



MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2024/2025

**ADAPTAÇÃO ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM SISTEMAS DE
TRANSPORTE PÚBLICO**

O CASO DA METRO DO PORTO, S.A

INÊS VALENTE GOMES E ALMEIDA

Dissertação submetida para obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Presidente do Júri:

Adrián Manuel Tavares da Silva, Professor Associado do Departamento de Engenharia
Química da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientador Académico:

Cecília Alexandra Abreu Coelho da Rocha, Professora Auxiliar do Departamento de
Engenharia Civil e Georrecursos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientador na Empresa:

Ana Paula de Figueiredo Andrade Gonçalves, Engenheira do Ambiente Diretora do
Gabinete de Ambiente, Segurança e Qualidade da Metro do Porto, S.A

Setembro, 2025

Agradecimentos

A concretização desta dissertação representa o culminar de um longo percurso académico, que não seria possível sem o contributo de algumas pessoas, a quem agradeço.

Um agradecimento especial aos meus pais, irmã e avós pelo amor incondicional, incentivo constante e apoio essencial em todas as etapas.

À minha família mais próxima — madrinha, tia e prima — por serem um pilar fundamental na minha vida.

Ao António, pelo apoio, paciência e motivação ao longo de toda esta caminhada.

Às minhas “migas” de sempre, pelo companheirismo e alegria partilhados há quase vinte anos.

Aos meus amigos, com quem calço as mesmas botas à dez anos, cuja colaboração e união foram decisivas para a conclusão deste estudo.

Aos amigos do ISEP e da FEUP, que tornaram a experiência académica mais enriquecedora e equilibrada.

À Metro do Porto, em especial à Eng.^a Ana Paula Gonçalves e ao Eng. Bruno Magalhães, pelo apoio e disponibilidade.

Aos professores que contribuíram para a minha formação, com destaque para a Professora Cecília Rocha, pela orientação e conhecimento transmitidos.

A todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta dissertação, o meu sincero obrigada.

**“As quimeras que queimamos
Pelos dias nas correntes fugidias
Que a saudade vai lembrar
São poemas que gravamos
Nesses quadros que pintamos
Com a arte de sonhar.
Enfim...
Chegou a hora de ancorar”
Alexandre Reis (1997)**

Resumo

As alterações climáticas constituem um dos maiores desafios globais da atualidade, com implicações profundas para os ecossistemas, a sociedade e as infraestruturas urbanas. No setor dos transportes públicos, os sistemas ferroviários (entre os quais se inclui o metro) assumem especial relevância pela sua capacidade de promover uma mobilidade sustentável, com menores emissões de carbono. No entanto, pela sua localização e posicionamento, enterrado ou à superfície, encontram-se expostos a fenómenos climáticos extremos.

Atendendo à sua expressão territorial, à dimensão e extensão das suas linhas, e à diversidade das soluções estruturais em que assenta, o SMLAMP assume um papel estruturante na mobilidade da Área Metropolitana do Porto (AMP) e configura-se como um caso de estudo particularmente relevante. O objetivo central deste trabalho consistiu na avaliação dos impactos das alterações climáticas na infraestrutura e operação do sistema, identificando vulnerabilidades críticas e propondo medidas de adaptação orientadas para a resiliência e sustentabilidade do sistema. Para tal, foi aplicada a metodologia ADAM (*Adaptation Assessment Framework*), complementada com projeções climáticas e com análises espaciais realizadas em *Google Earth Pro*. Os dados observados (2000–2024) e os cenários climáticos futuros (RCP 4.5 e RCP 8.5) permitiram realizar uma avaliação prospetiva até ao 2070.

Os resultados evidenciaram que os principais riscos climáticos para o sistema decorrem da precipitação intensa, com elevado risco de inundações em estações subterrâneas (ex. Campo 24 de Agosto e Bolhão), das ondas de calor, que afetam carris, catenária e equipamentos como elevadores bem como dos ventos fortes, responsáveis por danos em linhas de superfície e quedas de árvores. Estes fenómenos têm vindo a provocar interrupções da operação, custos adicionais de manutenção e impactos na segurança e conforto dos utilizadores, perspetivando-se um agravamento futuro. Face a estes riscos, foram propostas medidas de adaptação agrupadas em três tipologias: infraestruturas cinzentas (incluindo reforço de drenagem e climatização de equipamentos), infraestruturas verdes (como coberturas verdes e pavimentos permeáveis) e medidas não estruturais (como planos de contingência, protocolos operacionais e campanhas de sensibilização). A análise indicou que a adaptação de estações subterrâneas e o reforço de sistemas de drenagem urbana assumem carácter prioritário, seguidos de intervenções complementares na climatização de equipamentos e na gestão da vegetação em linhas de superfície.

Esta dissertação concluiu que a adaptação climática das infraestruturas deve assentar numa abordagem integrada e contínua, que combine intervenções técnicas, planeamento estratégico e sensibilização social. A implementação coordenada das medidas identificadas permitirá não apenas mitigar impactos negativos, mas também gerar benefícios adicionais, como o aumento da confiança dos utilizadores, a redução de custos operacionais e a melhoria da eficiência energética.

Palavras-chave: Alterações Climáticas; Adaptação; Transporte Público; Metro do Porto; Resiliência.

Abstract

Climate change is one of the greatest global challenges of our time, with profound implications for ecosystems, society, and urban infrastructure. In the public transport sector, rail systems (including metros) are particularly relevant due to their ability to promote sustainable mobility with lower carbon emissions. However, their location and positioning—whether underground or at surface level—expose them to extreme weather events.

Given its territorial significance, the scale and extent of its lines, and the diversity of its structural solutions, the Metro do Porto (SMLAMP) plays a foundational role in the mobility of the Porto Metropolitan Area (AMP) and serves as a particularly relevant case study. The central objective of this work was to assess the impacts of climate change on the system's infrastructure and operations, identifying critical vulnerabilities and proposing adaptation measures focused on enhancing resilience and sustainability. To achieve this, the ADAM (Adaptation Assessment Framework) methodology was applied, complemented by climate projections and spatial analyses conducted in Google Earth Pro. Observed data (2000–2024) and future climate scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) enabled a prospective assessment up to 2070.

The results highlighted that the main climate risks to the system stem from intense rainfall, with a high risk of flooding in underground stations (Campo 24 de Agosto and Bolhão), heatwaves, which affect rails, overhead lines, and equipment such as elevators, and strong winds, responsible for damage to surface lines and falling trees. These phenomena have already caused operational disruptions, additional maintenance costs, and impacts on user safety and comfort, with further aggravation expected in the future. In response to these risks, adaptation measures were proposed, grouped into three categories: gray infrastructure (including drainage reinforcement and equipment climate control), green infrastructure (such as green roofs and permeable pavements), and non-structural measures (such as contingency plans, operational protocols, and awareness campaigns). The analysis indicated that adapting underground stations and reinforcing urban drainage systems are top priorities, followed by complementary interventions in equipment climate control and vegetation management along surface lines.

This dissertation concluded that climate adaptation of infrastructure must rely on an integrated and continuous approach, combining technical interventions, strategic planning, and social awareness. The coordinated implementation of the identified measures will not only mitigate negative impacts but also generate additional benefits, such as increased user confidence, reduced operational costs, and improved energy efficiency.

Keywords: Climate Change; Adaptation; Public Transport; Metro do Porto; Resilience.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Índice de figuras	xi
Índice de quadros	xv
Lista de Siglas	xvii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura e organização da dissertação	3
2. Estado da Arte.....	4
2.1 Alterações climáticas	4
2.2 Conceitos-chave associados às alterações climáticas	6
2.2.1 Adaptação às Alterações Climáticas	6
2.2.2 Vulnerabilidade às Alterações Climáticas	7
2.2.3 Mitigação das Alterações Climáticas	10
2.3 Metodologia ADAM	11
2.3.1 Aplicação da metodologia ADAM na dissertação	11
2.3.2 Projeções climáticas.....	14
2.3.3 Seleção das variáveis climáticas de interesse	15
2.4 Ferramentas de análise espacial.....	17
2.5 Enquadramento nos objetivos do desenvolvimento sustentável	17
3. Caso de Estudo: Metro do Porto	19
3.1 Enquadramento territorial	19
3.2 Caracterização do sistema da Metro do Porto	20
3.3 Contributo para a mitigação das Alterações Climáticas	24
3.4 Impactos e vulnerabilidades da rede do Metro	27
3.5 Casos críticos de vulnerabilidade no metro do Porto	29
3.6 Soluções implementadas.....	32

4. Análise do Sistema	37
4.1 Contextualização climática	37
4.2 Evolução observada das principais variáveis climáticas: 2001–2024	37
4.3 Projeções climáticas (2011-2040 e 2041-2070)	41
4.3.1 Temperatura	41
4.3.2 Precipitação	45
4.3.3 Vento	49
4.3.4 Síntese das potenciais interferências associadas às AC.....	52
4.4 Análise de risco face às projeções climáticas	53
4.4.1 Horizonte 2011–2040	55
4.4.2 Horizonte 2041–2070	56
5. Adaptação do sistema	60
5.1 Avaliação crítica da adaptação em sistemas de transporte - o caso do metro do Porto	60
5.2 Limitações Estruturais e Caminhos para a Adaptação do Metro do Porto	61
5.3 Medidas de Adaptação.....	65
5.3.1 Estrutura das medidas de adaptação	65
5.4 Classificação das medidas de adaptação.....	69
5.5 Avaliação e priorização.....	71
5.6 Gestão da Adaptação	73
6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	77
6.1 Principais Conclusões	77
6.2 Trabalhos futuros.....	78
Referências Bibliográficas.....	81

Índice de figuras

Figura 1 - Componentes de vulnerabilidade (adaptado de [15]).....	7
Figura 2 - Esquema representativo da base metodológica ADAM [16].....	12
Figura 3 - Matriz aplicada na avaliação do risco [18].....	13
Figura 4 - Localização da AMP em Portugal. Mapa da autora com suporte no <i>Google Earth Pro</i> , 2025.	20
Figura 5 - Enquadramento das linhas do MP na AMP. <i>Mapa da autora com suporte no Google Earth Pro</i> , 2025.	20
Figura 6 - Mapa representativo da rede de metro em operação (à esquerda) e incluindo os troços atualmente em construção (à direita) [22]	21
Figura 7 - Emissões indiretas de GEE referentes ao ano de 2022,2023 e 2024 [23]	25
Figura 8 - Emissões evitadas pela utilização do metro, referentes ao ano de 2022,2023 e 2024 [23].....	25
Figura 9 - Consumos de energia referentes ao ano de 2022, 2023 e 2024 [23].....	26
Figura 10 - Consumos de água referentes aos anos de 2022,2023 e 2024 [23]	27
Figura 11 - Exterior da estação Campo 24 de agosto inundado, que resultou na inundação da estação (fonte interna)	30
Figura 12- Queda de árvores na via em janeiro de 2025 [24]	31
Figura 13 - Um dos elevadores da estação dos Aliados (fonte da autora)	32
Figura 14 - Barreiras implementadas na estação campo 24 de Agosto (imagens facultadas pela MP, 2025)	33
Figura 15 - Requalificação da rede de drenagem: estação Modivas Sul (imagens facultadas pela MP, 2025)	34
Figura 16 - Histórico da Temperatura observado em 2001 [25].....	38
Figura 17 - Histórico da temperatura observado em 2024 [25]	38
Figura 18 - Velocidade do vento observada no Porto em 2001 [25]	39
Figura 19 - Velocidade do vento observada em 2024 [25]	39
Figura 20- Precipitação observada em 2001 [19]	40
Figura 21- Precipitação observada em 2024 [26]	40
Figura 22 - Gráfico correspondente à temperatura média do horizonte temporal 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]	42
Figura 23- Gráfico correspondente à temperatura média do horizonte temporal 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]	42
Figura 24 - Gráfico correspondente à temperatura média do horizonte temporal 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]	42
Figura 25 - Gráfico correspondente à temperatura média do horizonte temporal 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]	42
Figura 26 - Mapa correspondente à Temperatura média do horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]. Linhas do SMLAMP (a vermelho) sobre dados de temperatura e sobre <i>Google Earth Pro</i> , 2025. Mapa da autora.....	43
Figura 27 – Mapa correspondente à temperatura média do horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP8.5. Linhas do SMLAMP (a vermelho) sobre dados de temperatura e sobre <i>Google Earth Pro</i> , 2025. Mapa da autora.....	43
Figura 28- Mapa correspondente à Temperatura média do horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]. Linhas do SMLAMP (a vermelho) sobre dados de temperatura e sobre <i>Google Earth Pro</i> , 2025. Mapa da autora.....	43

