energético na região escolhida, a cidade de Braga. Nesta secção esta descrito o cálculo das seis etapas, desde a determinação da temperatura da superfície até à quantificação da energia amortizada:

3.1. Temperatura da Superfície Terrestre

A medição e a quantificação do efeito da ilha de calor podem ser por meio de medições da temperatura do ar realizadas por estações meteorológicas espalhadas pelo território. Esta medição é determinada ao nível da copa urbana, ou seja, entre o nível do solo urbano até o nível do telhado dos edifícios urbanos. No entanto, devido à falta e/ou à baixa existência de uma medição espacialmente contínua dentro da área de estudo (cidade de Braga), foi utilizado um método indireto com o objetivo de estudar o efeito da ilha de calor. Este método é baseado na análise da temperatura da superfície terrestre (LST) por meio da deteção remota.

O desenvolvimento da deteção remota por infravermelho térmico baseia-se em observações espacialmente contínuas da temperatura da superfície terrestre em diferentes resoluções espaciais. O LST é obtido através de observações espacialmente detalhadas da temperatura da superfície radiométrica capturada por radiómetros de imagens espaciais.

Através da determinação do LST, avaliou-se, desta forma, a intensidade da temperatura da superfície da cidade de Braga.

Além disso, foi utilizado como ferramenta de cálculo e de análise o software ArcGIS, um programa de serviços de sistemas de informação geográfica.

As imagens Landsat 8 são constituídas por dois sensores: Operational Land Imager (OLI), que envolve as bandas 1 a 9, e Thermal Infrared Sensor (TIRS), que alberga as bandas 10 e 11 (Tabela 1). A banda 1 é útil para estudos direccionadas para as costas e aerossóis. A banda 9 é útil para deteção de nuvens cirrus. O tamanho aproximado da cena é de 170 km norte-sul por 183 km este – oeste.

Tabela 3 - Descrição das bandas detetadas pelo satélite Landsat 8

	Bandas	Comprimento de onda (μm)	Resolução Espacial (m)
OLI (Operational Land Imager)	Banda 1 – Aerossol Costeiro	0.43 – 0.45 μm	30 m
	Banda 2 – Azul	0.450 – 0.51 μm	30 m
	Banda 3 – Verde	0.53 – 0.59 μm	30 m
	Banda 4 – Vermelho	0.64 – 0.67 μm	30 m
	Banda 5 – Infravermelho próximo (NIR)	0.85 – 0.88 μm	30 m
	Banda 6 – Infravermelho de Banda Curta 1 (SWIR1)	1.57 – 1.65 μm	30 m
	Banda 7 - Infravermelho de Banda Curta 2 (SWIR2)	2.11 – 2.29 μm	30 m
	Banda 8 - Pancromática	0.50 – 0.68 μm	15 m
	Banda 9 – Cirrus	1.36 – 1.38 μm	30 m
TIRS (Thermal Infrared Sensor)	Banda 10 – Infravermelho Térmico 1 (TIRS1)	10.6 – 11.19 μm	100 m
	Banda 11 – Infravermelho Térmico 2 (TIRS2)	11.5 – 12.51 μm	100 m

Neste software foram analisadas várias imagens capturadas pelo satélite Landsat 8 OLI/TIRS (deteção remoto) e obtidas no site *United States Geological Survey (USGS EarthExplore)*. As imagens dos satélites Sentinel não foram usados devido à indisponibilidade de imagens na data requerida. As imagens do Landsat 8 estão separadas e associadas a específicas bandas do espectro eletromagnético (visível e infravermelho).

Na primeira etapa deste estudo, foram utilizadas as bandas 4 (banda vermelha - Red), 5 (banda infravermelha próxima - NIR) e 10 (banda infravermelha térmica – TIRS1) com localização de Braga, captadas no dia 10 de junho de 2021, 28 de julho de 2021 e 13 de agosto de 2021 às 11h13min no horário UTC (*Coordinated Universal Time*) com uma percentagem de cobertura terrestre de nuvens de 2.23%, 1.42% e 0.29% respetivamente. Por meio do software ArcGis procedeu-se a um conjunto de cálculos para determinar o LST a partir dos dados fornecidos pelas 3 bandas referidas para cada um dos 3 meses (Halder et al., 2021).

O primeiro passo consiste na conversão dos dados da banda 10 em valores da radiação de topoda atmosfera (TOA – *Top-of-Atmosphere*):

$$L\lambda = ML \times Qcal + Al - Oi \quad (1)$$

onde $L\lambda$ corresponde ao valor da radiação espectral TOA ($W/(m^2 \times sr \times \mu m)$), ML corresponde ao fator multiplicativo específico da banda 10, $Qcal$ corresponde ao produto do valor do pixel padrão calibrado da banda 10, Al corresponde ao fator alterado de adição específico da banda 10, e Oi corresponde ao valor de correção para a banda 10.

Em seguida, é calculada a temperatura de brilho (BT) através da TOA em graus Celsius:

$$BT = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{TOA} + 1\right)} - 273.15 \quad (2)$$

onde $K1$ e $K2$ correspondem às constantes de conversão térmica da banda 10 que são obtidas no arquivo de metadados associados ao satélite Landsat 8.

Em terceiro lugar, procede-se ao cálculo do índice de vegetação de diferença normalizada (NVDI), que será utilizado para o cálculo seguinte. O NDVI é normalmente utilizado para detetar e analisar a cobertura vegetal:

$$NVDI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (3)$$

onde o NIR corresponde à banda 5 infravermelho próximo e Red corresponde à banda 4 vermelha do satélite Landsat 8.

Além deste cálculo, é determinado a proporção de vegetação (PV) e a emissividade da superfície terrestre (E):

$$PV = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{máx} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (4)$$

$$E = 0.004 \times PV + 0.986 \quad (5)$$

Por último lugar, é concluído com o cálculo da LST:

$$LST = \frac{BT}{1 + \left(\lambda \times \frac{BT}{\rho} \right) \times \ln(E)} \quad (6)$$

onde λ corresponde ao comprimento de onda da radiação (10.8 m) e ρ traduz-se na seguinte equação:

$$\rho = \frac{h \times c}{s} \quad (7)$$

onde h corresponde à constante de Plank (6.626×10^{-34} Js), s corresponde à constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} JK) e c corresponde à velocidade da luz (2.998×10^8 m/s). O valor de ρ é 14388 mK.

3.2. Média do LST

Após ter finalizado o cálculo do LST para os 3 dias, segue-se o cálculo da respetiva média, de forma a minimizar possíveis anomalias pontuais durante o período dos 3 meses de verão.

$$LST_{média} = \frac{LST_1 + LST_2 + LST_3}{3} \quad (8)$$

onde LST_1 corresponde ao LST calculado para o dia de junho, LST_2 corresponde ao LST calculado para o dia de julho e LST_3 corresponde ao LST calculado para o dia de agosto.

3.3. Efeito de ilha de calor

Na segunda etapa, é analisada a imagem resultante do cálculo da LST e são determinadas as zonas com maior incidência do efeito da ilha de calor. Como foi referido na introdução, a magnitude ou presença do efeito da ilha de calor resulta da comparação da temperatura mais elevada presente na área urbana com a temperatura mais baixa da zona rural. Contudo, neste caso, como em muitos estudos documentados, a delimitação e a distinção da área urbana da área rural traduz-se num problema de complexa resolução. Por isso, utilizou-se um método baseado na média e no desvio padrão dos valores da temperatura de superfície da área da cidade, tal como apresentado por Zhang e Wang (2008). A equação é a seguinte:

$$UHI = LST_{alt} - (LST_{alt}(média) + LST_{alt}(desvio\ padrão)) \quad (9)$$

Se numa área os valores de $UHI \geq 0$, conclui-se que esse local apresenta um efeito de ilha de calor. Caso contrário, $UHI \leq 0$, a área não apresenta um perfil de elevada temperatura.

3.4. Parâmetros influenciadores

Além da determinação das áreas com efeito de ilha de calor, analisa-se a relação de alguns parâmetros, que foram mencionados na introdução, com o perfil de temperatura da cidade de Braga.

Em primeiro lugar, utilizando as mesmas bandas do satélite Landsat 8 obtidas no mesmo dia, calcula-se o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) na área em estudo, conforme definido por Halder *et al.* (2021).

$$SAVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} \times (1 + L) \quad (10)$$

onde NIR corresponde à banda 5 infravermelha próxima, Red corresponde à banda 4 vermelha e L corresponde ao fator de correção empírico da luminosidade do solo, que varia de acordo com a quantidade de cobertura vegetal verde, sendo que em áreas de cobertura vegetal verde moderada $L = 0.5$ (como neste estudo), $L = 1$ é usado para áreas com cobertura vegetal densa e $L = 0$ é usado para áreas com cobertura vegetal praticamente ausente, como os desertos.

Em segundo lugar, procede-se ao cálculo do índice de humidade (NDMI), que avalia e correlaciona o grau de humidade da superfície, conforme formulado por Shahfahad *et al.* (2021).

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (11)$$

onde o NIR corresponde à banda 5 infravermelha próxima e SWIR corresponde à banda 6 infravermelha de ondas curtas do satélite Landsat 8.

Em terceiro lugar, procede-se ao cálculo do índice de área construída, onde é ressaltada as construções realizadas pelo ser humano, tal como apresentado por Abir *et al.* (2021).

$$IBI = \frac{\frac{2 \times SWIR1}{SWIR1 + NIR} - \left(\frac{NIR}{NIR + RED} + \frac{Green}{Green + SWIR1} \right)}{\frac{2 \times SWIR1}{SWIR1 + NIR} + \left(\frac{NIR}{NIR + RED} + \frac{Green}{Green + SWIR1} \right)} \quad (12)$$

onde Green corresponde à banda 3 verde, Red corresponde à banda 4 vermelha, SWIR corresponde à banda 6 infravermelha de ondas curtas e NIR corresponde à banda 5 infravermelha próxima do satélite Landsat 8.

Por último, determina-se a refletância planetária ($\rho\lambda$) e o albedo do topo da atmosfera (α_{TOA}) para calcular o albedo da superfície (α), seguindo o trabalho de Beg *et al.* (2016).

$$\rho\lambda = \frac{\pi \times L\lambda}{ESUN\lambda \times \cos\theta \times dr} \quad (13)$$

onde $L\lambda$ corresponde à radiação espectral TOA, $ESUN\lambda$ corresponde à irradiância solar espectral exoatmosférica em uma superfície perpendicular ao raio do sol ($W.m^2.\mu m^{-1}$, tabela 3), $\cos\theta$ corresponde ao zênite solar e dr corresponde à distância da Terra ao Sol em unidades astronômicas.