Figura 29 - Mapa correspondente à temperatura média do horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP4.5. Linhas do SMLAMP (a vermelho) sobre dados de temperatura e sobre Google Earth Pro, 2025. Mapa da autora.....	43
Figura 30 - Gráfico correspondente ao número de dias quentes para o horizonte temporal 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19].....	44
Figura 31 - Gráfico correspondente ao número de dias quentes para o horizonte temporal 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP [19].....	44
Figura 32 - Gráfico correspondente ao número de dias quentes para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8,5 para a AMP [19].....	44
Figura 33 - Gráfico correspondente ao número de dias quentes para o horizonte temporal 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP [19].....	44
Figura 34 - Gráfico correspondente ao número de dias de geada para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19].....	45
Figura 35 - Gráfico correspondente ao número de dias de geada para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8,5 para a AMP [19].....	45
Figura 36 - Gráfico correspondente ao número de dias de geada para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP [19].....	45
Figura 37 - Gráfico correspondente ao número de dias de geada para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 8,5 para a AMP [19].....	45
Figura 38 - Gráfico correspondente à precipitação máxima acumulada em 5 dias para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19].....	46
Figura 39 - Gráfico correspondente à precipitação máxima acumulada em 5 dias para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP [19].....	46
Figura 40 - Gráfico correspondente à precipitação máxima acumulada em 5 dias para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP [19].....	46
Figura 41 - Gráfico correspondente à precipitação máxima acumulada em 5 dias para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP [19].....	46
Figura 42 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação $\geq 20\text{mm}$ para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19].....	48
Figura 43 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação $\geq 20\text{mm}$ para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP [19].....	48
Figura 44 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação $\geq 20\text{mm}$ para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP [19].....	48
Figura 45 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação $\geq 20\text{mm}$ para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP [19].....	48
Figura 46 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação $\geq 50\text{mm}$ para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19].....	49
Figura 47 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação $\geq 50\text{mm}$ para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP [19].....	49
Figura 48 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação $\geq 50\text{mm}$ para o horizonte temporal de 2041-2070 cenário RCP 4.5 para a AMP [19].....	49
Figura 49 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação $\geq 50\text{mm}$ para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP [19].....	49
Figura 50 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento moderado para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19].....	51
Figura 51 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento moderado para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP [19].....	51

Figura 52 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento moderado para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP [19].....	51
Figura 53 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento moderado para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP [19].....	51
Figura 54 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento forte para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP	52
Figura 55 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento forte para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP	52
Figura 56 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento forte para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP	52
Figura 57 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento forte para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP	52
Figura 58 - Matriz de Risco Horizonte 2011-2040 (adaptado de [18])	56
Figura 59- Matriz de risco Horizonte 2041–2070 (adaptado de [18])	57
Figura 60 – Distribuição geográfica da probabilidade de ocorrência de eventos climáticos extremos [26]	58
Figura 61 - Relação entre custos de adaptação, custos residuais e benefícios obtidos [27]	61
Figura 62 - Evolução do risco ao longo do tempo em função de diferentes estratégias de adaptação [27]	63

Índice de quadros

Quadro 1 - Resumo das principais propostas de adaptação e avaliação do impacto e urgência das mesmas, de forma a definir a prioridade das mesmas	72
---	----

Lista de Siglas

- **AC:** Alterações climáticas
- **ADAM:** *Adaptation Assessment Framework*
- **AMP:** Área Metropolitana do Porto
- **APA:** Agência Portuguesa do Ambiente
- **AVAC:** Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
- **CO₂e:** Dióxido de carbono equivalente
- **EMAAC:** Estratégia Municipal de Mitigação e Adaptação às Alterações Climáticas
- **EN AAC:** Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas
- **FEUP:** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- **GEE:** Gases com Efeito de Estufa
- **IPCC:** *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- **INERPA:** Inventário Nacional de Emissões por Fontes e Remoção por Sumidouros de Poluentes Atmosféricos
- **KPI:** *Key Performance Indicator*
- **LBC:** Lei de Bases do Clima
- **MP:** Metro do Porto, SA
- **GCM:** *Global Climate Model*
- **ODS:** Objetivos Desenvolvimento Sustentável
- **PMO:** Parque de Material e Oficina
- **PMAAC:** Plano Metropolitano de Adaptação às Alterações Climáticas
- **RCM:** *Regional Climate Model*
- **RCP:** *Representative Concentration Pathway*
- **SMLAMP:** Sistema de Metro Ligeiro da Área Metropolitana do Porto
- **SNMM:** Subida Nível Médio do Mar
- **ULEZ:** *Ultra Low Emission Zone*

1.

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Motivação

O desenvolvimento tecnológico, aliado ao aumento da exploração de combustíveis fósseis e à crescente pressão sobre o uso do solo, tem contribuído de forma significativa para a intensificação das alterações climáticas (AC). Estas transformações nos sistemas naturais despertam uma preocupação crescente relativamente aos impactos ambientais, ao equilíbrio dos ecossistemas e à sustentabilidade da vida na Terra [1].

Neste contexto, a comunidade científica tem direcionado os seus esforços para a análise das tendências climáticas históricas e para a simulação de cenários futuros, com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre a evolução do clima e antecipar os seus efeitos nas diferentes dimensões socioeconómicas.

A Metro do Porto (MP), empresa responsável pela operação do sistema de metro ligeiro da área metropolitana do porto (SMLAMP), assume um papel central na redução da dependência de combustíveis fósseis e, consequentemente, na diminuição das emissões de gases com efeito de estufa (GEE). Todavia, a sua infraestrutura apresenta vulnerabilidades associadas ao novo regime climático e aos fenómenos extremos.

A intensificação da frequência e da severidade de fenómenos meteorológicos extremos, como ondas de calor e frio, precipitação intensa, ventos fortes ou períodos prolongados de seca, entre outros, tem exposto, de forma crescente, as infraestruturas urbanas a um contexto climático incerto, exigindo uma avaliação da sua resiliência.

Neste enquadramento, o SMLAMP revela-se particularmente suscetível a alguns desses eventos climáticos extremos que podem comprometer a operação, segurança, fiabilidade técnica e até o conforto dos utilizadores.

Entre os riscos mais relevantes para a infraestrutura destacam-se:

- a ocorrência de eventos de precipitação extrema, que agravam o risco de inundações em estações subterrâneas e túneis, com potenciais impactos nos sistemas elétricos e na operacionalidade do serviço [2].
- o aumento da temperatura média do ar, que pode induzir a dilatação térmica dos componentes da via, exigindo intervenções de manutenção mais frequentes.
- e as alterações dos padrões de humidade relativa, que condicionam o desempenho de sistemas de ventilação e climatização, comprometendo tanto o conforto térmico como a eficiência energética [3].

Perante este cenário, a identificação e análise das vulnerabilidades climáticas das infraestruturas da Metro do Porto assumem especial relevância para a definição de medidas de adaptação eficazes, capazes de assegurar a continuidade e a sustentabilidade do serviço de transporte urbano.

Esta investigação é, assim, motivada pela necessidade de dotar o sistema de transporte da MP de soluções de adaptação robustas, que reforcem a sua resiliência a médio e longo prazo. Para a elaboração da presente dissertação recorreu-se aos cenários climáticos adotados na elaboração do Plano Metropolitano de Adaptação às Alterações Climáticas da Área Metropolitana do Porto (PMAAC-AMP) [4] e das Estratégias Municipais de Adaptação às Alterações Climáticas (EMAAC) dos vários municípios da AMP [2]. Este enquadramento garante uma fundamentação sólida para a tomada de decisão e para o planeamento estratégico de futuras intervenções. Foram aplicadas ferramentas que permitem uma análise espacial simplificada, como do *Google Earth Pro*, possibilitou a criação de mapas temáticos que evidenciam as zonas mais críticas e suportam a definição de estratégias de adaptação climática.

Pretende-se que esta dissertação, pelo conjunto de orientações e recomendações práticas, cientificamente fundamentadas, que apresenta, contribua para incrementar a resiliência das infraestruturas e equipamentos e apoiar, tanto os decisores técnicos da Metro do Porto como os formuladores de políticas públicas da AMP. Releva-se que o reforço da capacidade de adaptação não só protege as infraestruturas existentes, como também posiciona a Metro do Porto como uma referência nacional no planeamento da mobilidade urbana orientada para o futuro, em cenários fortemente influenciados pelas alterações climáticas.

Adicionalmente, esta investigação procura contribuir para o debate mais amplo sobre a adaptação às alterações climáticas de sistemas de transporte urbano, promovendo uma abordagem integrada que articule as dimensões ambiental, económica e social da mobilidade. Não se pode duvidar do papel dos transportes públicos na mitigação de emissões de GEE e na melhoria da qualidade de vida urbana, uma vez que apresenta potencial de redução da utilização dos veículos privados e a sua operação assenta na utilização de energia elétrica. No entanto, é essencial que estejam preparados para responder de modo resiliente aos novos desafios climáticos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral da presente investigação inclui a proposta de um conjunto de medidas de adaptação que promovam a resiliência, a segurança e a sustentabilidade do sistema de transporte na Área Metropolitana do Porto (AMP). Para o efeito, serão analisadas as tendências climáticas passadas e as projeções futuras e avaliados os potenciais impactos das alterações climáticas sobre a infraestrutura e a operação da MP.

De forma mais específica, com esta dissertação pretende-se:

- i) caracterizar a evolução histórica das variáveis climáticas a partir de dados observacionais e de projeções de modelos regionais e globais;
- ii) identificar as principais vulnerabilidades das infraestruturas do SMLAMP, face à experiência passada da operação da MP e aos cenários climáticos futuros. Para o efeito, propõe-se integrar e processar dados climáticos em ambiente de análise espacial, recorrendo ao *Google Earth Pro*, de modo a produzir cartografia temática representativa dos riscos climáticos e a localizar zonas críticas da rede;
- iii) avaliar os impactos associados a fenómenos extremos como ondas de calor, precipitação intensa e ventos fortes, sobre o desempenho operacional e estrutural do sistema (segurança da infraestrutura, o conforto dos utilizadores e a eficiência energética dos equipamentos) e, por último,
- iv) propor um conjunto de ações de adaptação técnica e operacional, fundamentadas em evidência científica e em boas práticas internacionais, que possam ser aplicadas ao planeamento e à gestão do SMLAMP.

1.3 Estrutura e organização da dissertação

Esta dissertação estrutura-se em 7 capítulos, que incluem a presente introdução, uma secção com os principais conceitos e com o estado da arte sobre a adaptação às Alterações Climáticas, a descrição e caracterização do caso de estudo e o desenvolvimento de uma estratégia de adaptação para as infraestruturas da Metro do Porto.

O Capítulo 1 (Introdução) estabelece o enquadramento e a motivação do estudo, definindo os seus objetivos e relevância para o sector dos transportes.

O Capítulo 2 (Estado da Arte) consolida os conceitos fundamentais sobre alterações climáticas, adaptação e risco, aborda o quadro político e legislativo relevante e apresenta algumas das metodologias e ferramentas utilizadas na preparação dos elementos de suporte a esta dissertação.

O Capítulo 3 dedica-se à caracterização do caso de estudo, detalhando a infraestrutura, tipologias e fragilidades do sistema Metro do Porto.

O Capítulo 4 apresenta a análise da situação atual das infraestruturas da MP, o contexto climático em que se enquadram, as projeções climáticas consideradas (incluindo a descrição da aplicação da metodologia ADAM) e as técnicas de análise espacial empregues.

O Capítulo 5 avança com a proposta de medidas de adaptação, organizadas por categorias temáticas e acompanhadas de critérios de priorização.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais, sintetizando os resultados e discutindo limitações e caminhos para investigação futura.

Foi também integrado um ponto para as referências bibliográficas.

2.

ESTADO DA ARTE

2.1 Alterações climáticas

As alterações climáticas representam uma das ameaças mais significativas do século XXI, caracterizadas por mudanças persistentes nos padrões climáticos a nível global e regional, maioritariamente impulsionadas pela atividade humana. A intensificação da utilização de combustíveis fósseis, a desflorestação e a urbanização acelerada têm contribuído, decisivamente, para o aumento das concentrações de gases com efeito de estufa na atmosfera, em especial, do dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxidos de azoto (NO_x). De acordo com o Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas [1], este acréscimo de gases intensifica o efeito de estufa natural, conduzindo a um aquecimento global progressivo.

As consequências mais visíveis deste fenómeno incluem o aumento da temperatura média global, o degelo das calotas polares e dos glaciares, a expansão térmica dos oceanos e a consequente subida do nível médio do mar. Registam-se, ainda, alterações nos regimes de precipitação e uma intensificação da frequência e severidade de fenómenos meteorológicos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas, tempestades intensas e cheias rápidas, conforme documentado pela Agência Europeia do Ambiente [5] e pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas [6].

Estes impactos têm repercussões transversais nos ecossistemas e nas sociedades humanas, afetando a biodiversidade, a disponibilidade e gestão de recursos hídricos, a produtividade agrícola, a saúde pública e a resiliência das infraestruturas urbanas, de acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente [2].

No setor dos transportes, e em particular no SMLAMP, identificam-se riscos específicos, como inundações em estações subterrâneas, sobrecarga e falha dos sistemas de drenagem, degradação acelerada de materiais e equipamentos devido a temperaturas extremas, e interrupções de serviço em linhas de superfície causadas por ventos fortes ou queda de árvores, tal como analisado após recolha de informação na empresa.

Na AMP, observam-se já fenómenos climáticos que incluem um aumento da frequência de noites tropicais, ondas de calor mais duradouras e episódios de precipitação intensa concentrados em curtos períodos. Estes eventos afetam diretamente a fiabilidade e a pontualidade dos serviços de transportes coletivos e elevam os custos associados à manutenção e reparação da rede e podem comprometer a segurança de passageiros e trabalhadores [7].

Em contextos urbanos as consequências diretas das alterações climáticas, como o efeito de ilha de calor urbana, podem amplificar os impactos do aquecimento global. A

ocorrência de ondas de calor, mais intensas e prolongadas, tem efeitos negativos na saúde pública, no aumento do consumo de energia para arrefecimento e na degradação mais rápida de materiais e infraestruturas críticas [1]. Para além dos impactos físicos diretos, as temperaturas elevadas e as variações térmicas abruptas agravam patologias respiratórias e cardiovasculares, reduzem o conforto térmico dentro das estações e carruagens e dificultam a manutenção de condições seguras de operação. Estes fatores conduzem inevitavelmente a um aumento dos custos operacionais e exigem investimentos adicionais em medidas de manutenção, arrefecimento e adaptação da infraestrutura [8].

Outro impacto de grande relevância é a subida do nível médio do mar, resultante do degelo e da expansão térmica da água dos oceanos, que constitui uma ameaça particularmente significativa para zonas costeiras, onde se localizam algumas linhas de metro da Metro do Porto. Este risco potencia a ocorrência de inundações, a intrusão de água salina e eventuais danos estruturais em túneis e estações subterrâneas [2] [3].

Perante este cenário, Portugal tem vindo a assumir compromissos políticos ambiciosos no âmbito do combate às alterações climáticas. Em 2019, foi oficialmente declarado o Estado de Emergência Climática¹, um ato que reforçou a urgência de uma ação concertada [2]. Posteriormente, em dezembro de 2021, foi aprovada a Lei de Bases do Clima (Lei n.º 98/2021, de 31 de dezembro, [9]), que estabelece o quadro nacional de governação climática e define os direitos e os deveres do Estado, das autarquias locais, das empresas e dos cidadãos. Esta lei consagra metas ambiciosas de mitigação, incluindo uma redução mínima de 55% das emissões de gases com efeito de estufa até 2030, entre 65% e 75% até 2040 e, pelo menos, 90% até 2050, tomando como referência os níveis de 2005. Estes objetivos estão em total sintonia com os compromissos assumidos no Acordo de Paris [10] e com as orientações estratégicas do Pacto Ecológico Europeu [11], que estabelecem o caminho internacional para a alcançar a neutralidade carbónica.

Perante este enquadramento, a Metro do Porto confronta-se com a dupla exigência de alinhar o planeamento da rede, assim como as suas práticas operacionais e de gestão, com as metas nacionais e europeias de neutralidade carbónica, enquanto tem de desenvolver e implementar medidas concretas de adaptação às alterações climáticas.

Esta dupla responsabilidade significa que a empresa, em termos globais, deve prosseguir uma estratégia integrada que combine a *mitigação*, através da descarbonização progressiva da sua operação, por exemplo, com a eletrificação total da frota, e a contribuição para estratégias nacionais de mitigação, propiciando a alteração modal de modos de transporte, atualmente sustentados em combustíveis fósseis, para a utilização de soluções eletrificadas como o metro ligeiro, a aposta em fontes de energia renovável e o aumento da eficiência energética, com a *adaptação*, através do reforço da resiliência da sua infraestrutura face aos riscos climáticos já indicados.

A conjugação entre os riscos físicos, como inundações, ondas de calor e tempestades, e as exigências legislativas crescentes, Lei de Bases do Clima [9] e Pacto Ecológico

¹ *Estado de Emergência Climática*: Declaração formal que reconhece a crise climática como uma ameaça urgente, exigindo ações imediatas e extraordinárias para reduzir os seus impactos.

Europeu [11], reforça a urgência de agir. A Metro do Porto, reforça a urgência de agir. A MP não pode ser vista apenas como um vetor de mobilidade sustentável, mas também como um sistema crítico que deve assegurar a sua própria robustez e continuidade operacional num clima em mudança.

A implementação de estratégias de resiliência climática torna-se, portanto, um imperativo estratégico. Isto implica investimentos em infraestruturas existentes: para prevenir inundações em estações subterrâneas, como a revisão dos sistemas de drenagem para lidar com situações de precipitação extrema, para minimizar a necessidade de interrupções no serviço, como a adoção de materiais mais resistentes a temperaturas elevadas, para além da criação de planos de contingência robustos para fazer face a eventos extremos.

Ao fazê-lo, a MP não estará apenas a proteger o seu património, mas a garantir a segurança de passageiros e trabalhadores, salvaguardando a sua fiabilidade e a confiança dos seus utilizadores e constituindo-se como um pilar fundamental para a própria resiliência da Área Metropolitana do Porto, assegurando a mobilidade das pessoas mesmo perante a ocorrência de fenómenos meteorológicos adversos.

2.2 Conceitos-chave associados às alterações climáticas

2.2.1 Adaptação às Alterações Climáticas

A *adaptação às alterações climáticas* corresponde ao processo de ajustamento de sistemas naturais, sociais e económicos face aos efeitos observados ou projetados do clima, com o objetivo de reduzir vulnerabilidades e reforçar a resiliência [1].

Este conceito ganha relevância no atual contexto porque muitos dos impactos climáticos já são inevitáveis, mesmo perante esforços globais de mitigação. A adaptação surge, assim, como um complemento essencial à mitigação, assegurando a continuidade das funções sociais, económicas e ambientais.

As medidas de adaptação podem assumir diversas formas, podem ser medidas estruturais, não estruturais e/ou operacionais:

- as *medidas estruturais*, incluem o reforço e modernização de infraestruturas urbanas e de transporte;
- as *medidas não estruturais*, traduzem-se na revisão dos instrumentos de gestão do território (por exemplo, dos regulamentos dos planos diretores municipais), com a integração de critérios climáticos nas políticas territoriais e demais políticas públicas e na promoção da educação ambiental.
- as *medidas operacionais*, compreendem a definição de protocolos de contingência, de planos de evacuação e da introdução de sistemas de alerta precoce.

Em Portugal, a adaptação climática é reconhecida como prioridade nacional, consagrada na Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (ENAAAC) [2]. Esta estratégia tem como objetivos centrais aumentar o conhecimento sobre impactos e

vulnerabilidades, integrar a adaptação nas políticas setoriais e promover a implementação de medidas eficazes a nível local, regional e [2].

Complementam a ENAAC, o Programa de Ação para a Adaptação às Alterações Climáticas (P-3AC) [12] estando também em elaboração o Roteiro Nacional para a Adaptação 2100 (RNA 2100) [13], que detalham a vulnerabilidade territorial e apresentam medidas de orientação para longo prazo, que têm de ser devidamente desenvolvidas para os setores a que respeitam.

A nível da região do Porto, destaca-se o Plano *METROCLIMA* [14], desenvolvido pela Área Metropolitana do Porto, no qual são identificados os riscos prioritários para a região como a precipitação intensa, as ondas de calor, a subida do nível médio do mar e as tempestades costeiras. Nesse Plano também são propostas medidas específicas para a mobilidade e infraestruturas críticas.

2.2.2 Vulnerabilidade às Alterações Climáticas

O conceito de *vulnerabilidade* é central neste enquadramento e é definido pelo IPCC [1] como o grau em que um sistema pode ser adversamente afetado pelas alterações climáticas. A vulnerabilidade resulta da interação entre três componentes: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa e traduz a propensão ou predisposição que determinado elemento ou conjunto de elementos têm para serem impactados negativamente. A sua combinação com a frequência dos eventos climáticos resulta no risco climático, como se pode observar na Figura 1.

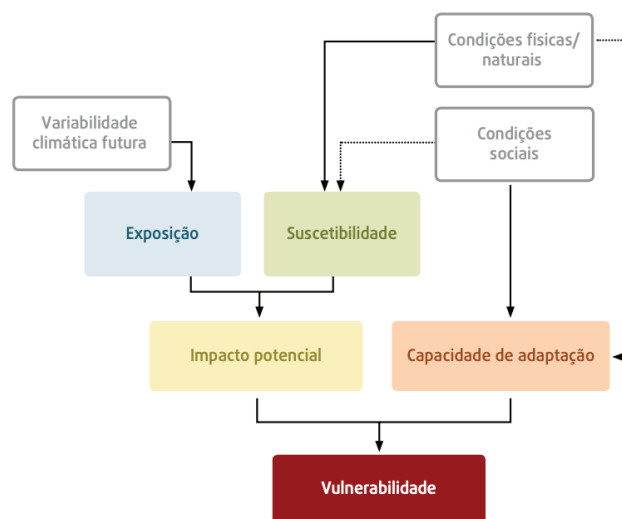


Figura 1 - Componentes de vulnerabilidade (adaptado de [15]).

A *exposição*, componente central da vulnerabilidade, define-se pela interface direta com os parâmetros climáticos. Esta dimensão é quantificada pela magnitude, frequência e variabilidade dos eventos climáticos, abrangendo variáveis como temperatura, precipitação, além de extremos como precipitação intensa e secas meteorológicas.

Alterações nestes fatores elevam o nível de stress climático imposto a um determinado sistema [16].

De entre todos os fatores que tornam uma região vulnerável, a exposição está diretamente relacionada com as condições climáticas locais.

No entanto, o impacto real dessas condições depende de uma segunda componente crucial: a sensibilidade (ou suscetibilidade). Enquanto a exposição descreve *o que é* que o sistema enfrenta (os eventos climáticos), a sensibilidade responde à pergunta: *Qual é a predisposição inerente do sistema para ser afetado?*

Pode-se então concluir que a *sensibilidade* permite determinar o grau, seja benéfico ou adverso, em que o sistema é impactado por uma exposição climática específica [16].

A sensibilidade é condicionada pelas características naturais, físicas e socioeconómicas intrínsecas do sistema, incluindo:

- Condições naturais: Topografia, tipo de solo e sua capacidade de resistir à erosão, geologia, cobertura vegetal e tipos de ecossistemas;
- Uso e ocupação do solo;
- Atividades humanas: Práticas agrícolas, gestão de recursos hídricos, pressões de urbanização e características da população que modificam o ambiente natural.

É importante notar que muitos sistemas já possuem infraestruturas construídas e práticas instituídas para se adaptarem ao clima atual e, por esse motivo, uma avaliação completa da sensibilidade deve considerar não apenas as fragilidades, mas também a capacidade de adaptação já existente, que pode atenuar os efeitos da exposição climática.

Como já referido, a vulnerabilidade de um sistema resulta da ameaça climática (exposição) e da sua predisposição a ser afetado (sensibilidade), sendo atenuada pela sua capacidade de adaptação atual [16].

Nesse contexto, a vulnerabilidade da rede de metro do Porto resulta diretamente da interação entre a sua exposição a fenómenos climáticos e a sua sensibilidade intrínseca a esses mesmos eventos. É esta combinação que determina o impacto potencial no sistema de transporte. Para ilustrar esta relação, e utilizando como exemplo a ocorrência de um evento de precipitação intensa e subsequente inundação (a exposição), constata-se que, em zonas da rede que são subterrâneas, o resultado direto será a inundação de estações e túneis (o impacto potencial), com a paralisação imediata das linhas afetadas.