Tabela 4 - Irradiância solar espectral exoatmosférica (ESUN λ) das bandas do satélite Landsat 8 (Beg et al., 2016)

Banda	2	3	4	5	6	7
ESUN λ	2067	1893	1603	972.6	245.0	79.72

$$\alpha_{TOA} = 0.356 \times \rho\lambda_2 + 0.326 \times \rho\lambda_3 + 0.138 \times \rho\lambda_4 + 0.084 \times \rho\lambda_5 + 0.056 \times \rho\lambda_6 + 0.041 \times \rho\lambda_7 \quad (14)$$

onde $\rho\lambda_2...7$ corresponde ao valor da refletância planetária para cada banda.

$$\alpha = \frac{\alpha_{TOA} - \alpha_x}{\tau^2} \quad (15)$$

onde α_x corresponde ao fluxo de radiação de ondas curtas de entrada refletido para o sensor (0.3) e τ é definido pela seguinte equação:

$$\tau = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times z \quad (16)$$

onde z corresponde aos valores de elevação do terreno, que é adquirido no site da *Nasa Earthdata* associados ao satélite ASTER GDEM.

3.5. Análise da aplicação das medidas de mitigação

Na penúltima etapa, estima-se a possível temperatura final da área afetada pelo UHI com as medidas de mitigação implementadas. Desta forma, por meio dos dados obtidos da região em estudo pelo satélite Landsat 8, criou-se um modelo/regressão linear que relaciona vários parâmetros com a temperatura de superfície.

$$T_f = 8.7024x_1 + 11.0548x_2 - 0.4362x_3 - 2.2222x_4 - 0.0001x_5 + 33.35 \quad (17)$$

onde T_f corresponde à temperatura de superfície final, x_1 corresponde ao parâmetro albedo, x_2 corresponde ao parâmetro IBI, x_3 corresponde ao parâmetro NDMI, x_4 corresponde ao parâmetro SAVI e x_5 corresponde ao parâmetro distância entre cada pixel e litoral de Portugal.

Após a utilização deste modelo para determinar a nova temperatura de superfície para área de estudo escolhida, calcula-se a temperatura global da região específica através da ponderação do peso de influência que cada área apresenta.

$$LST_t = 0.52s_1 + 0.32s_2 + 0.16s_3 \quad (18)$$

onde LST_t corresponde à temperatura de superfície global, s_1 corresponde à secção 1, s_2 corresponde à secção 2 e s_3 corresponde à secção 3 da região.

Por fim, estima-se a temperatura média diária (entre as 8h e 22h) do ar dos 3 meses (junho, julho e agosto) antes da simulação da aplicação das medidas de mitigação como também se determina a provável temperatura média diária do ar após a simulação através do seguinte modelo, formulado a partir de uma regressão entre os dados recolhidos pelo satélite Landsat 8 e dos dados selecionados das estações meteorológicas distribuídas na cidade de Braga (figura 10):

$$T_a = 0.8009x_1 + 0.2603x_2 - 0.0165x_3 + 0.2737x_4 + 16.9409x_5 + 0.0009x_6 - 26.2209 \quad (19)$$

onde x_1 corresponde à temperatura da superfície em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), x_2 corresponde à velocidade do vento em metros por segundo (m/s), x_3 corresponde à altura do terreno em relação ao nível médio do mar em metros (m) e x_4 corresponde ao índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI), x_5 corresponde ao índice da humidade (NDMI) e x_6 corresponde à distância entre as estações meteorológicas e a costa litoral do país.



Figura 10 – Mapa da localização das estações meteorológicas

3.6. Avaliação do consumo energético

Na última etapa, estima-se a possível quantidade de energia dos sistemas de arrefecimento do estabelecimento da área com UHI escolhida e o respetivo valor monetário amortizado em consequência do efeito gerado pela implementação simulada das medidas de mitigação propostas.

Em primeiro lugar, calcula-se o coeficiente de desempenho (CoP – *coefficient of performance*) antes e depois da aplicação das medidas de mitigação.

$$CoP = \left(\frac{T_q}{T_f} - 1 \right)^{-1} \quad (20)$$

onde T_q corresponde à temperatura quente em graus Celcius ($^{\circ}C$), ou seja, a temperatura do exterior e T_f corresponde à temperatura fria em graus Celcius ($^{\circ}C$), ou seja, à temperatura do interior do edifício.

O seguinte passo consiste em determinar as potências elétricas (P), em watts (W), necessárias para manter constante a temperatura do interior do edificado (ou seja, a potência elétrica antes e depois das medidas de mitigação).

$$P_t = \frac{Q_{ed}}{CoP} \quad (21)$$

onde Q_{ed} corresponde à energia em forma de calor por hora que é necessária ser extraída do edificado de forma a preservar a temperatura interna, em watts (W).

O Q_{ed} é calculado por meio da conversão da medição da capacidade de refrigeração dos sistemas de refrigeração por hora (BTU/h - *British Thermal Unit*) que o edificado requerer.

$$Q_{ed} = BTU/h \times 0.293 \quad (22)$$

Finalizado o cálculo do valor da potência elétrica antes e depois da simulação com as medidas de mitigação, é determinada a quantidade de energia (E_t), em joule (J), que o estabelecimento consome durante os três meses de verão (junho, julho e agosto).

$$E_t = P_t \times t \times D_t \quad (23)$$

onde P_t corresponde à potência elétrica em watts (W), t corresponde à duração do funcionamento do sistema de refrigeração em horas (h) e D_t corresponde ao total dos dias nos 3 meses.

Em último lugar, calcula-se a diferença da quantidade de energia amortizada devido às medidas de mitigação (E_p), em joule (J), o rendimento energético respetivo (η) e o valor monetário poupado consoante o custo de energia elétrica praticado no mercado (V), em euros (€).

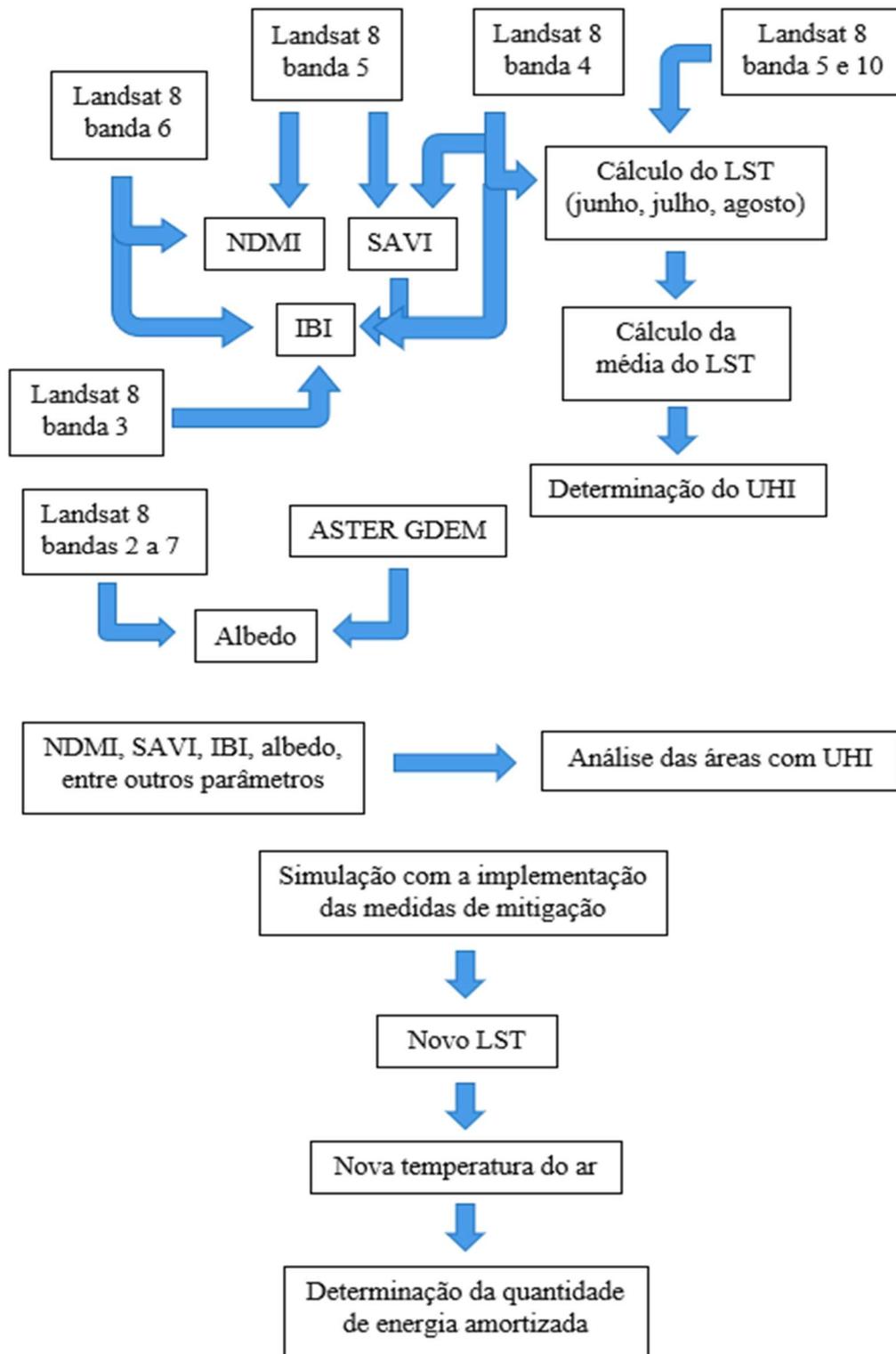
$$E_p = E_a - E_d \quad (24)$$

$$\eta = \frac{E_p}{E_a} \times 100 \quad (25)$$

$$V = E_p \times c \quad (26)$$

onde E_a corresponde à quantidade de energia consumida pelo edificado antes da simulação com as medidas de mitigação em joule (J), E_d corresponde à quantidade de energia consumida pelo edificado após a simulação com as medidas de mitigação em joule (J) e c corresponde ao custo, da energia elétrica em euros (€/KWh).

3.7. Diagrama resumo da metodologia



4. Caraterização do local de estudo

A cidade de Braga localiza-se no norte litoral de Portugal (figura 11) no Vale do rio Cávado (N 41°32'39" N, 8°25'19" W). O seu território abriga, aproximadamente, 193 349 habitantes, sendo classificada como um dos maiores centros urbanos de país. Além disso, a sua história e origem remonta ao período do império romano, tendo sido fundada em 16 a.C. com o nome de Bracara Augusta em homenagem ao imperador romano César Augusto. Por outro lado, Braga albergou, no século VI, um dos arcebispos mais importante da Península Ibérica e continua a ser a morada de vários arcebispos ao longo dos anos. Por isso, nos dias de hoje a cidade é conhecida pelo título de cidade dos arcebispos.

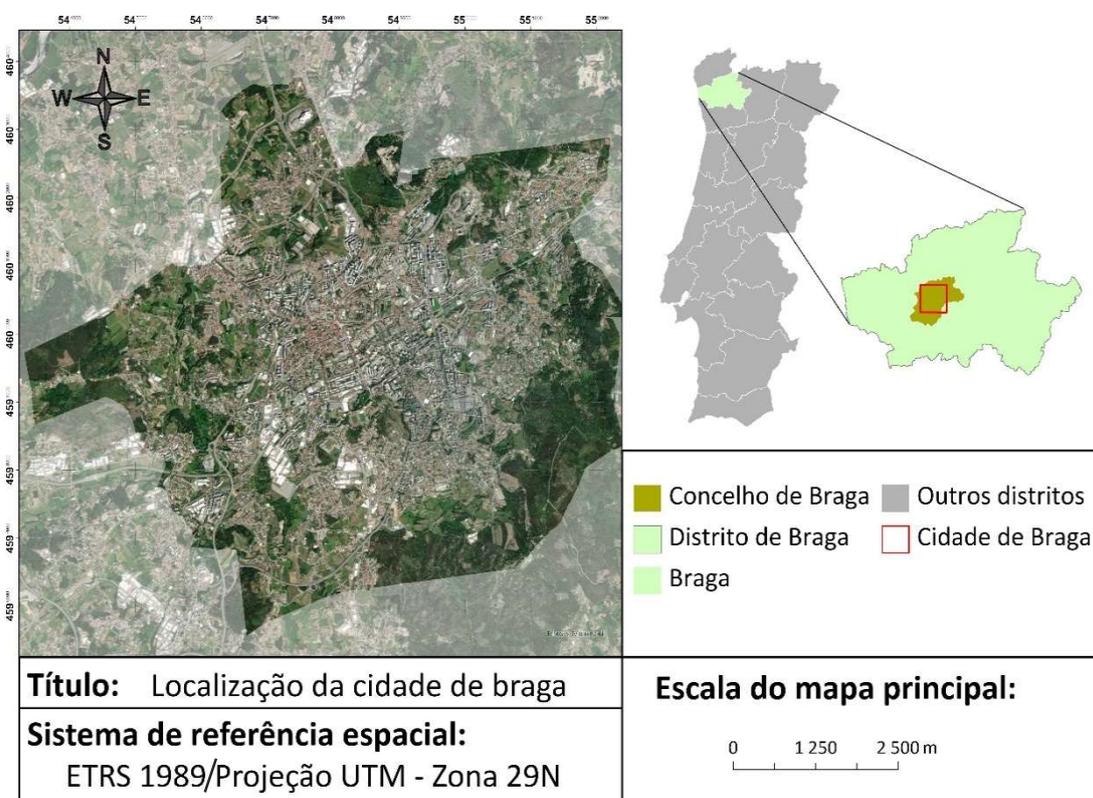


Figura 11 – Localização da cidade de Braga.

Em relação ao território, a cidade caracteriza-se por uma topografia variada que oscila entre colinas, vales, montanhas e até planícies preenchidas por extensos campos agrícolas. O clima da região engloba tanto baixas temperaturas no Inverso, que em podem atinge os 0°C, e altas temperaturas no verão, que podem ultrapassar os 38°C, com uma precipitação variada, mas sempre presente durante todo o ano.

5. Resultados e Análise

Concluída a aplicação da metodologia descrita na secção 3 na cidade de Braga, são obtidos os seguintes resultados.

5.1. Determinação do LST

A média do LST da cidade de Braga, Distrito de Braga, Portugal (equação 8 da secção 3.2) foi obtida através dos LST determinados para o dia 10 de junho de 2021, 28 de julho de 2021 e 13 de agosto de 2021 (equações 1 a 7 da secção 3.1). Na Figura 12 está representado a média do LST, onde se constata diversas manchas de cores falsas correspondente a diferentes temperaturas de superfície. Além disto, observa-se que a temperatura na cidade de Braga varia entre 22.54°C e 41.70°C durante o período de análise.

Na área central do mapa do LST (figura 12), representado pelo centro da cidade de Braga, observa-se uma concentração de altas temperaturas, retratado com uma extensa mancha amarelada e acastanhada. Nos arredores da cidade, observa-se um conjunto de temperaturas mais baixas em relação ao centro da cidade, principalmente a sul, na região de Arcos, e a oeste na freguesia de Real, representado por manchas cuja cor varia entre do azul ao verde claro.

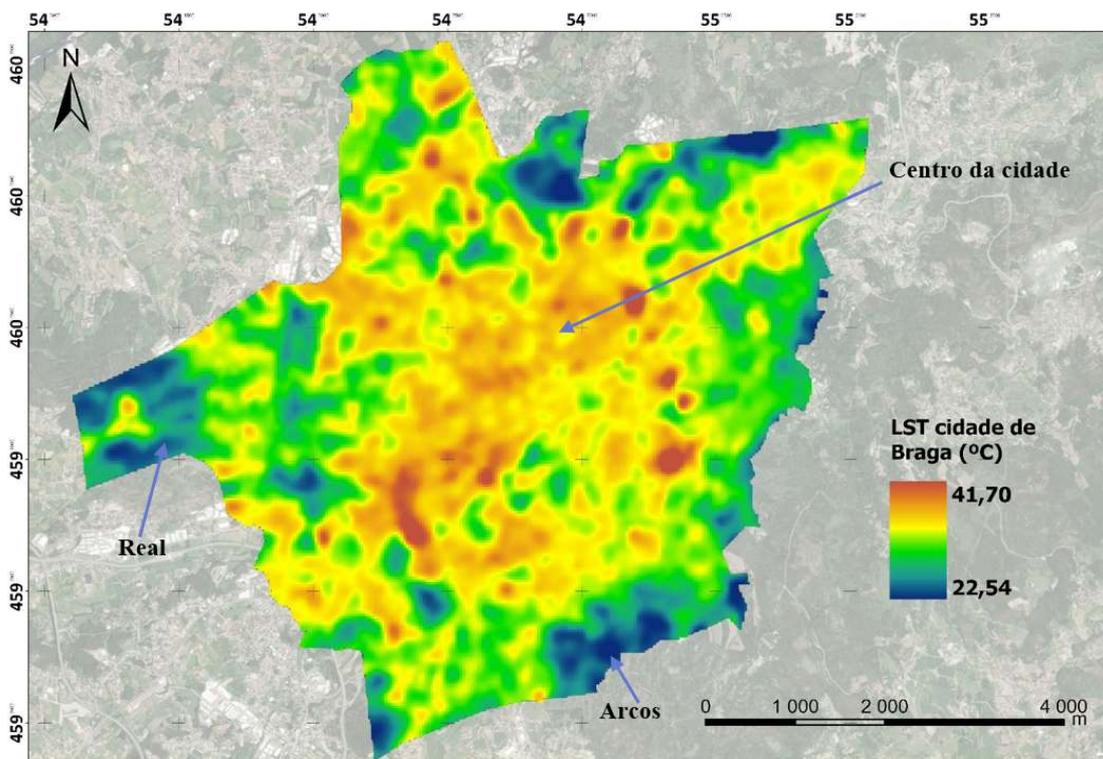


Figura 12 – Mapa da temperatura de superfície terrestre (LST) da cidade de Braga

5.2. Localização do efeito de ilha de calor

A localização das áreas da cidade de Braga que sofrem com o efeito da ilha de calor foram obtidas pela equação 9 da secção 3.3. Na figura 13 observa-se que áreas que apresentam variação de temperaturas abaixo dos 0°C demonstram um perfil sem efeito de ilha de calor. Essas regiões estão coloridas com a cor azul, abrangendo a maior área da cidade de Braga. Por outro lado, todas as regiões do centro urbano evidenciam variações de temperaturas positiva, sinal que existe uma concentração de calor devido ao UHI. Consoante a intensidade que o efeito provoca nestas regiões, no gráfico é perceptível através da variação das cores entre o amarelo, laranja, vermelho até ao castanho, as áreas com maior intensificação das consequências e efeitos negativos provenientes do UHI.

Na figura 13, ainda é possível identificar 4 áreas como o centro comercial Minho Center, o centro comercial Braga Parque, o centro atacadista Makro e o parque industrial com localização entre a freguesia de Maximinos, Ferreiros e Lomar com grande impacto de efeito de ilha de calor. Para além destas áreas, observa-se algumas zonas como o estabelecimento do Departamento de Música da Universidade do Minho (localizado no centro da cidade) e a unidade militar do Regimento de Cavalaria N.º 6 com efeito de ilha de calor moderado (tabela 4).