Importa referir que as alterações climáticas, ao intensificarem a exposição a estes eventos, podem desencadear uma cascata de efeitos. Estes impactos começam por ser diretos (como a interrupção do serviço e danos na infraestrutura), mas propagam-se rapidamente para consequências indiretas severas, como perturbações na mobilidade urbana bem como impactos económicos. A sensibilidade do sistema é pode ser agravada pela dependência da alimentação elétrica e pela exposição de infraestruturas de superfície a temperaturas extremas e ventos fortes.

Assim, a vulnerabilidade global é, portanto, atenuada ou amplificada pela sua capacidade de adaptação. A capacidade de adaptação define a aptidão do sistema para se ajustar aos

impactos potenciais resultantes da variabilidade e alterações climáticas, aproveitando oportunidades ou respondendo às consequências negativas. Este conceito segue o indicado pelo IPCC [1] que refere que a capacidade de adaptação consiste na conjugação de fatores que determinam a aptidão de um sistema para definir e implementar medidas de adaptação. No caso da Metro do Porto, estes fatores compreendem:

- **Capacidade técnica e tecnológica:** Existência de sistemas de drenagem resilientes, barreiras móveis contra inundações, bombas de água redundantes, materiais resistentes ao calor e sistemas de climatização adaptados a temperaturas extremas.
- **Recursos estruturais e financeiros:** Disponibilidade de investimento para obras de proteção e modernização
- **Capacidade institucional e de gestão:** Existência de planos de contingência robustos, protocolos de atuação claros para eventos extremos, formação regular dos funcionários para situações de crise e uma gestão ágil que permita uma resposta rápida.

Neste contexto, os sistemas mais vulneráveis são aqueles que apresentam elevada exposição a fenómenos extremos, grande sensibilidade estrutural e baixa capacidade de adaptação. No setor dos transportes, esta questão assume particular importância devido à rigidez da localização das infraestruturas e à sua longa vida útil, o que aumenta a dependência da estabilidade ambiental [5] e tem de determinar cuidados acrescidos na fase de planeamento da rede e de posterior projeto da mesma. No caso do SMLAMP, a vulnerabilidade traduz-se na maior suscetibilidade: a cheias urbanas (principalmente em estações subterrâneas), a escorrências intensas e movimentos de vertente, em corredores periféricos, a ondas de calor que comprometem equipamentos técnicos e à instabilidade de solos que afetam a operação e a segurança da rede.

A avaliação da vulnerabilidade conduz à análise do *risco climático*, entendido como a probabilidade de ocorrência de eventos adversos e as suas consequências negativas sobre sistemas naturais, sociais e infraestruturais [1]. O risco resulta da interação entre exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação. Para o sistema esta análise implica: identificar zonas críticas da rede, como estações subterrâneas e linhas de superfície mais próximas da linha de costa, avaliar equipamentos mais sensíveis, como catenárias e sistemas elétricos e reforçar a resiliência por via de medidas técnicas, operacionais e organizacionais.

Os impactos das alterações climáticas manifestam-se de forma direta e indireta. Entre os impactos diretos encontram-se danos físicos nas infraestruturas, incluindo a inundação de túneis e estações, a deformação da via devido ao calor extremo e os danos em catenárias provocados por ventos fortes. Já os impactos indiretos incluem interrupções do serviço motivadas por falhas energéticas, redução da procura devido a condições meteorológicas adversas ou aumento dos custos operacionais relacionados com manutenção e adaptação [17].

2.2.3 Mitigação das Alterações Climáticas

A mitigação das alterações climáticas corresponde ao conjunto de políticas e ações orientadas para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa ou aumentar a sua remoção da atmosfera, atuando diretamente sobre as causas do aquecimento global [1].

O objetivo principal desta abordagem é limitar a magnitude das alterações climáticas, reduzindo os riscos e os custos da adaptação futura. Ao contrário da adaptação, que responde às consequências já inevitáveis, a mitigação é preventiva e intervém sobre fatores estruturais que originam a crise climática, como a dependência de combustíveis fósseis e a desflorestação. Ambas são complementares e indispensáveis: a mitigação reduz os impactos a longo prazo, enquanto a adaptação aumenta a capacidade de resposta a curto e médio prazo.

A mitigação climática insere-se num quadro de compromissos internacionais que procuram coordenar a ação global. O Acordo de Paris [10], adotado em 2015 no âmbito das Nações Unidas, estabeleceu como meta limitar o aumento da temperatura média global bem abaixo dos 2 °C, em relação aos níveis pré-industriais, prosseguindo esforços adicionais para o limitar a 1,5 °C.

Em 2019 foi lançado o Pacto Ecológico Europeu [11], que definiu como objetivo tornar a União Europeia climaticamente neutra até 2050, promovendo uma transição justa e sustentável em setores-chave como energia, transportes, indústria e agricultura. Em 2021 surgiu o pacote legislativo “*Fit for 55*”, que fixa como meta a redução de, pelo menos, 55% das emissões líquidas de gases com efeito de estufa até 2030, relativamente a 1990. Neste contexto, o setor dos transportes assume um papel central, uma vez que representa cerca de 25% das emissões totais de dióxido de carbono na União Europeia, sendo a descarbonização da mobilidade urbana considerada um dos pilares essenciais da mitigação. Todo este enquadramento europeu, na medida do aplicável, foi incluído no enquadramento legal nacional, como já se mencionou em pontos anteriores.

Segundo a Agência Europeia do Ambiente [5], o transporte rodoviário corresponde a mais de 70% das emissões do setor na Europa. As estratégias de mitigação implicam a conjugação de várias linhas de ação complementares:

- a eletrificação dos transportes coletivos, nomeadamente através da expansão de redes de metro, elétrico e autocarros elétricos;
- a substituição progressiva dos combustíveis fósseis por energias renováveis como solar, eólica e hídrica, incluindo no abastecimento das redes de transporte elétrico (vertente da transição energética);
- a introdução de tecnologias que reduzam consumos, como iluminação LED em estações, ventilação eficiente e sistemas de travagem regenerativa nos veículos (na vertente da eficiência energética);
- a promoção da intermodalidade e dos modos suaves, que contribui para reduzir a dependência do automóvel individual, integrando a bicicleta, a trotinete e a caminhada no sistema de mobilidade urbana, através de políticas urbanas que desincentivam o uso do transporte individual motorizado, da criação de zonas de

emissões reduzidas, da aplicação de portagens urbanas e da adequada gestão das tarifas de estacionamento.

2.3 Metodologia ADAM

A metodologia ADAM (*Adaptation Assessment Framework*) constitui um quadro de referência conceptual e operativo, desenvolvido no âmbito do projeto europeu homónimo (“ADAM – *Adaptation and Mitigation Strategies: Supporting European Climate Policy*”), financiado pelo Sexto Programa-Quadro da Comissão Europeia, entre 2006 e 2009. O seu desígnio primordial consistiu em fornecer suporte analítico robusto para a formulação de políticas públicas europeias concertadas no domínio das alterações climáticas, com especial enfoque na articulação entre estratégias de mitigação e de adaptação [16].

No contexto nacional português, a metodologia ADAM foi objeto de adoção e adaptação estratégica, sendo integrada como pilar fundamental no projeto ClimAdaPT.Local [16]. Esta iniciativa, instrumental na operacionalização da Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas à escala municipal, capacitou dezenas de autarquias para o desenvolvimento dos respetivos Planos Municipais de Adaptação às Alterações Climáticas.

A seleção da metodologia ADAM, para esta dissertação e no que respeita ao setor dos transportes, deveu-se à sua natureza estruturada, à fundamentação em princípios sólidos de análise de risco e à aptidão para gerir a incerteza inerente às projeções climáticas, atributos essenciais para uma gestão territorial e setorial informada e proativa face à mudança climática.

2.3.1 Aplicação da metodologia ADAM na dissertação

A aplicação desta abordagem ao SMLAMP representou um caso paradigmático de transferência metodológica do âmbito municipal para o setorial, especificamente para o domínio crítico dos transportes públicos. O processo, ilustrado de forma esquemática na Figura 2, desdobrou-se numa sequência lógica e iterativa de seis etapas, descritas a seguir à figura.



Figura 2 - Esquema representativo da base metodológica ADAM [16]

Fase 0: Preparar Trabalhos

Na presente dissertação, o Passo 0 consistiu na definição dos objetivos e no enquadramento da problemática, conforme solicitado pela MP. A motivação partiu do interesse da empresa em avaliar as suas vulnerabilidades atuais face às alterações climáticas e no estudo desta temática, de forma estruturada, no âmbito de uma dissertação académica. Este primeiro passo revelou-se fundamental, pois permitiu alinhar as necessidades práticas da organização com os requisitos metodológicos do estudo.

Fase 1: Identificar vulnerabilidades atuais

A fase subsequente consistiu na delimitação clara e inequívoca do sistema em análise. Para o caso em estudo, isto implicou a caracterização exaustiva das infraestruturas (linhas, estações, túneis, subestações elétricas, sistemas de drenagem), operações (serviços de transporte bem como de procedimentos de manutenção) e limites geográficos da rede. Paralelamente, foi realizado o enquadramento do sistema no seu contexto ambiental, social e económico mais amplo.

Esta fase permitiu a criação de um histórico detalhado, onde se identifica os impactos climáticos históricos, as suas consequências observadas e medidas de resposta previamente adotadas, estabelecendo assim uma linha de base para a análise subsequente.

Fase 2: Avaliação das vulnerabilidades futuras e do Risco Climático

A segunda etapa teve como objetivo central a identificação, análise e priorização dos riscos climáticos atuais e futuros. A avaliação assentou em dois vetores de análise:

- *Vulnerabilidade Atual*: Predisposição do sistema a ser afetado por impactos climáticos já observados no sistema.
- *Vulnerabilidade Futura*: Resultante da confluência da exposição (aos cenários climáticos projetados), da sensibilidade (dos componentes do sistema a essas alterações) e da capacidade de adaptação existente.

A análise foi conduzida para três horizontes temporais distintos (2011-2040 e 2041-2070) com base em projeções climáticas regionais. Para a priorização objetiva dos riscos, foi realizada uma matriz de risco para cada horizonte temporal semelhante ao representado na Figura 3, na qual o nível de risco foi quantificado através do produto entre a frequência de ocorrência (ou probabilidade) e consequência do impacto, ambas aferidas numa escala ordinal de 1 (baixa) a 3 (alta). A matriz de risco serve também para visualizar de uma forma mais intuitiva os riscos climáticos prioritários das linhas do SMLAMP.

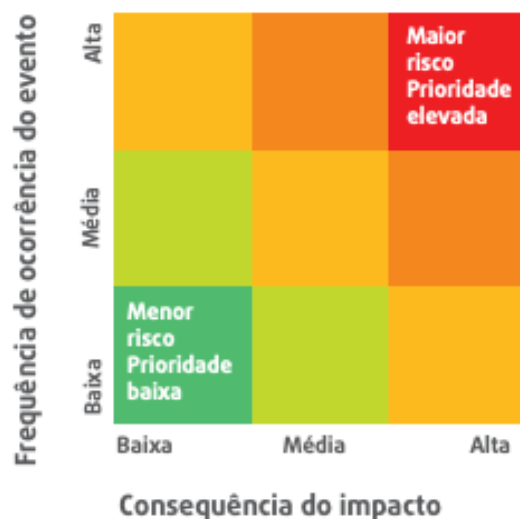


Figura 3 - Matriz aplicada na avaliação do risco [18]

Fase 3: Identificação de opções de Adaptação

Com os riscos prioritários identificados, a terceira fase dedicou-se à constituição de um portfólio de medidas de adaptação potencialmente aplicáveis. As opções foram categorizadas segundo a tipologia de aplicação:

- *Infraestruturas Cinzentas*: Intervenções físicas e de engenharia (e.g., barreiras contra inundações, refrigeração de equipamentos sensíveis ao calor, reforço de drenagens).

- *Infraestruturas Verdes*: Soluções baseadas nos ecossistemas (e.g., integração de vegetação para sombreamento e redução do efeito de ilha de calor urbano, jardins de chuva para gestão de águas pluviais).
- *Medidas Não Estruturais*: Políticas, processos e capacitação (e.g., revisão de planos de contingência, programas de formação e sensibilização, integração da adaptação no planeamento estratégico e na gestão de ativos).

Adicionalmente, as opções foram caracterizadas quanto ao seu objetivo estratégico: melhorar a capacidade adaptativa (com foco na governança e preparação institucional) ou reduzir vulnerabilidades específicas (destinadas à intervenção técnica direta).

Fase 4: Avaliação e priorização das opções

A quarta etapa visou a avaliação do leque de opções propostas, com vista à sua seleção e priorização para implementação futura. O objetivo central é hierarquizar as opções em função do seu potencial de contributo para a adaptação e da sua adequação ao contexto local, permitindo selecionar um portefólio de medidas mais robusto e coerente. A priorização, além de facilitar a tomada de decisão, garante que os recursos disponíveis são canalizados para as soluções com maior capacidade de gerar benefícios no curto, médio e longo prazo.

Fase 6: Implementação, monitorização e revisão

A fase final, de carácter dinâmico e contínuo, diz respeito à operacionalização prática das medidas selecionadas. Envolve a concretização de um plano de ação, o estabelecimento de um sistema de monitorização e avaliação de indicadores de desempenho e impacto, e a instituição de um processo formal de revisão periódica da estratégia.

Este ciclo é crucial para garantir que a estratégia de adaptação se mantém eficaz perante a evolução do conhecimento climático, as condições socioeconómicas e o próprio desempenho do sistema assegurando a sua resiliência de longo prazo.

Importa referir que a presente dissertação não aprofundou esta etapa, deixando-a como proposta de desenvolvimento futuro. A sua concretização representaria um passo importante para a implementação integral da metodologia ADAM, garantindo a transição do plano conceptual para a ação prática e promovendo uma adaptação mais eficaz e sustentada.

2.3.2 Projeções climáticas

As projeções climáticas constituem um instrumento essencial para compreender, antecipar e planear os potenciais impactos das alterações climáticas sobre infraestruturas críticas, como é o caso da rede do Metro do Porto. Estas projeções resultam da aplicação de modelos climáticos globais (GCM) e regionais (RCM) que simulam a evolução futura do sistema climático, considerando diferentes cenários de emissões de gases com efeito de estufa, alterações no uso do solo e políticas de mitigação.

No plano internacional, o Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas [1], através do seu Sexto Relatório de Avaliação, disponibiliza cenários contrastantes de evolução climática. Entre estes, destacam-se os RCP – *Representative Concentration Pathways*, que têm sido amplamente aplicados em estudos europeus e nacionais. No presente trabalho foram selecionados dois cenários:

- RCP 4.5, representando uma trajetória intermédia de mitigação, compatível com políticas climáticas ativas;
- RCP 8.5, um cenário pessimista de elevadas emissões, refletindo a continuidade de padrões intensivos de consumo energético.

Em Portugal, o Portal do Clima [19], promovido pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) e com a cooperação da Universidade de Lisboa, disponibiliza as projeções climáticas resultantes do projeto CORDEX, realizadas para o domínio europeu (EURO-CORDEX), permitindo análises detalhadas à escala regional e local. Para a presente investigação, foram considerados dois horizontes temporais de análise:

- 2011–2040, representando o futuro próximo e alterações já em curso;
- 2041–2070, refletindo tendências de médio prazo.

2.3.3 Seleção das variáveis climáticas de interesse

A escolha das variáveis climáticas foi orientada por dois critérios principais: *relevância* direta para a operação, manutenção e resiliência do sistema e a *capacidade de representação* através de indicadores quantificáveis disponibilizados pelas projeções climáticas. Foram selecionadas: a *temperatura*, a *precipitação* e o *vento*.

Temperatura

A temperatura é um fator de *stress* primordial, com impactos diretos na infraestrutura física, nos sistemas eletromecânicos e no bem-estar humano. As oscilações térmicas, particularmente os extremos de calor, podem provocar a dilatação de carris, o sobreaquecimento de componentes elétricos e a sobrecarga dos sistemas de ar condicionado, levando a avarias e interrupções do serviço. Paralelamente, o conforto térmico dos passageiros fica severamente comprometido durante eventos de calor extremo, especialmente em espaços confinados ou subterrâneos que acumulam calor. Para quantificar esta exposição, os indicadores analisados incluem:

- Temperatura média: fornece uma visão global da tendência climática
- Dias de dias quentes ($t_{max} \geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$), que servem como um limiar inicial para o potencial stresse térmico em equipamentos e passageiros e representam uma ameaça elevada de falha técnica e desconforto severo, exigindo medidas operacionais específicas.
- Dias de geada ($t_{min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) e indicadores compostos de gelo, que monitorizam o risco oposto, focando-se nos perigos operacionais associados ao gelo nos carris, nas plataformas e na formação de gelo em componentes sensíveis como as catenárias.

Precipitação

A precipitação, especialmente sob a forma de eventos intensos e concentrados, é um dos riscos mais imediatos e catastróficos, sendo um fator crítico para o risco de inundações. As estações subterrâneas, os poços de acesso e as salas técnicas localizadas em subsolos são extremamente vulneráveis à intrusão de água, o que pode paralisar operações, causar danos elétricos irreparáveis e representar sérios riscos de segurança. Em corredores suburbanos e de superfície, a precipitação intensa é o principal motor da instabilidade de taludes e da erosão dos leitos das vias. Para mapear este risco, os indicadores analisados são:

- A precipitação máxima acumulada em 5 dias consecutivos, uma medida do volume total de água que pode saturar os solos e sobrecarregar os sistemas de drenagem urbanos, aumentando o risco de cheias fluviais e alagamentos.
- A frequência de dias com precipitação ≥ 20 mm, identificando eventos de forte precipitação que podem testar a capacidade de drenagem local.
- A frequência de dias com precipitação ≥ 50 mm, representando eventos extremos de "chuvada forte" que, com alta probabilidade, levam a inundações rápidas e alagamentos severos.

Vento

O vento exerce impactos operacionais distintos, tanto em linhas de superfície como subterrâneas. Em superfície, ventos fortes representam uma ameaça direta à estabilidade das catenárias e à segurança da circulação, devido ao risco de projeção de detritos ou queda de árvores e ramos sobre a via. Em contrapartida, a ausência de vento, ou calmarias prolongadas, pode ter um impacto subtil, mas significativo na qualidade do ar em estações subterrâneas mal ventiladas, onde os poluentes se acumulam. Para capturar esta dualidade, os indicadores analisados focam-se em:

- O número de dias com vento moderado $\geq 5,5$ m/s, um limiar operacional relevante que pode afetar a estabilidade de veículos bem como a acumulação de folhagem ou pequenos objetos na via
- O número de dias com vento forte $\geq 10,8$ m/s que se aproxima de um limiar de vento forte, representando um risco elevado de danos em infraestruturas e de perturbações operacionais significativas, devido à queda de árvores ou ramos, maioritariamente nas linhas localizadas em corredores verdes.

Outras variáveis, como a humidade relativa (que amplifica o stresse térmico), a radiação solar (principal motor do aquecimento de superfícies) e a subida do nível médio do mar (uma ameaça existencial para infraestruturas costeiras) foram reconhecidas como profundamente relevantes. No entanto, devido a limitações de escala, resolução dos

modelos ou para manter um foco temático inicial mais direto, estes parâmetros não foram incluídos na presente análise. A sua incorporação em estudos complementares e de maior detalhe é, no entanto, considerada essencial para uma avaliação integral da vulnerabilidade da rede.

2.4 Ferramentas de análise espacial

Os dados climáticos foram inicialmente testados em ambiente QGIS, programa associado ao Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de uso académico e técnico. Contudo, a resolução espacial limitada dos *outputs* climáticos dificultava a produção de cartografia adequada às necessidades do estudo. Para contornar esta limitação, optou-se pela utilização do *Google Earth Pro*, que permitiu:

- maior clareza visual na representação dos resultados;
- intuitividade e acessibilidade para técnicos e gestores;
- possibilidade de georreferenciação direta do traçado da rede e sua sobreposição com as variáveis climáticas.

Esta opção permitiu identificar zonas críticas de exposição e gerar mapas temáticos claros, potenciando a comunicação dos resultados.

Não obstante, reconhece-se que o *Google Earth Pro* apresenta limitações quando comparado com programas de SIG mais avançados, sobretudo na realização de análises espaciais complexas (ex.: modelação hidrológica, análises multicritério, manipulação estatística). Por este motivo, a sua utilização deve ser entendida como ferramenta de visualização e comunicação, recomendando-se no futuro a integração com plataformas SIG robustas para análises mais detalhadas. Devido a um problema no servidor da base de dados de onde se extraia os mapas para incorporar as projeções climáticas nas linhas, apenas foi possível realizar para algumas variáveis em estudo, sugerindo-se futuramente a sua total integração.

2.5 Enquadramento nos objetivos do desenvolvimento sustentável

A estratégia de adaptação climática e modernização do Metro do Porto está intrinsecamente ligada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), servindo como um exemplo prático de como uma infraestrutura urbana pode contribuir diretamente para estas metas globais. A sua atuação concentra-se em quatro objetivos fundamentais, demonstrando um compromisso claro com um desenvolvimento equilibrado e resiliente.

O ODS 7, focado em Energia Acessível e Limpa, é concretizado através de um investimento em soluções fotovoltaicas, como a instalação de painéis solares, na redução proativa do consumo energético das suas infraestruturas e na modernização de equipamentos técnicos para ganhos de eficiência. O sucesso nestas áreas é medido pelos seguintes indicadores: percentagem de energia consumida proveniente de fontes

renováveis, redução anual do consumo energético específico (por passageiro-quilómetro) e o número de estações com autoconsumo energético.

No que diz respeito ao ODS 9, sobre Indústria, Inovação e Infraestruturas, a contribuição do Metro do Porto materializa-se na modernização contínua das suas estações e equipamentos, com um foco particular no reforço da sua resiliência operacional perante fenómenos climáticos extremos. Integração de soluções baseadas na natureza e em engenharia adaptativa, Promoção da intermodalidade e de sistemas inteligentes de transporte.

Este esforço é avaliado através de indicadores como o número de estações com sistemas de ventilação modernizados, a redução percentual do impacto de eventos climáticos nas operações e a medição do tempo médio de resposta e recuperação após incidentes, o que reflete uma maior robustez do sistema.

O papel do Metro é absolutamente central para o ODS 11, que visa Cidades e Comunidades Sustentáveis. Ao fornecer uma alternativa de transporte coletivo sustentável, reduzindo emissões poluentes e promovendo campanhas de sensibilização para a população, a empresa melhora diretamente a qualidade de vida urbana. O impacto desta contribuição é quantificado pelo número de passageiros transportados diariamente, pelas toneladas de CO₂ evitadas anualmente e pelos níveis de satisfação dos utentes em relação à segurança e ao conforto oferecidos.

Por fim, a Ação Climática, objetivo do ODS 13, é levada a cabo através da implementação de medidas de adaptação específicas, da redução contínua das emissões de gases com efeito de estufa e da capacitação de colaboradores e utilizadores sobre estas matérias. A eficácia destas ações é monitorizada através do número de medidas de adaptação implementadas, redução de emissões operacionais e o grau de preparação para eventos climáticos extremos.

Em conjunto, estas contribuições mostram que a adaptação climática do Metro do Porto se articula de forma clara e mensurável com as metas globais de sustentabilidade. A sua estratégia promove não apenas a resiliência da própria rede de transporte, mas também, de forma mais abrangente, a melhoria da qualidade de vida urbana, a inclusão social e a proteção ambiental.

3.

CASO DE ESTUDO: METRO DO PORTO

3.1 Enquadramento territorial

O sistema da Metro do Porto (MP) constitui um pilar fundamental da mobilidade sustentável na Área Metropolitana do Porto (AMP), uma região que, pela sua dimensão e densidade populacional, enfrenta desafios crescentes em matéria de mobilidade, ordenamento urbano e qualidade ambiental.

A AMP (Figura 4), sendo a segunda maior do país em termos demográficos e económicos, integra 17 municípios (Arouca, Espinho, Gondomar, Maia, Matosinhos, Oliveira de Azeméis, Paredes, Porto, Póvoa de Varzim, Santa Maria da Feira, Santo Tirso, São João da Madeira, Trofa, Vale de Cambra, Valongo, Vila do Conde e Vila Nova de Gaia) e caracteriza-se por fluxos de deslocação intensos, com uma forte dependência histórica do transporte rodoviário individual [20]. Esta realidade acarreta problemas de congestionamento, poluição atmosférica e emissões de gases com efeito de estufa (GEE), exercendo pressão sobre os objetivos nacionais e europeus de descarbonização e neutralidade carbónica.

Neste contexto, a rede da Metro do Porto (Figura 5) surge como um sistema estruturante que liga o centro da cidade do Porto a municípios periféricos como Vila Nova de Gaia, Matosinhos, Maia, Gondomar, Vila do Conde e Póvoa de Varzim, reforçando a coesão territorial e social da região. A rede metroviária assume-se como uma alternativa credível e atrativa ao transporte individual, contribuindo diretamente para a mitigação das alterações climáticas e para a melhoria da qualidade de vida urbana.