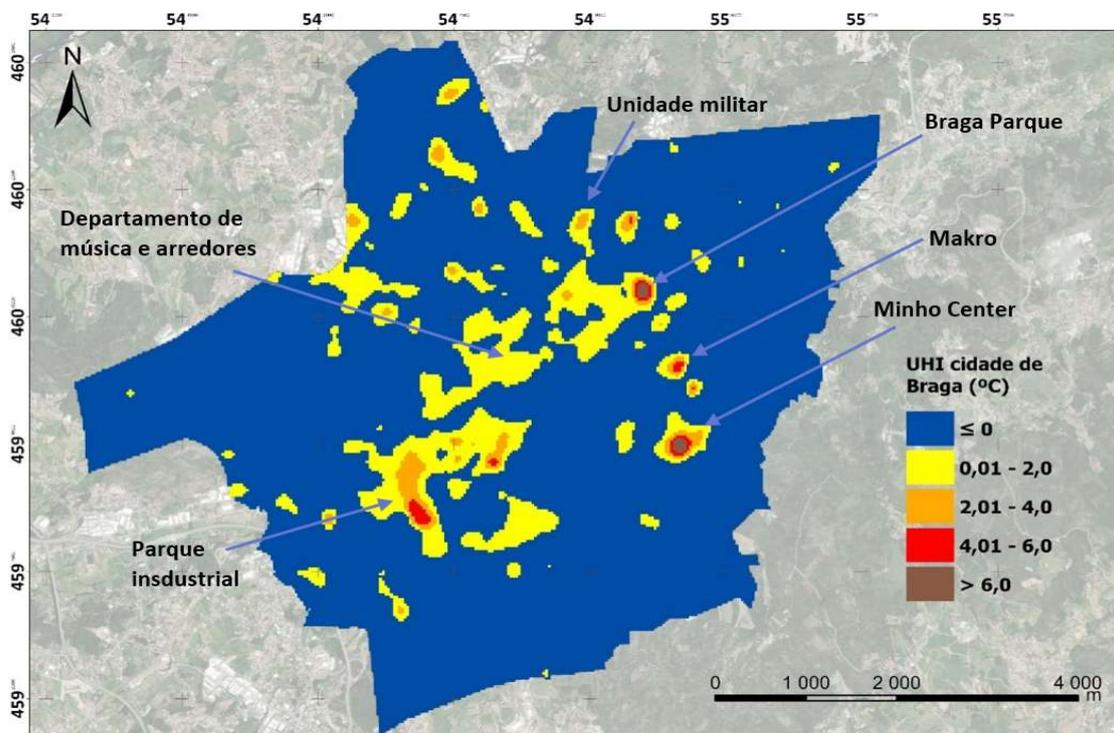


Figura 13 – Mapa das áreas com efeito de ilha de calor na cidade de Braga

Tabela 5 – Intervalo de valores de LST e UHI para as respetivas localizações

Zonas da cidade de Braga	Minho Center	Braga Parque	Parque industrial	Makro	Departamento de Música	Unidade militar
LST (°C)	32.98-41.43	32.78-41.70	33.83-37.86	32.83-37.87	32.73-33.94	30.01-35.36
UHI (°C)	0.61 - 9.02	0.39 - 9.31	1.41 - 5.42	0.47 - 5.40	0.34 - 1.56	-2.49 - 2.98

5.3. Descrição da cidade utilizando vários parâmetros

Como referido no capítulo da metodologia secção 3.4, para além da utilização dos valores da radiação das diferentes bandas para calcular o albedo da cidade de Braga, foi obtido a elevação do terreno da cidade (figura 14).

Como se pode observar, a parte a sudoeste da cidade é composta por terreno elevado (coloração acastanhada) na ordem dos 200 a 354 metros, sendo representada pelas montanhas que cercam a cidade pelo sul. No sentido contrário, a elevação do terreno vai diminuindo em direção ao nordeste da cidade (coloração verde).

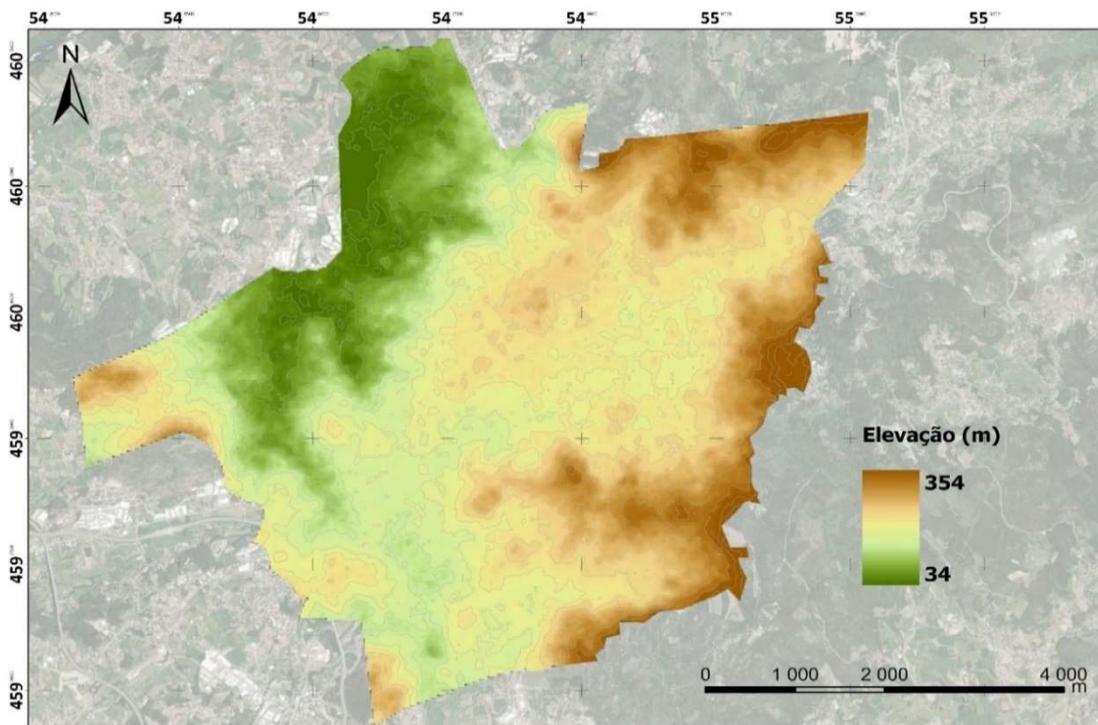


Figura 14 – Mapa topográfico da cidade de Braga (ETRS 1989/ projeção UTM – Zona 29N)

Desta forma, foi possível calcular a fração da radiação recebida pelo sol que cada componente da cidade de Braga reflete para a atmosfera (secção 3.4 equação 15). Na figura 15, é perceptível uma maior dominância da mistura da coloração azul e amarelo, indicando que a maior parte da cidade apresenta um albedo entre 10% e 30%. Em menor quantidade, observa-se pequenas manchas de amarelo vivo, revelando estruturas com alta refletância, com albedo entre 55% a 80%.

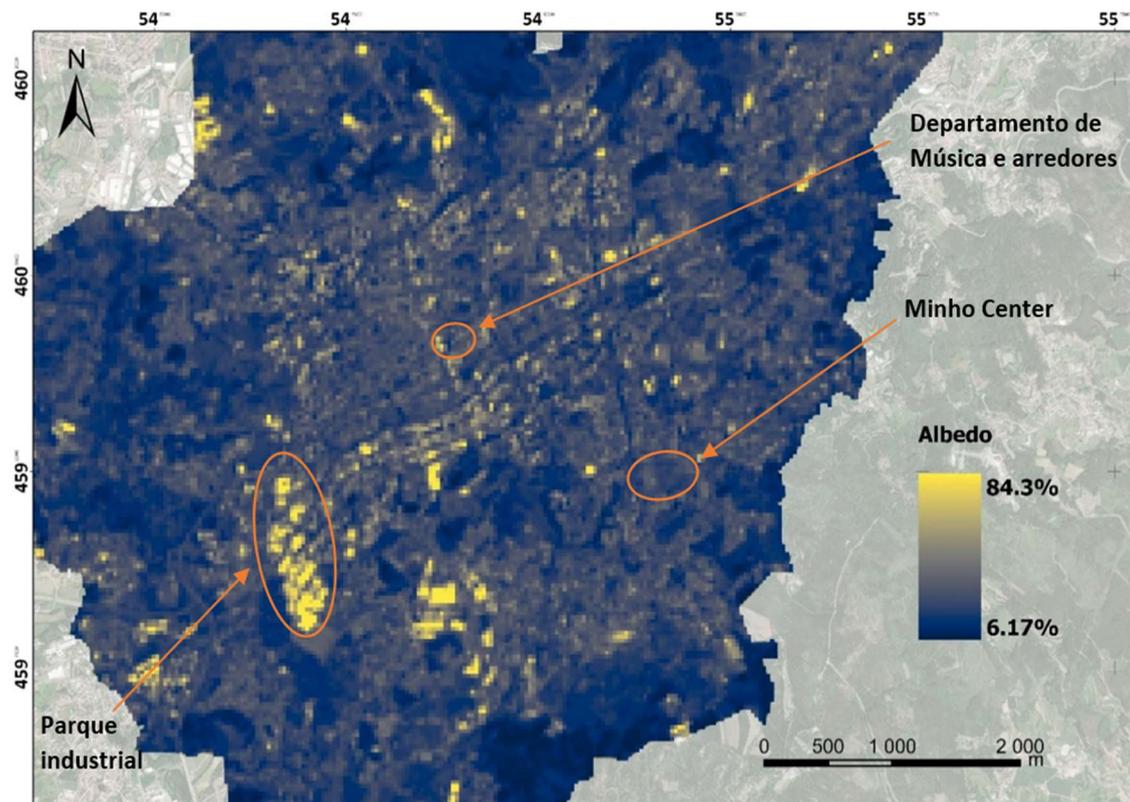


Figura 15 – Mapa do albedo da cidade de Braga

Por outro lado, a cidade apresenta uma baixa reflexão da radiação infravermelha no centro da cidade, característica da pouca ou inexistência de vegetação ou áreas verdes (secção 3.4 equação 10). Na figura 16, esta baixa componente verde é perceptível pela coloração verde claro com algumas manchas castanhas (-0.005 – 0.6). No sentido oposto, a figura demonstra uma maior saturação e tonalidade do verde nos arredores da cidade, sinal da presença de vegetação, campos e florestas.