A infraestrutura da Metro do Porto integra segmentos subterrâneos, de superfície e em viaduto, adaptados à morfologia urbana e suburbana. A operação assenta exclusivamente em veículos elétricos, o que constitui uma vantagem ambiental significativa, permitindo o abastecimento progressivo a partir de fontes renováveis. Deste modo, a MP é mais do que um operador de transporte: é um instrumento estratégico de políticas públicas para a sustentabilidade e para a resiliência climática, assegurando a continuidade do serviço perante fenómenos meteorológicos extremos e consolidando a mobilidade coletiva como pilar do desenvolvimento sustentável da região [21].

- a Linha Rosa, que ligará São Bento à Casa da Música através de quatro estações subterrâneas.

A Estação da Trindade, no centro do Porto, é o principal nó de articulação da rede, permitindo o cruzamento de grande parte das linhas existentes e assegurando transferências rápidas entre serviços [21].

Na Figura 6, apresenta-se o mapa esquemático da rede geral do Metro do Porto (atualmente em operação), que permite uma visualização clara da distribuição geográfica das linhas, estações e interfaces, facilitando a interpretação da sua abrangência territorial e das conexões permitidas.

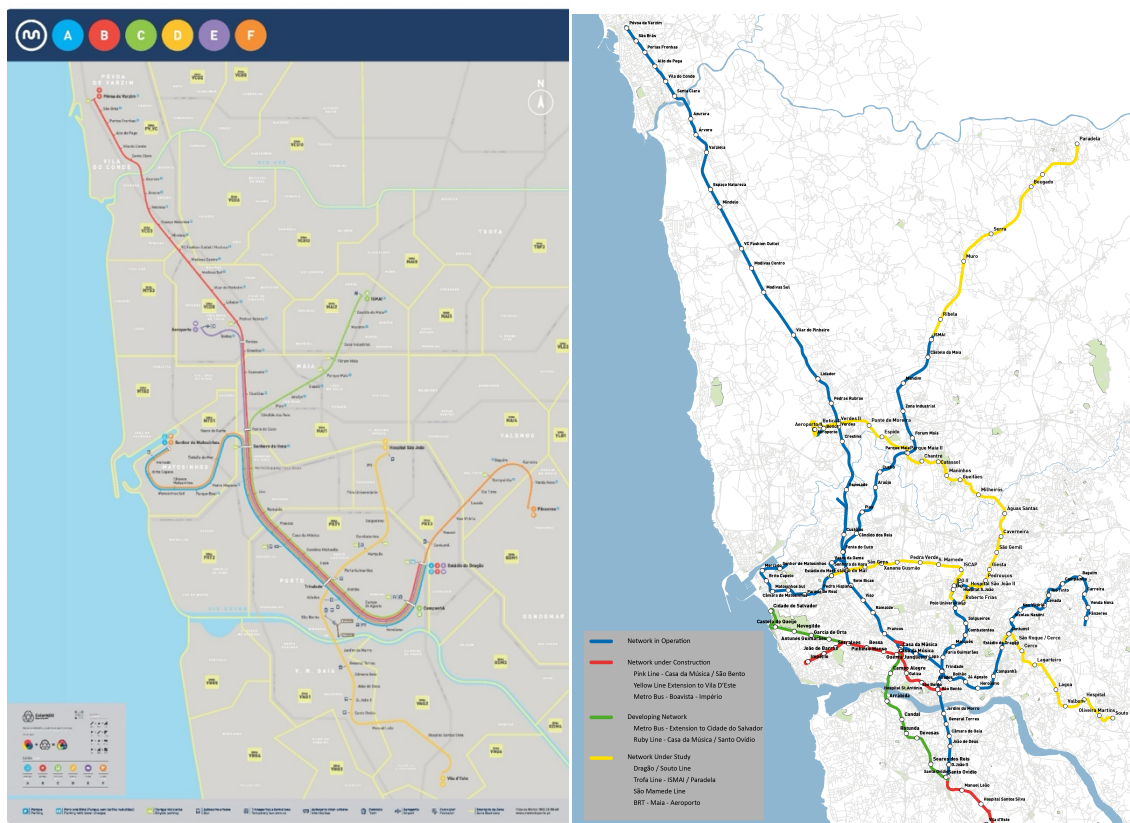


Figura 6 - Mapa representativo da rede de metro em operação (à esquerda) e incluindo os troços atualmente em construção (à direita) [22]

Para efeitos operacionais e de segurança, o sistema é segmentado consoante o contexto urbano e as características específicas de cada troço, permitindo uma gestão técnica, operacional e de segurança mais adequada às exigências de cada infraestrutura, incluindo:

- O *sistema subterrâneo* localiza-se entre São Bento e o Pólo Universitário (linha D) e entre Campanhã e Trindade (linha C);
- O *sistema urbano em via segregada* abrange os troços Trindade – Senhora da Hora e Estádio do Dragão – Campanhã;

- O *sistema urbano de superfície* inclui troços como D. João II à Ponte Luís I, Pólo Universitário ao Hospital de São João, Senhora da Hora ao Senhor de Matosinhos e Verdes ao Aeroporto.
- O *sistema suburbano de superfície* estende-se até à Póvoa de Varzim e ao ISMAI.

No que respeita ao acabamento da via, em vários troços predominam coberturas vegetais, sobretudo relva, que promovem uma melhor integração ambiental e paisagística. As áreas laterais ao canal do metro, onde existem infraestruturas enterradas, também são revestidas com relva ou outras coberturas vegetais. Estas zonas verdes são equipadas com sistemas automáticos de rega, com contadores de água dedicados, cuja manutenção e custos operacionais são assegurados pela entidade gestora do Metro do Porto. Os limites do canal são definidos por lancis de granito, que fazem parte integrante da infraestrutura.

A via ajardinada, poderá fazer sinergia com as medidas de adaptação posteriormente propostas no capítulo 5.

No caso do SMLAMP, aproximadamente 10 km de via é via relvada, considera-se que esta solução apresenta um conjunto de vantagens e desvantagens que importa destacar. Do ponto de vista positivo, a via relvada contribui significativamente para a integração paisagística e estética do traçado, reforçando a continuidade verde no espaço urbano e transmitindo uma imagem mais sustentável e apelativa. Acresce ainda o facto de proporcionar benefícios ambientais relevantes, nomeadamente a redução do efeito de ilha de calor, a melhoria da qualidade do ar através da retenção de poeiras e partículas, e a maior capacidade de infiltração das águas pluviais, reduzindo o escoamento superficial. Também ao nível do conforto acústico se registam ganhos, uma vez que a cobertura vegetal contribui para atenuar o ruído gerado pela circulação dos veículos.

Contudo, a solução não está isenta de desafios. A manutenção da via relvada é mais exigente do que em soluções convencionais, implicando rega, cortes frequentes, fertilização e substituição periódica de tapetes relvados. O consumo de água, em particular, constitui um fator crítico em contextos de escassez hídrica. Do ponto de vista técnico, a durabilidade da relva depende fortemente da drenagem e das condições de insolação, sendo mais vulnerável em zonas sombrias ou de maior intensidade de uso. Além disso, qualquer intervenção na via torna-se mais complexa, já que obriga à reposição da camada vegetal, o que pode aumentar custos e tempos de indisponibilidade.

Neste sentido, considero que a via relvada representa um contributo distintivo e positivo para a valorização ambiental e urbana do SMLAMP. Porém, o sucesso desta solução depende da existência de um compromisso sólido com a manutenção e da ponderação dos custos e recursos envolvidos, de forma a assegurar que os benefícios se mantenham efetivos ao longo do tempo.

As estações do Metro do Porto apresentam tipologias distintas, consoante a sua localização e estrutura, identificando-se:

- 13 estações subterrâneas, distribuídas pela Linha D (Amarela) – São Bento, Aliados, Trindade Inferior, Faria Guimarães, Marquês, Combatentes, Salgueiros e Pólo Universitário – e pelas linhas A, B, C e E (troço comum) – Heroísmo, 24

de Agosto e Bolhão. Estas estações localizam-se abaixo da superfície e têm acessos verticais por escadas, elevadores, saídas de emergência, grelhas de ventilação e, em alguns casos, claraboias para entrada de luz natural. Estão geralmente organizadas em vários níveis, que incluem o nível da superfície, o cais de embarque/desembarque e níveis técnicos intermédios;

- estações parcialmente enterradas ou integradas em edifícios urbanos, como é o caso do Estádio do Dragão, Campanhã, Trindade (Superfície), Casa da Música e Carolina Michaelis [21].
- estações de superfície, regra geral, mais simples em termos de infraestrutura, em cujos cais, existem abrigos que oferecem proteção aos passageiros, equipamentos de bilhética automática, bancos e painéis de informação. Os abrigos são classificados em urbanos ou rurais, dependendo do contexto envolvente, adequando-se às características específicas de cada localidade.

A exposição das estações a eventos climáticos varia significativamente dependendo da sua localização, estrutura e nível de proteção. As estações periféricas, geralmente situadas à superfície e localizadas em áreas suburbanas ou costeiras, apresentam maior vulnerabilidade a variações térmicas, precipitações intensas e ventos fortes.

Por outro lado, as estações localizadas no centro da cidade e subterrâneas beneficiam de uma proteção natural contra os elementos, apresentando menor exposição a ventos, chuvas e variações térmicas extremas. No entanto, mesmo estas estações não estão totalmente isentas de riscos, especialmente no que se refere a eventos de calor intenso e de precipitação.

Estações subterrâneas

As estações subterrâneas enfrentam riscos específicos, nomeadamente o perigo de inundações durante precipitações intensas. Como estão localizadas abaixo do nível do solo, a água pode infiltrar-se facilmente através dos acessos, como escadas, elevadores e portas, além de possíveis falhas nos sistemas de drenagem e bombagem. Estes fatores podem causar interrupções no serviço, danos nos equipamentos elétricos e riscos para a segurança dos utilizadores.

Como referido, outro desafio importante para estas estações é a acumulação de calor durante ondas de calor prolongadas, devido à ventilação natural limitada. Isso exige sistemas robustos de ar condicionado e ventilação forçada para garantir o conforto térmico dos passageiros e a proteção dos equipamentos eletrônicos. Em contrapartida, as estações subterrâneas contam com a vantagem de estarem naturalmente protegidas contra os efeitos de ventos fortes e acumulação de neve, reduzindo assim os riscos associados a esses fenômenos climáticos extremos.

Estações à superfície

As estações à superfície enfrentam desafios diferentes. A exposição direta a ventos fortes pode causar danos estruturais em coberturas, suportes de catenárias e outros equipamentos expostos, além de representar um risco para a segurança dos passageiros.

Também o acúmulo de neve e gelo sobre os carris pode levar a interrupções no serviço, demandando operações frequentes de limpeza e aumentando o risco de acidentes. Durante ondas de calor, a exposição direta ao sol pode elevar significativamente a temperatura nas plataformas e equipamentos, prejudicando o seu funcionamento e o conforto dos utilizadores. No entanto, a ventilação natural nestas estações ajuda a dissipar o calor com mais facilidade do que nas estações subterrâneas. Outro fator de risco é o alagamento em áreas de baixa elevação, que pode ocorrer em períodos de chuvas intensas caso o sistema de drenagem superficial não seja adequado. Por outro lado, as estações à superfície apresentam vantagens importantes, como a ventilação natural, que reduz a necessidade de climatização artificial e, consequentemente, os custos operacionais durante ondas de calor. Além disso, com um projeto eficiente, as estações superficiais podem contar com sistemas de drenagem simples e eficazes, facilitando o escoamento da água da chuva e minimizando os riscos de inundação.

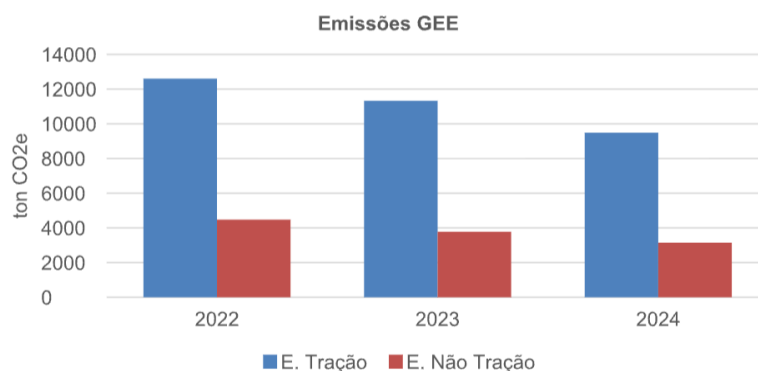
Infraestrutura ferroviária

A infraestrutura integra segmentos subterrâneos, de superfície e em viaduto, adaptados à morfologia urbana e suburbana. A operação assenta exclusivamente em veículos elétricos, o que constitui uma vantagem em termos ambientais, dado permitir o abastecimento progressivo a partir de fontes renováveis. A MP é, assim, mais do que um operador de transporte: é também um instrumento estratégico de políticas públicas para a sustentabilidade e para a resiliência climática, assegurando a continuidade do serviço perante fenómenos meteorológicos extremos e consolidando a mobilidade coletiva como pilar do desenvolvimento sustentável da região.