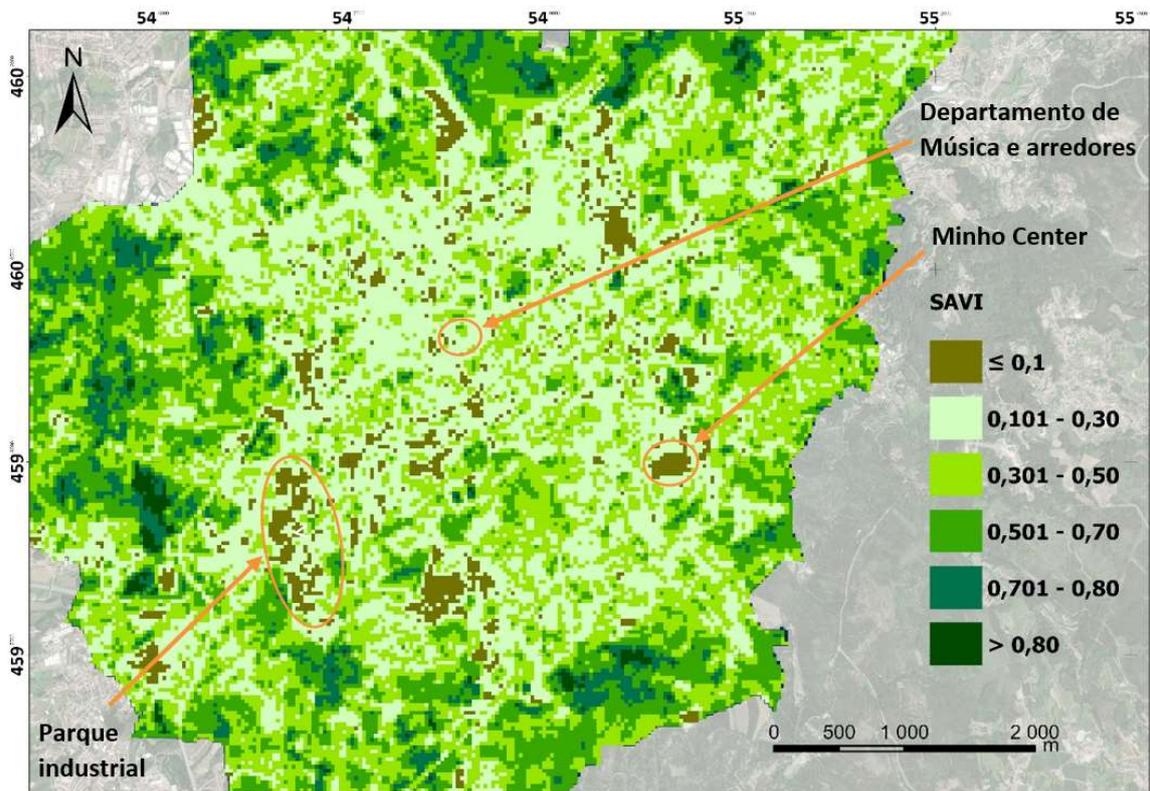


Figura 16 – Mapa do índice de vegetação ajustado ao solo da cidade de Braga (SAVI)

Embora a presença de vegetação consiste num componente importante para a redução da UHI, dependendo do tipo e do estado de saúde da vegetação, o grau de mitigação pode ser diferente. Desta forma, a figura 17 revela a distribuição do grau de humidade que a cidade de Braga apresenta (secção 3.4 equação 11).

O centro está preenchido pela cor castanha e amarela demonstrando a baixa presença de humidade (-0.40 – 0.35), enquanto que as regiões de azul escuro demonstram áreas com alto índice de humidade, representadas por áreas com grande densidade de árvores. Por outro lado, manchas de azul mais claro correspondem a zonas com humidade moderada ou áreas preenchidas por vegetação de pequena dimensão, como arbustos, campos e relva.

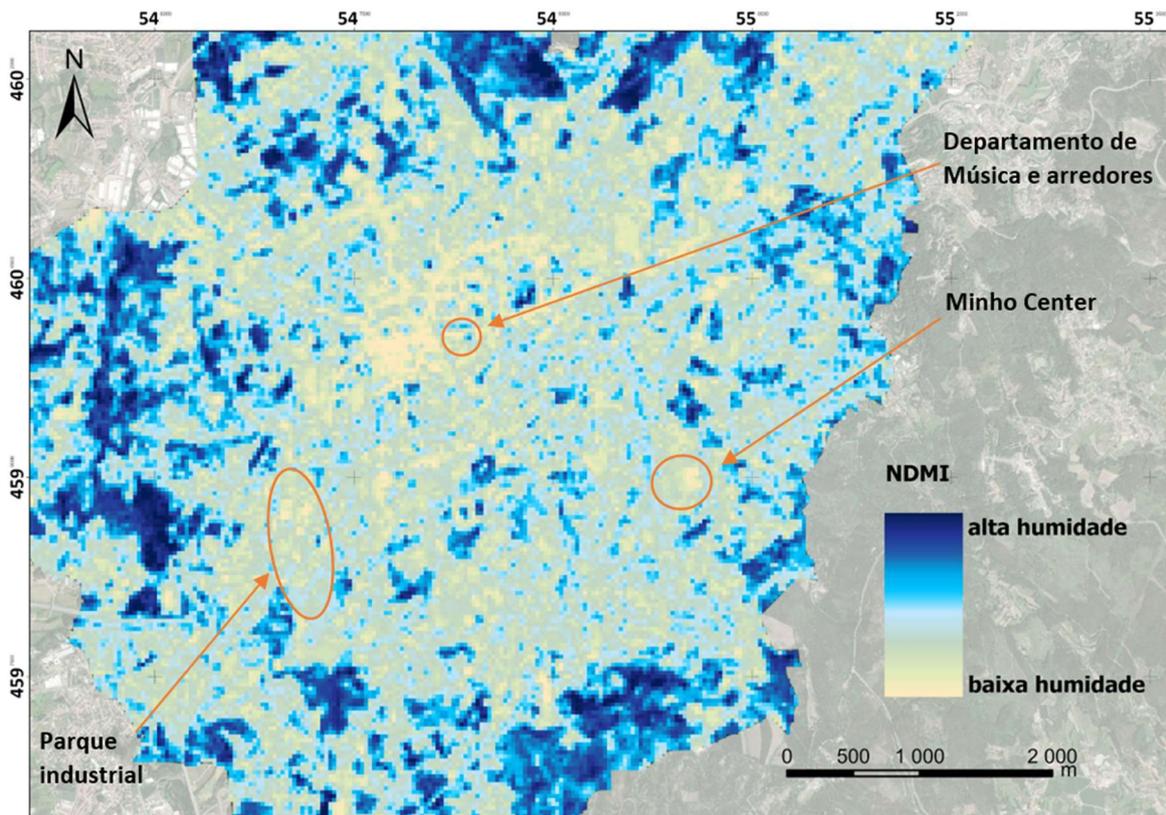


Figura 17 – Mapa do índice de humidade da cidade de Braga (NDMI)

Em complemento à informação oferecida pela figura 16, a figura 18 demonstra a concentração e o grau de cobertura do solo pelas construções desenvolvidas pelo Homem (secção 3.4 equação 12). Da mesma forma como o centro da cidade apresentava uma baixa presença de vegetação, esta figura revela um alto número de materiais impermeáveis no núcleo urbano, caracterizado pelas manchas azuladas e brancas. Esta coloração escurece com o distanciamento da região em relação ao centro da cidade (avermelhado e verde).

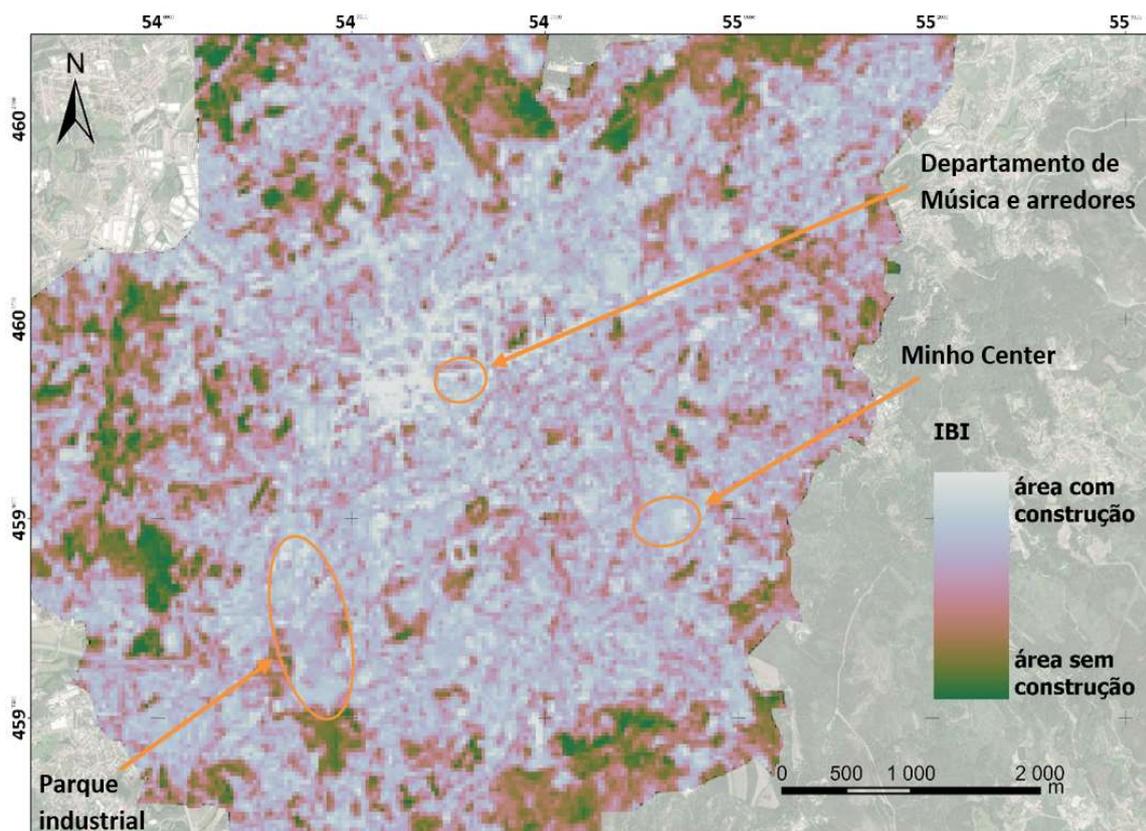


Figura 18 – Mapa do índice de área construída da cidade de Braga (IBI)

5.4. Análise de zonas com elevado efeito UHI

Dentro das 6 áreas mencionadas na figura 13 com grande efeito de UHI, foram escolhidas 3 zonas para averiguar possíveis causas que são responsáveis pela elevada temperatura de superfície determinada nestas áreas.

5.4.1. Minho Center

O centro comercial, Minho Center (figura 19), é uma das áreas da cidade de Braga com maior incidência do efeito de ilha de calor, tendo apresentado temperaturas de superfície próximas dos 41°C com variações máximas de temperatura atingindo os 9°C em determinadas zonas específicas.

Estas altas temperaturas são devidas a fatores referidos na secção 2.2 associados a morfologia, geografia e propriedades dos materiais constituintes/envolventes.

Uma das possíveis justificações para a incidência deste fenómeno nesta área consiste na baixa capacidade de reflexão dos materiais que revestem esta região (figura 15). De outra forma, os

materiais que compõem esta área absorvem muita radiação e refletem pequenas quantidades da mesma, demonstrando um baixo albedo (15.13% - 24.18%).