3.3 Contributo para a mitigação das Alterações Climáticas

A simples existência do SMLAMP contribui significativamente para a mitigação das alterações climáticas. Ao oferecer uma alternativa eficiente e sustentável ao transporte individual, o SMLAMP ajuda a reduzir as emissões de GEE provenientes do uso de veículos particulares. Isso resulta na diminuição da poluição atmosférica e na melhoria da qualidade do ar nas áreas urbanas, promovendo assim uma mobilidade urbana mais sustentável.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade da empresa referente ao período de 2022 a 2024 [23], as emissões de GEE associadas ao serviço de transporte do SMLAMP são exclusivamente indiretas, originadas pelo consumo de energia elétrica nas operações e manutenção do sistema. Nos últimos três anos, tem-se verificado uma tendência de redução destas emissões, principalmente devido à evolução do fator de emissão aplicado que retrata a evolução do *mix* energético nacional com maior incorporação de fontes de energia renovável, como ilustrado pela Figura 7. Este fator é calculado com base nos dados do Inventário Nacional de Emissões (INERPA), da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) e dos Balanços Energéticos da Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG).

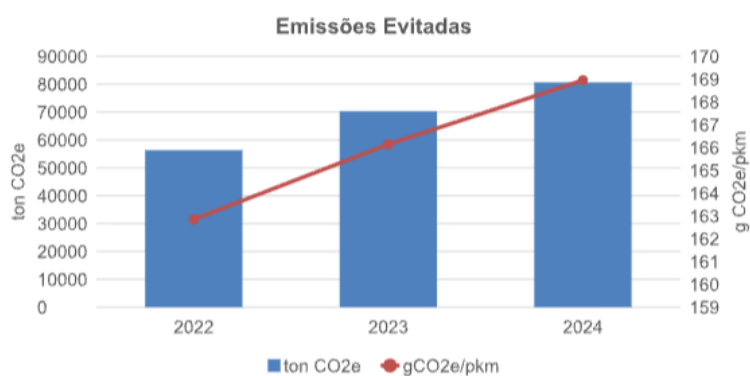


Emissões de GEE	Unidades	2022	2023	2024	Δ (23/24)
Energia Tração	ton CO ₂ e	12604	11328	9488	-16,2%
Energia Não Tração	ton CO ₂ e	4475	3777	3147	-16,7%

Figura 7 - Emissões indiretas de GEE referentes ao ano de 2022,2023 e 2024 [23]

Considerando o perfil ambientalmente sustentável do metro ligeiro, é fundamental calcular as emissões de GEE evitadas por este meio de transporte em comparação com modos mais poluentes. Essa quantificação envolve a análise da diferença entre as emissões associadas ao consumo de eletricidade do sistema e as emissões evitadas localmente devido à transferência modal, ou seja, a substituição do transporte individual e coletivo (não eletrificado) pelo metro.

As emissões evitadas, expressas em toneladas de CO₂ equivalente, têm apresentado um crescimento consistente ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 8.



	Unidades	2022	2023	2024	Δ (23/24)
Emissões Evitadas	ton CO ₂ e	56 332	70 291	80 636	14,7%
	gCO ₂ e/pkm	163	166	169	1,7%

Figura 8 - Emissões evitadas pela utilização do metro, referentes ao ano de 2022,2023 e 2024 [23]

A energia é o recurso mais relevante para o funcionamento do SMLAMP, dada a sua total eletrificação. No que diz respeito ao consumo energético nas atividades de operação e manutenção, os valores mantiveram-se relativamente estáveis ao longo dos anos.

Em 2023, verificou-se um ligeiro aumento, explicado pelo crescimento da procura e pelo consequente maior esforço energético dos veículos. Em 2024, o consumo estabilizou em níveis semelhantes aos do ano anterior.

Por outro lado, no Parque de Material e Oficina (PMO), observou-se uma redução gradual do consumo energético nos últimos anos, que se tornou mais acentuada em 2024, refletindo melhorias significativas na eficiência energética das instalações, como apresentado na Figura 9.

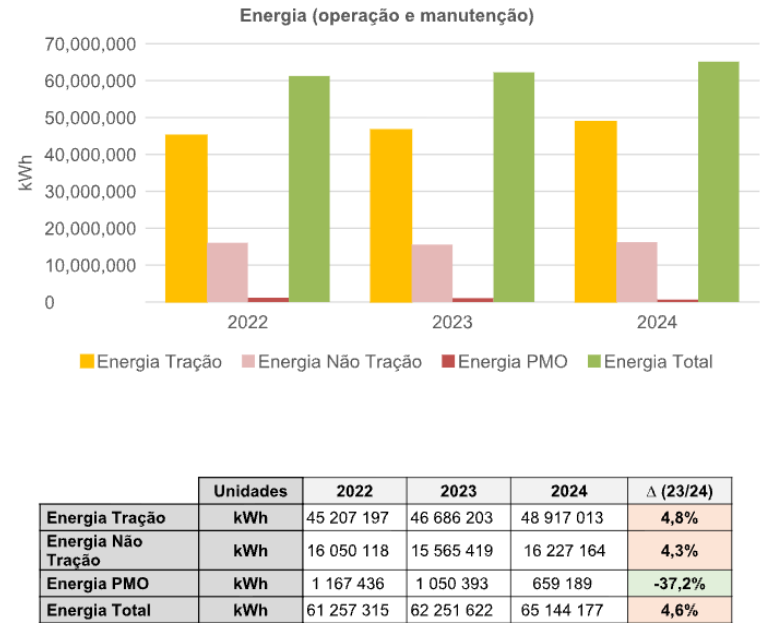


Figura 9 - Consumos de energia referentes ao ano de 2022, 2023 e 2024 [23]

Em 2024, o Metro do Porto registou uma melhoria significativa na eficiência energética, evidenciada pela redução do consumo de energia por passageiro-quilómetro e por veículo-quilómetro. Esta evolução traduz um transporte de passageiros mais eficiente do ponto de vista energético.

No que concerne ao consumo de água, os últimos três anos evidenciam uma tendência decrescente, tanto nas estações e áreas circundantes como no parque de manutenção e oficinas. Em 2024, essa redução é particularmente notória, atingindo os 32,4% por comparação com o ano de 2023, e resulta da implementação de medidas que incentivaram o uso mais racional da água, proveniente tanto de captações próprias como da rede pública, conforme é apresentado na Figura 10.

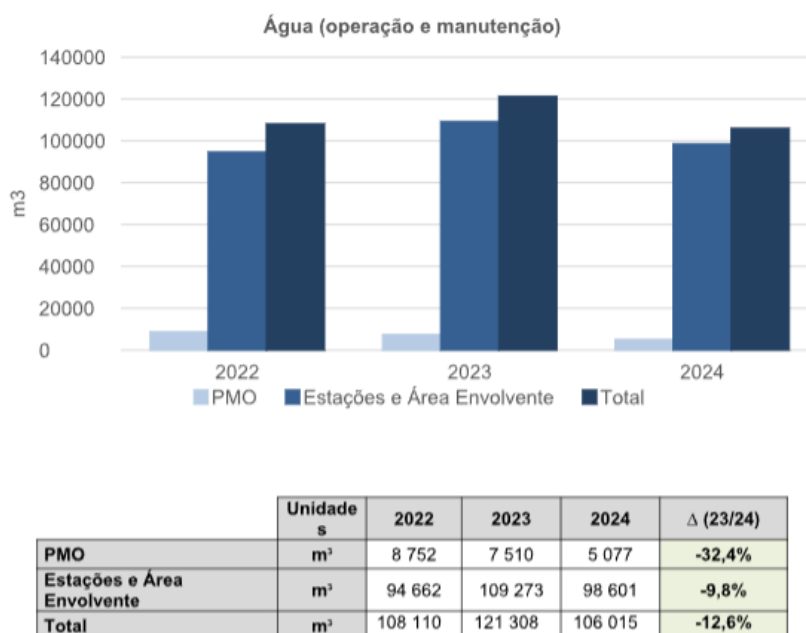


Figura 10 - Consumos de água referentes aos anos de 2022,2023 e 2024 [23]

A gestão eficiente dos consumos de energia, água e resíduos na Metro do Porto desempenha um papel fundamental na mitigação das alterações climáticas. A redução do consumo energético, associada à adoção de tecnologias mais eficientes e ao uso crescente de fontes renováveis, permite diminuir significativamente as emissões de gases com efeito de estufa. Paralelamente, a utilização racional da água, contribui para reduzir os impactos indiretos relacionados ao seu tratamento e distribuição. Por sua vez, a diminuição da produção de resíduos e o aumento das taxas de reciclagem evitam emissões associadas à deposição em aterros sanitários. Estas ações integradas promovem uma operação mais sustentável e reforçam a transição para uma mobilidade urbana de baixo carbono.

3.4 Impactos e vulnerabilidades da rede do Metro

As alterações climáticas têm evidenciado vulnerabilidades concretas do sistema de transporte do Metro do Porto, confirmando a necessidade de uma abordagem integrada de gestão do risco climático. A operação diária da rede está sujeita a múltiplos fatores ambientais, entre os quais se destacam a precipitação intensa, os ventos fortes, as variações térmicas extremas e, embora menos frequentes, episódios de granizo. Estes fenómenos afetam a continuidade operacional, a segurança dos passageiros e a sustentabilidade financeira do sistema, exigindo estratégias de mitigação e adaptação adequadas.

A precipitação intensa representa uma das ameaças mais críticas, sobretudo em estações subterrâneas e localizadas em cotas baixas. A Estação de Campo 24 de Agosto constitui um caso paradigmático, já que tem registado episódios recorrentes de inundação em

eventos de chuva extrema. A localização geográfica da estação, associada a limitações do sistema de drenagem urbana e à topografia envolvente, favorece a acumulação de água no exterior e a subsequente infiltração para o interior. As consequências operacionais são severas, incluindo interrupções prolongadas do serviço, danos em equipamentos elétricos e mecânicos, falhas em elevadores e degradação estrutural acelerada. Este tipo de impacto, classificado como indireto, decorre de fatores ambientais externos ao sistema metroviário, mas compromete de forma direta a sua fiabilidade e segurança.

Os ventos fortes constituem igualmente uma vulnerabilidade significativa, em especial nos troços de superfície e áreas costeiras da rede. Rajadas intensas podem provocar a queda de árvores ou a projeção de objetos para a via-férrea, originando interrupções de circulação e danos em cabos de catenária. Para além das interrupções imediatas, estes fenómenos aumentam os custos de manutenção e colocam em risco a segurança de passageiros e trabalhadores. A prevenção depende de uma gestão regular da vegetação e de sistemas de monitorização meteorológica que permitam antecipar episódios de risco.

As variações extremas de temperatura, tanto baixas como elevadas, também se revelam problemáticas. Ondas de calor prolongadas causam dilatação dos carris, sobreaquecimento de sistemas eletrónicos e falhas nos equipamentos de climatização, agravando o desconforto térmico nas estações subterrâneas. Por outro lado, temperaturas muito baixas podem provocar a formação de gelo nas vias, comprometer sistemas de sinalização e reduzir a fiabilidade operacional, ainda que este risco seja menos frequente na Área Metropolitana do Porto. Em ambos os casos, a vulnerabilidade decorre da ausência de infraestruturas projetadas para lidar com amplitudes térmicas cada vez mais pronunciadas.

Eventos de granizo, apesar de menos comuns, representam riscos pontuais, sobretudo para elementos expostos como coberturas de estações, janelas ou painéis de vidro. Embora a vulnerabilidade a este fenómeno seja relativamente baixa na região, episódios isolados podem gerar custos de reparação elevados e interrupções temporárias da operação.

A análise destes fenómenos foi suportada por registos operacionais, relatórios de manutenção e dados fornecidos pela entidade gestora do Metro do Porto, complementados por fontes externas, como relatórios meteorológicos e notícias de eventos extremos. Esta triangulação de fontes permitiu identificar padrões de recorrência, gravidade e impacto, evidenciando que os riscos climáticos já se manifestam de forma tangível na rede.