Na figura 16 é possível observar que a densidade de vegetação em espaços de 900 m² é mínima nas proximidades da área em questão e inexistente na envoltória do estabelecimento, apresentando valores entre 0.03 – 0.35. Além disso, a baixa humidade está presente na totalidade desta região, como se pode observar pela mancha acastanhada com tonalidade amarela na figura 17. Por consequência, a taxa de calor latente nesta área é baixa enquanto que o calor específico tende a ser maior, o que dificulta o arrefecimento, promovendo o aumento de calor armazenado.

Este efeito também é favorecido pelo alto índice de construção, ou por outras palavras, pela extensa cobertura do solo por materiais antrópicos impermeáveis. Na figura 18 constata-se que a área onde se localiza o Minho Center está colorida com tons de azul claro e branco, revelando uma alta cobertura por estes materiais com pouca presença de vegetação ou solo permeável comparativamente a regiões a nordeste da cidade que apresentam um menor grau de cobertura impermeável.

Por outro lado, a grande utilização de equipamentos de arrefecimento com o objetivo de manter uma temperatura interior agradável durante o verão do ano de 2021 funcionou como uma fonte de libertação de calor, amplificando o efeito da ilha de calor no local (causa antropogénica).



Figura 19 – Imagem do centro comercial Minho Center

5.4.2. Parque industrial

Na parte a sul da cidade de Braga encontra-se um extenso foco do UHI, com temperaturas médias de superfície na ordem dos 35°C. Este efeito deve-se a um conjunto de várias empresas próximas uma das outras com características que favorecem o aumento da temperatura (figura 20).

Embora estes edifícios revestidos por materiais brancos apresentem um albedo alto, como se pode observar na figura 15, a enorme quantidade de energia retida nesta zona pode dever-se à constituição e propriedades do material. Se a cobertura for feita de material metálico, que apresentam um alto grau de condutividade térmica e um baixo calor específico, a quantidade de energia solar acumulada e transferida será alta, aumentando a temperatura dos edifícios, apesar da cor branca.

Uma outra possível explicação para existência deste fenómeno consiste na taxa de vegetação existente e no grau de impermeabilidade do solo nessa região. Na figura 16, é possível visualizar que a vegetação está pouco distribuída de forma homogénea pela área, estando mais concentrada a sul da região. O índice da vegetação desta região varia entre 0.005 para a área central e 0.65 para a área a sudeste do parque industrial. Além disso, na figura 17 observa-se que a superfície a sul apresenta uma

maior humidade (presença da coloração azul) do que a área industrial mais a norte (coloração maioritariamente acastanhada). De forma complementar com este fator, o solo é maioritariamente ocupado por material impermeável, sendo perceptível pela grande mancha azulada (figura 18).

Do mesmo modo, tal como no caso do centro comercial, nesta zona é espetável que ocorra um funcionamento constante de maquinaria de produção e, por apresentar um alto registo de temperaturas, que haja um intenso funcionamento de dispositivos de arrefecimento. Estes fatores contribuem para a intensificação do efeito de ilha de calor.

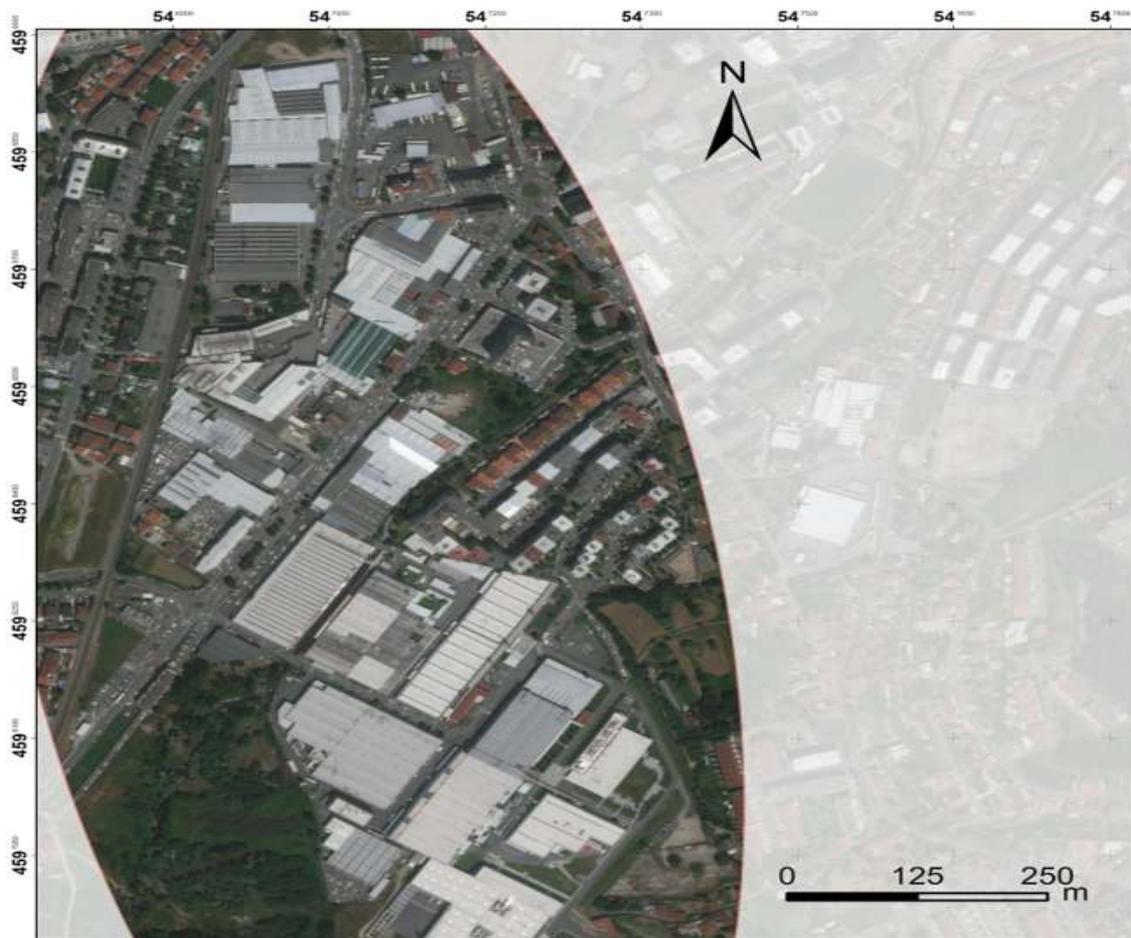


Figura 20 – Imagem do parque industrial

5.4.3. Rua do Raio e departamento de Música

Além das regiões referidas, o centro da cidade também é uma área muito afetada pelo UHI. Nomeadamente, a Rua do Raio e o complexo do Departamento de Música da Universidade do Minho (figura 21) demonstram baixa refletância com valores na ordem dos 10% e 20% na escala do albedo (figura 15).

Além disto, a existência de vegetação é parca. O índice de vegetação desta região não ultrapassa os 0.37, o que comparado com outras áreas é insuficiente (figura 16). Por outro lado, a taxa de humidade desta área também é baixa (coloração acastanhada), o que dificulta o arrefecimento por processos de evapotranspiração (figura 17). Em contraste, a cobertura do solo por materiais feitos pelo homem está abaixo dos 50% em relação à cobertura por superfícies permeáveis, sendo representada por algumas zonas de azul arroxado (figura 18).

Em adição, o efeito da ilha de calor pode dever-se ao constante tráfego intenso de transportes durante o dia, ocorrendo, desde modo, libertação e acumulação de calor por parte da atividade humana.

Além disso, na figura 16 observar-se que a largura da rua é estreita cercada por altos edifícios. Esta geometria pode aprisionar e aumentar o número de reflexões da radiação, aumentando a temperatura da região.

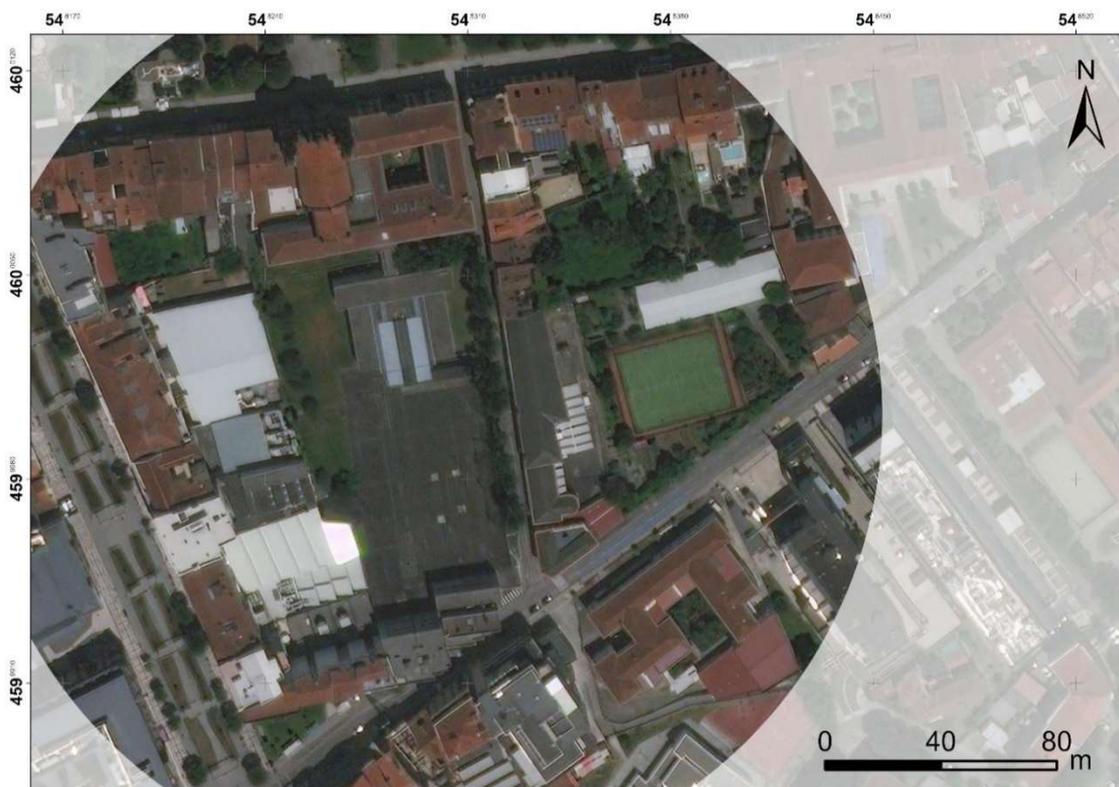


Figura 21 – Imagem da rua do Raio e do Departamento de Música

5.5. Medidas de mitigação propostas

Finalizada a determinação das regiões com grande incidência do efeito da ilha de calor e analisado as possíveis causas, foi escolhido o centro comercial Minho Center como local de estudo para estimar, através da implementação de medidas de mitigação, a possível quantidade de energia amortizada. Desta forma, após analisar a estrutura do edificado, dividi a sua superfície em três secções (figura 22). Na secção 1 foi selecionado como medida para reduzir a temperatura a aplicação de um material/tinta branca com um albedo de 86% em toda a superfície do telhado. Na secção 2, foi optado a implementação de toldes de cobertura de cor cinzenta (8 toldes por 900m²) de forma a minimizar o acúmulo de radiação desta região. Na última divisão, secção 3, foi averiguado a redução da temperatura com a implementação de um piso intercalado entre relva e pequenos estruturas de concreto em forma de colmeia (65% de relva por 900m²).



Figura 22 – Esboço do centro comercial Minho Center com as alterações com vista a mitigar o efeito de ilha de calor nesta região

5.6. Análise da implementação das medidas de mitigação

A temperatura de superfície final do centro comercial, após a aplicação das respetivas medidas de mitigação referidas anteriormente, foi obtida através das equações mencionadas no capítulo metodologia secção 3.5 equação 17.

Em primeiro lugar, foi calculado as temperaturas finais de cada secção do edificado (figura 19). Na secção 1, foram recolhidos os valores dos diferentes parâmetros do telhado pintado a branco (albedo 86%) do Shopping Gaia, localizado na cidade de Vila Nova de Gaia, no Porto (figura 23), com o objetivo de utilizá-los na equação 17 e determinar o efeito da respetiva coloração branca no edifício do Minho Center. O valor médio obtido da temperatura de superfície foi de 36.17°C , ou seja, uma redução de 3.88°C em relação à temperatura analisada antes da simulação com as medidas de mitigação (40.05°C). Na secção 2, foram recolhidos os valores dos diferentes parâmetros por deteção remota do parque com toldes do centro comercial Intermarché, em Viana do Castelo (figura 23) a fim de determinar o efeito destes toldes na simulação do Minho Center. O valor médio obtido da temperatura, após inserir os valores na equação 17, foi de 31.66°C (diminuição de 4.46°C face a temperatura inicial registrada - 36.12°C). Na secção 3, foram recolhidos os valores dos diferentes parâmetros da área com relva intercalada com blocos de concreto do Campo do Castelo, em Viana do Castelo (figura 23), e introduzidos na mesma equação. O resultado obtido foi de 29.82°C , um decréscimo de 3.75°C em relação à temperatura de 33.58°C .

Após a determinação das temperaturas finais de cada secção, determinei a temperatura média global através da ponderação do peso que cada secção representava para o efeito UHI da área (secção 3.5 equação 18). O resultado obtido foi de 33.71°C , validando a capacidade de redução da temperatura pelas medidas apresentadas (decréscimo na ordem dos 3.18°C).



Figura 23 – Shopping Gaia (imagem 1), Centro comercial Intermarché (imagem 2), Viana do Castelo (imagem 3)

Na última fase, foi estimada a provável temperatura média diária do ar dos 3 meses (junho, julho e agosto) sentida na área do centro comercial Minho Center durante o verão no ano 2021, antes da implementação simulada das respetivas medidas de mitigação (secção 3.5 equação 19), utilizando os respetivos parâmetros associados a este caso. O resultado foi de 29.92°C. Com a finalidade de comparação, estimei, também, a temperatura média diária do ar após a aplicação das medidas de mitigação (secção 3.5 equação 19), utilizando os respetivos parâmetros associados ao caso das medidas de mitigação. A nova estrutura da região causou uma diminuição de 0.45°C atingindo os 29.48°C face ao cenário inicial.

5.7. Avaliação do consumo energético

Nesta última fase, foi estimada a provável quantidade de energia amortizada pelos sistemas de refrigeração do centro comercial Minho Center devido às medidas de mitigação. Em primeiro lugar, foi calculado o CoP dos sistemas de refrigeração para a temperatura do ar exterior inicial (29.93°C) e para a temperatura do ar exterior nova (29.48°C) através da aplicação da equação 20 secção 3.6. O valor obtido foi 2.97 para a cenário com as medidas de mitigação e 2.77 para situação sem as medidas.

Em consequência da indisponibilidade da empresa para fornecer os dados relacionados ao consumo e sistema de refrigeração provavelmente por motivos de sigilo comercial, determinou-se a potência elétrica do sistema de arrefecimento por meio da previsão e aproximações. Desta forma, recorreu-se a uma estimativa de quantos BTU/h seriam necessários para promover o conforto térmico no edifício com uma temperatura constante de 22°C. Presumiu-se que o Minho Center acolheu, nos 3 meses em 2021, um total de 800 pessoas ao mesmo tempo e que dispunha de 386 aparelho em funcionamento numa área de 29633.08 m². Em seguida, converteu-se os 21555156 BTU/h em 6315.66KW de energia para extrair do edifício, através da aplicação da equação 22 secção 3.6. Utilizando a equação 21 e 23 da mesma secção, a energia consumida, durante os 3 meses com duração de 14h por dia antes da simulação, foi de 2932143.089 KWh e 2736173.879 KWh após a implementação das medidas de mitigação.

Em resumo, aplicando a equação 24, 25 e 26, as medidas de mitigação propostas promoveram um aumento de rendimento energético de 6.68%, ou seja, uma diminuição de 195969,210 KWh.

Considerando que no ano de 2021, o custo energético aproximava-se dos €0.1925 por cada kWh consumido, o valor monetário poupado com estas medidas poderia atingir os €37724.1.

6. Conclusão

O fenómeno de ilha de calor urbana é originado por um grande conjunto de fatores desde o crescimento bruto da população urbana, a inapropriada geometria e logística da cidade, utilização incorreta de materiais de construção em relação à região climática que se localiza o centro urbano até à atividade antrópica. Em consequência, consoante a gravidade do UHI, maiores são os problemas de saúde para o ser humano, alterações nos ecossistemas e um maior peso para a economia.

Nesta dissertação estudou-se o perfil da temperatura de superfície da cidade de Braga, determinando as áreas que demonstram efeito de ilha de calor. Verificou-se, nomeadamente, que o centro comercial Minho Center, o parque industrial, a rua do Raio e o centro comercial Braga Shopping são focos deste fenómeno com grande influência no perfil de temperatura da cidade, com valores de magnitude que variam entre 0.3 e 9°C. Desta forma, propôs-se o aumento da área verde, a pintura do telhado de cor branca e a instalação de um conjunto de toldes no centro comercial Minho Center. Conclui-se que estas medidas reduzem a temperatura de superfície como a temperatura do ar (3.18°C e 0.45°C respetivamente). A diminuição da temperatura do ar teve como consequência a redução do consumo energético deste estabelecimento na ordem dos 6.68%, com uma poupança estimada, para os três meses em análise, da ordem dos €37000.

7. Considerações finais

A problemática do efeito de ilha de calor é cada vez mais uma realizada global preocupante. A bibliografia que envolve este tema é abrangente em relação a sua existência, aos seus efeitos e causas. No entanto, não existe ainda num modelo padrão para medir o impacto real ou magnitude que este fenómeno apresenta. Além disso, em relação à área energética, a quantidade de estudos que quantificam o impacto que a ilha de calor tem no consumo energético ainda é escassa.

Neste estudo, a baixa disponibilidade de dados da temperatura do ar e a inviabilidade do uso e análise de dados reais ligados ao consumo e rendimento dos sistemas de arrefecimento conduziu a cálculos e estimativas aproximadas.

Em possíveis estudos futuros, a dinâmica deste trabalho pode ser aprofundada com a recolha de dados medidos no local, conhecimento e utilização das propriedades dos materiais constituintes dos locais de estudo e dados reais sobre a potência e consumo energético dos sistemas de refrigeração para possibilitar uma avaliação mais precisa.

Por outro lado, este tema oferece vários caminhos de pesquisa interessantes. Uma vez que a cidade de Braga revela pouca variedade da temperatura superficial (provavelmente devido à utilização do método por satélite, no qual a utilização do método por análise de campo seria interessante para efeito de comparação) e um efeito de ilha de calor concentrado predominantemente nas áreas comerciais, seria interessante comparar este perfil com o perfil de temperatura de outras cidades portuguesas. Por exemplo, analisar o grau de variedade da temperatura com o perfil topográfico dos centros urbanos, identificar os principais focos de ilha de calor de cada cidade e avaliar a amortização do consumo energético perante iguais ou diferentes medidas de mitigação.

8. Bibliografia

- Abir, Farhan; Ahmmed, Sabbir; Sarker, Soykot and Fahim, Ashraf. (2021). Thermal and ecological assessment based on land surface temperature and quantifying multivariate controlling factors in Bogura, Bangladesh. *Heliyon*, 7 (9), e08012
- Bakarmana, Mohammed and Chang, Jae. (2015). The influence of height/width ratio on urban heat island in hot-arid climates. *International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction*, 118 (2015) 101 – 108
- Beg, Ayad; Al-Sulttani, Ahmed and Ochtyra, Adrian et al. (2016). Estimation of Evapotranspiration Using SEBAL Algorithm and Landsat-8 Data—A Case Study: Tatra Mountains Region. *Journal of Geological Resource and Engineering*, 6 (2016) 257-270
- Čeplová, Natálie; Kalusová, Veronika and Lososová, Z. (2017). Effects of settlement size, urban heat island and habitat type on urban plant biodiversity. *Landscape and Urban Planning*, 159 (2017), 15–22
- Deschacht, Nick and Winter, Anne. (2015). Rural crisis and rural exodus? Local migration dynamics during the crisis of the 1840s in Flanders (Belgium). *Explorations in Economic History*, 56 (2015), 32–52
- Dirksen, M.; Ronda, R.; Theeuwes, N. and Pagani, R. (2019). Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate*, 30 (2019), 100498
- Dwivedi, Aparna and Mohan, Krishna. (2018). Impact of green roof on micro climate to reduce Urban Heat Island. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 10 (2018), 56-69
- Faheda, Fahed; Kinabb, Elias; Ginesteta, Stepahne and Adolphec, Luc. (2020). Impact of urban heat island mitigation measures on microclimate and pedestrian comfort in a dense urban district of Lebanon. *Sustainable Cities and Society*, 61 (2020), 102375
- Fang, Hong; Zhao, Dongliang; Yuan, Jinchao et al. (2019). Performance evaluation of a metamaterial-based new cool roof using improved Roof Thermal Transfer Value model. *Applied Energy*, 248, 589-599
- Farhadi, Hamed; Faizib, Mohsen and Sanaieian, Hanyieh. (2019). Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran: Investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings. *Sustainable Cities and Society*, 46, 101448
- Feinberg, Alec. (2020). Urban heat island amplification estimates on global warming using an albedo model. *SN Applied Sciences*, 2, 2178
- Guattari, Claudia; Evangelisti, Luca; Balaras, Constantinos A. (2018). On the assessment of urban heat island phenomenon and its effects on building energy performance: A case study of Rome (Italy). *Energy and Buildings*, 158 (2018), 605-615.
- Guha, Subhanil; Govil, Himanshu; Dey, Anindita and Gill, Neetu (2018) Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy, *European Journal of Remote Sensing*, 51 (1), 667-678
- Halder, B.; Bandyopadhyay, Jatisankar and Banik, Papiya. (2021). Evaluation of the Climate Change Impact on Urban Heat Island Based on Land Surface Temperature and Geospatial Indicators. *International Journal of Environmental Research*, 15, 819–835

- He, Bao-Jie; Wang, Junsong; Liu, Huimin and Ulpiani, Giulia. (2021). Localized synergies between heat waves and urban heat islands: Implications on human thermal comfort and urban heat management. *Environmental Research*, 193, 110584
- Heaviside, Clare; Macintyre, Helen and Varsoulakis, Sotiris. (2017). The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current Environmental Health Reports*, 4 (3), 296-305
- Hoaward, Luke. (1833). *The Climate of London*. International Association for Urban Climate.
- Jiang, Shaojing; Lee, Xuhui; Wang, Jiankai and Wang, Kaicun. (2019). Amplified urban heat islands during heat wave periods. *J. Geophys. Res.: Atmosphere* 124 (14), 7797–7812
- Kandya, Anurag and Mohan, Manju (2018). Mitigating the Urban Heat Island effect through building envelope modifications. *Energy and Buildings*, 164 (2018), 266–277
- Khare, Vaibhav; Vajpai, Akash and Gupta, Durva. (2021). A big picture of urban heat island mitigation strategies and recommendation for India. *Urban Climate*, 37, (2021), 100845
- Kim, Hyoungsub; Gu, Donghwan and Kim, Hwan. (2018). Effects of Urban Heat Island Mitigation in Various Climate Zones in the United States. *Sustainable Cities and Society*, 41 (2018), 841-852
- Kolokotroni, Maria; Shittu, Emmanuel et al. (2018). Cool Roofs: High Tech Low Cost solution for energy efficiency and thermal comfort in low rise low income houses in high solar radiation countries. *Energy and Buildings*, 176, 58-70
- Lafferty, Kevin and Mordecai, Erin. (2016). The rise and fall of infectious disease in a warmer world. *F1000Research*, 5, F1000
- Li, Huidong; Meier, Fred; Lee, Xuhui; Chakraborty, Tirthankar et al. (2018). Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. *Science of The Total Environment*, 636 (2018), 818–828
- Litardo, J.; Palme, M.; Borbor-Cordova, M. et al. (2020). Urban Heat Island intensity and buildings' energy needs in Duran, Ecuador: Simulation studies and proposal of mitigation strategies. *Sustainable Cities and Society*, 62 (2020), 102387
- Lo, C.; Quattrochi, Dale. (2003). Land-Use and Land-Cover Change, Urban Heat Island Phenomenon, and Health Implications. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69 (9), 1053–1063
- Luvall, J. (2015). Boundary Layer (Atmospheric) and Air Pollution: Urban Heat Islands. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 2 (1), 310–318
- Malbêteau, Y.; Merlin, O.; Gascoin, S.; Gastellu, J.P.; Mattar, C.; Olivera-Guerra, L.; Khabba, S.; Jarlan, L. (2017). Normalizing land surface temperature data for elevation and illumination effects in mountainous areas: A case study using ASTER data over a steep-sided valley in Morocco. *Remote Sensing of Environment*, 189 (2017), 25–39
- Marando, Federica; Heris, Mehdi et al. (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103564
- Marelle, Louis; Myhre, Gunnar et al. (2020). Urbanization in megacities increases the frequency of extreme precipitation events far more than their intensity. *Environmental Research Letters*, 15 (2020) 124072

- Martin-Vide, Javier; Sarricolea, Pablo and Moreno-García, M. (2015). On the definition of urban heat island intensity: the “rural” reference. *Frontiers in Earth Science*, 3 (24)
- McKittrick, R. (2010). Atmospheric oscillations do not explain the temperature-industrialization correlation. *Stat Politics Policy*, 1 (1)
- Michaelowa, Axel; Allen, Myles and Sha, Fu. (2018) Policy instruments for limiting global temperature rise to 1.5°C – can humanity rise to the challenge?, *Climate Policy*, 18 (3), 275-286
- Mishra, Ashok; Singh, Vijay and Jain, Sharad. (2010). Impact of global warming and climate change on social development. *Journal of Comparative Social Welfare*, 26(2-3), 239–260
- Mohajerani, Abbas; Bakaric, Jason and Jeffrey-Bailey, Tristan. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522–538
- Moriwaki, Ryo; Kanda, Manabu; Senoo, Hiroshi et al. (2008). Anthropogenic water vapor emissions in Tokyo. *Water Resources Research*, 44 (11), W11424
- Ngarambe, Jack; Joen, Soo; Han, Choong and Yun, Geun. (2021). Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO₂, NO₂, O₃ and urban heat island in Seoul, Korea. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123615
- Ngie, Adeline; Abutaleb, Khaled el al. (2016). An Estimation of Land Surface Temperatures from Landsat ETM+ images for Durban, South Africa. *Rwanda journal*, 1 (2016), 18-20
- Oke, T. (1968). Toward a more rational understanding of the urban heat island. *McGill Climate Bulletin*. 22pp.
- Oleson, Keith; Monaghan, Andrew; Wilhelmi, Olga; Barlage, Michael et al. (2015). Interactions between urbanization, heat stress, and climate change. *Climatic Change*, 129 (3-4), 525–541
- Pavao-Zuckerman, Mitchell and Coleman, David. (2005). Decomposition of chestnut oak (*Quercus prinus*) leaves and nitrogen mineralization in an urban environment. *Biology and Fertility of Soils*, 41 (5), 343–349
- Pórolniczak, Marek; Kolendowicz, Leszek; Majkowska, Agnieszka and Czernecki, Bartosz. (2017). The influence of atmospheric circulation on the intensity of urban heat island and urban cold island in Poznań, Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, 127 (3-4), 611–625
- Pratap, Surya and Sunayana, Ms. (2017). Cool Roof Technology. *International Journal for Scientific Research and Development*, 4 (11), 2321-0613
- Ritchie, Hannah; Roser, Max and Rosado, Pablo. (2020). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Our World in Data. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
- Santamouris, M. and Yun, Young. (2020). Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat Island. *Renewable Energy*, 161, 792-807
- Sen, Sushobhan and Roesler, Jeffrey. (2020). Wind direction and cool surface strategies on microscale urban heat Island. *Urban Climate*, 31(2020), 100548
- Shafique, Muhammad; Kim, Reeho and Rafiq, Muhammed. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90 (2018), 757–773

- Shahfahad, Swapan Talukdar et al. (2021). Modelling urban heat island (UHI) and thermal field variation and their relationship with land use indices over Delhi and Mumbai metro cities. *Environment, Development and Sustainability*, 24, 3762-3790
- Shahmohamadi, P.; Che-Ani, A.; Etessam, I.; Maulud, K. and Tawil. N. (2011). Healthy Environment: The Need to Mitigate Urban Heat Island Effects on Human Health. *Procedia Engineering*, 20 (2011), 61–70
- Singh, Nidhi; Singh, Saumya and Mall, R. (2020). Urban ecology and human health: implications of urban heat island, air pollution and climate change nexus. *Urban Ecology*, 17, 317–334
- Steensen, B. M.; Marelle, L.; Hodnebrog, Ø. and Myhre, G. (2022). Future urban heat island influence on precipitation. *Climate Dynamics*
- Taha, Haider. (2004). Urban Heat islands Island Effect: Heat Islands and Energy. *Encyclopedia of Energy*, 3, 133–143
- Thomson R.; Richardson G.; Underwood, E.; Ashworth, E. et al. (2020). History of medicine. *Encyclopedia Britannica*
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On – A World of Climate Promises Not Yet Delivered. Nairobi
- Villalobos-Jiménez, Giovanna and Hassall, Christopher. (2017). Effects of the urban heat island on the phenology of odonata in London, UK. *International Journal of Biometeorology*, 61 (7), 1337–1346
- Vujovic, Svetlana; Haddad, Bechara; Karaky, Hamzé et al. (2021). Urban Heat Island: Causes, Consequences, and Mitigation Measures with Emphasis on Reflective and Permeable Pavements. *CivilEng*, 2 (2), 459–484
- Yow, Donald. (2007). Urban Heat Islands: Observations, Impacts, and Adaptation. *Geography Compass*, 1 (6), 1227–1251
- Zhang, Jinqu and Wang, Yunpeng. (2008). Study of the Relationships between the Spatial Extent of Surface Urban Heat Islands and Urban Characteristic Factors Based on Landsat ETM+ Data. *Sensors*, 8 (11), 7453-7468
- Zhong, Cheng; Chen, Chen; Liu, Yue; Gao, Peng and Li, Hui (2019). A Specific Study on the Impacts of PM2.5 on Urban Heat Islands with Detailed In Situ Data and Satellite Images. *Sustainability*, 11 (7075), 1-10
- Zhou, Decheng; Bonafoni, Stefania; Zhang, Liangxia; Wang, Ranghui (2018). Remote sensing of the urban heat island effect in a highly populated urban agglomeration area in East China. *Science of The Total Environment*, 628-629 (2018), 415–429
- Zipper, Samuel; Schatz, Jason; Singh, Aditya et al. (2016). Urban heat island impacts on plant phenology: intra-urban variability and response to land cover. *Environmental Research Letters*, 11 (5), 054023–0.54036