Assim, a caracterização das vulnerabilidades climáticas do Metro do Porto reforça a necessidade de desenvolver soluções de drenagem adaptadas, protocolos de resposta a fenómenos extremos e estratégias de modernização tecnológica. A Estação de Campo 24 de Agosto, pelas suas características, surge como um caso prioritário para intervenções preventivas, funcionando como exemplo da urgência em alinhar a infraestrutura metroviária com as exigências das alterações climáticas.

3.5 Casos críticos de vulnerabilidade no metro do Porto

A Estação de Campo 24 de Agosto constitui um dos pontos mais críticos do sistema da Área Metropolitana do Porto no que respeita à vulnerabilidade climática. Ao longo dos anos, esta estação tem sido repetidamente afetada por inundações resultantes de precipitação intensa (Figura 11), com impactos diretos na operação e na segurança dos utilizadores.

A sua localização geográfica, em cota baixa e numa zona de elevada impermeabilização urbana, combinada com limitações do sistema de drenagem pluvial, cria condições propícias à acumulação de águas pluviais. Durante eventos de chuva extrema, a água acumula-se nas imediações, ultrapassando a capacidade de escoamento disponível e infiltrando-se nas áreas subterrâneas da estação.

Impactos identificados:

- *Diretos*: interrupção temporária da circulação, inacessibilidade a plataformas e acessos, falhas em sistemas elétricos e mecânicos avarias em elevadores e a degradação acelerada da infraestrutura.
- *Indiretos*: perda de confiança dos passageiros, aumento de custos de manutenção e reparação, impactos financeiros decorrentes da suspensão do serviço, bem como desgaste da imagem institucional.
- *Operacionais/estruturais*: sobrecarga dos sistemas de drenagem urbana, necessidade de manutenção emergencial frequente e a pressão sobre protocolos de segurança e logística do serviço.

O carácter recorrente destas ocorrências evidencia a necessidade de soluções de drenagem adaptadas à nova realidade climática, seja pelo reforço das infraestruturas existentes, seja por meio de soluções baseadas na natureza, como bacias de retenção ou pavimentos permeáveis na envolvente. A Estação de Campo 24 de Agosto simboliza a urgência de alinhar o dimensionamento das infraestruturas com projeções de aumento da frequência e intensidade de precipitação extrema.



Figura 11 - Exterior da estação Campo 24 de agosto inundado, que resultou na inundação da estação (fonte interna)

Outro fator crítico é a queda de árvores nas linhas de superfície, resultante da combinação de ventos fortes e precipitação intensa, sobretudo em zonas arborizadas e corredores suburbanos. Estes episódios, frequentemente associados a tempestades de inverno, podem causar obstruções nas vias e danos em sistemas elétricos e de sinalização, provocando interrupções súbitas do serviço.

Impactos identificados:

- *Diretos*: obstrução da via, danos em cabos de catenária, sistemas elétricos e de sinalização e a interrupção parcial ou total do serviço.
- *Indiretos*: aumento de custos de manutenção, riscos para passageiros e trabalhadores, atrasos e constrangimentos operacionais e impacto na confiabilidade do sistema.
- *Operacionais/estruturais*: fragilização das raízes das árvores devido à saturação do solo, bloqueio temporário do sistema de drenagem e a necessidade de inspeções e intervenções frequentes.

Um episódio recente, em janeiro de 2025, ilustra este risco: a queda de uma árvore sobre uma linha bloqueou temporariamente a circulação (Figura 12), evidenciando a fragilidade das linhas de superfície e reforçando a necessidade de programas regulares de gestão da vegetação e de monitorização meteorológica contínua.



29-01-2025 09:12 | Porto
Porto Canal

Facebook Os Monhacas

Figura 12- Queda de árvores na via em janeiro de 2025 [24]

As variações térmicas extremas acrescentam outro nível de vulnerabilidade. No inverno, o gelo e a geada afetam carris, sistemas de travagem e sinalização, enquanto no verão o calor prolongado provoca dilatação de trilhos e fios de catenária, resultando em deformações e falhas na alimentação elétrica. Um exemplo crítico ocorreu em julho de 2024, quando a dilatação da catenária interrompeu a circulação entre o Hospital de São João e o Polo Universitário.

Impactos identificados:

- *Diretos*: deformações de carris e catenária, falhas elétricas e mecânicas e interrupção da circulação.
- *Indiretos*: redução da eficiência operacional, aumento de custos de manutenção e o desconforto térmico nas estações.
- *Operacionais/estruturais*: necessidade de ajustes frequentes da infraestrutura e a pressão sobre protocolos de segurança e manutenção preventiva.

A vulnerabilidade climática também se reflete na acessibilidade dos passageiros, particularmente em elevadores, essenciais para pessoas com mobilidade reduzida. Entre 2021 e 2024, foram registadas 189 falhas em 13 estações, com destaque para a Estação Aliados (36 ocorrências). As falhas resultam da exposição solar intensa, ventilação insuficiente, ausência de proteção adequada e antiguidade dos equipamentos. Na Figura 13 é possível observar-se um dos elevadores da estação dos Aliados, sob exposição direta do sol.



Figura 13 - Um dos elevadores da estação dos Aliados (fonte da autora)

Impactos identificados:

- *Diretos*: falha de elevadores, impossibilitando o acesso a plataformas.
- *Indiretos*: congestionamentos, perda de autonomia de passageiros vulneráveis, bem como a diminuição da confiança no sistema.
- *Operacionais/estruturais*: necessidade de manutenção frequente e readequação de equipamentos e o impacto sobre a capacidade operacional das estações.

Em conjunto, estes exemplos demonstram que os impactos das alterações climáticas no Metro do Porto são múltiplos e interligados, atingindo tanto a estrutura física quanto a operação diária e a experiência dos passageiros. A vulnerabilidade da rede resulta da exposição a fenómenos extremos e da rigidez estrutural de infraestruturas concebidas para condições climáticas que já não correspondem à realidade atual. Torna-se, assim, essencial investir em medidas preventivas e adaptativas que mitiguem os riscos identificados, reforcem a resiliência da rede e assegurem a continuidade de um serviço seguro e sustentável perante cenários climáticos cada vez mais adversos.

3.6 Soluções implementadas

A Metro do Porto tem vindo a implementar soluções específicas para mitigar os impactos das alterações climáticas, direcionadas para as vulnerabilidades mais críticas identificadas na rede e já explanadas no ponto anterior.

Como mencionado, um dos casos mais relevantes é a Estação de Campo 24 de Agosto, na qual foram instaladas barreiras de proteção contra inundações nos acessos subterrâneos (Figura 14). Estas barreiras funcionam como uma linha de defesa física que impede a intrusão de água durante episódios de precipitação intensa. Além das barreiras, foi realizado o desvio do coletor pela Rua D. João IV, contribuindo para melhorar o escoamento das águas pluviais na praça envolvente.

Impactos mitigados:

- *Diretos*: prevenção de inundações nas áreas subterrâneas, manutenção da operação das plataformas, elevadores e sistemas elétricos.
- *Indiretos*: redução da perda de confiança dos passageiros, diminuição de custos emergenciais de reparação e manutenção.
- *Operacionais/estruturais*: aumento da resiliência do sistema de drenagem, redução de interrupções na circulação e maior segurança estrutural.



Figura 14 - Barreiras implementadas na estação campo 24 de Agosto (imagens facultadas pela MP, 2025)

Na zona de Modivas Sul, foram implementadas intervenções estruturais complementares, que incluíram a modificação do sistema de drenagem, a instalação de barreiras naturais e artificiais e a estabilização do leito. Estas medidas regularizaram os fluxos de água, eliminaram pontos críticos de estagnação e permitiram o acesso agrícola sobre o canal.

Impactos mitigados:

- *Diretos*: prevenção de inundações sazonais e interrupções na via
- *Indiretos*: menor risco de danos a equipamentos ferroviários e redução de impactos na operação do serviço.
- *Operacionais/estruturais*: aumento da eficiência do sistema de drenagem e melhoria da resiliência operacional da via.



Figura 15 - Requalificação da rede de drenagem: estação Modivas Sul (imagens facultadas pela MP, 2025)

No domínio da temperatura, os elevadores têm sido um dos equipamentos mais vulneráveis ao calor extremo. Na Estação Manuel Leão, foi testada uma solução de ampliação da cobertura do elevador, aumentando a altura de 253 mm para 625 mm e o comprimento de 1.395 mm para 2.488 mm. Esta intervenção visa reduzir o sobreaquecimento dos motores, melhorar a ventilação do sistema e aumentar a durabilidade do equipamento. Durante o verão de 2024, não se registaram falhas, evidenciando eficácia preliminar.

Impactos mitigados:

- *Diretos*: redução de falhas do elevador e manutenção da acessibilidade a passageiros com mobilidade reduzida.
- *Indiretos*: aumento da confiança dos utilizadores, diminuição de congestionamentos e maior qualidade do serviço.
- *Operacionais/estruturais*: menor desgaste dos equipamentos e maior fiabilidade operacional.

Quanto à catenária, afetada pela dilatação excessiva do fio de contacto devido ao calor intenso, foram realizadas diversas intervenções de manutenção: ajuste da geometria, tensionamento dos cabos condutores, instalação de espaçadores e implementação de consola de via dupla com amarrações. Esta medida distribui uniformemente as tensões ao longo da infraestrutura e reduz a suscetibilidade a variações térmicas. Como prevenção adicional, a velocidade máxima no troço afetado foi temporariamente reduzida de 25

km/h para 15 km/h durante períodos de calor intenso, diminuindo o esforço mecânico e minimizando riscos de deformação.

Impactos mitigados:

- *Diretos*: redução de interrupções e falhas na alimentação elétrica da catenária.
- *Indiretos*: manutenção da confiança dos passageiros e menor impacto na eficiência do serviço.
- *Operacionais/estruturais*: reforço estrutural da catenária e mitigação da vulnerabilidade a variações térmicas extremas.

No seu conjunto, estas soluções revelam que o Metro do Porto adota uma abordagem adaptativa e prática frente aos desafios climáticos. Embora muitas intervenções tenham carácter reativo, os resultados obtidos demonstram ganhos claros em resiliência, segurança e continuidade operacional. A consolidação destas medidas, integrada numa estratégia global de adaptação, permitirá reduzir custos operacionais, aumentar a confiança dos utilizadores e fortalecer a robustez do sistema perante cenários climáticos cada vez mais adversos.

4. ANÁLISE DO SISTEMA

4.1 Contextualização climática

A contextualização climática é uma etapa fundamental para a avaliação de vulnerabilidades em sistemas de transporte urbano, permitindo compreender tendências passadas e projetar riscos futuros. Para a MP, esta análise incide sobre os concelhos abrangidos pela sua rede, bem como sobre a área de expansão planeada: a Trofa. Foram analisadas as três variáveis climáticas com impacto direto na operação e resiliência do sistema: *temperatura, precipitação e vento*.

4.2 Evolução observada das principais variáveis climáticas: 2001–2024

A análise dos dados climáticos observados entre 2001 (início das obras do metro do Porto) e 2024 revela alterações significativas no regime climático da AMP, consistentes com as tendências globais e nacionais. Os dados analisados para estas variáveis são de uma estação meteorológica localizada na cidade do Porto, mais concretamente no aeroporto Francisco Sá Carneiro [25]. Por falta de dados para o desenvolvimento desta análise, apenas foram comparadas as variáveis da temperatura e do vento.

Temperatura:

A comparação dos dados térmicos entre 2001, indicados pela Figura 16, ano de início das obras do Metro do Porto, e 2024, indicados pela Figura 17, último ano completo antes da elaboração desta dissertação, revela uma transformação significativa no regime climático da Área Metropolitana do Porto. Observa-se um nítido aquecimento global, caracterizado por invernos substancialmente mais amenos, com reduzida ocorrência de temperaturas próximas de 0°C, e verões marcadamente mais quentes, onde as máximas frequentemente se aproximam ou excedem os 35°C, alargando a duração do período estival. Esta alteração térmica, acompanhada por uma maior variabilidade e frequência de extremos, impõe pressões operacionais crescentes sobre o sistema de metro, incluindo maior stress na infraestrutura devido à dilatação térmica, sobreaquecimento de equipamentos eletrónicos, necessidades ampliadas de climatização e aumento do consumo energético. A trajetória observada corrobora as projeções climáticas mais preocupantes, sublinhando a urgência

de integrar estratégias robustas de adaptação no planeamento e gestão da rede para garantir a sua resiliência face a um clima em acelerada mudança.

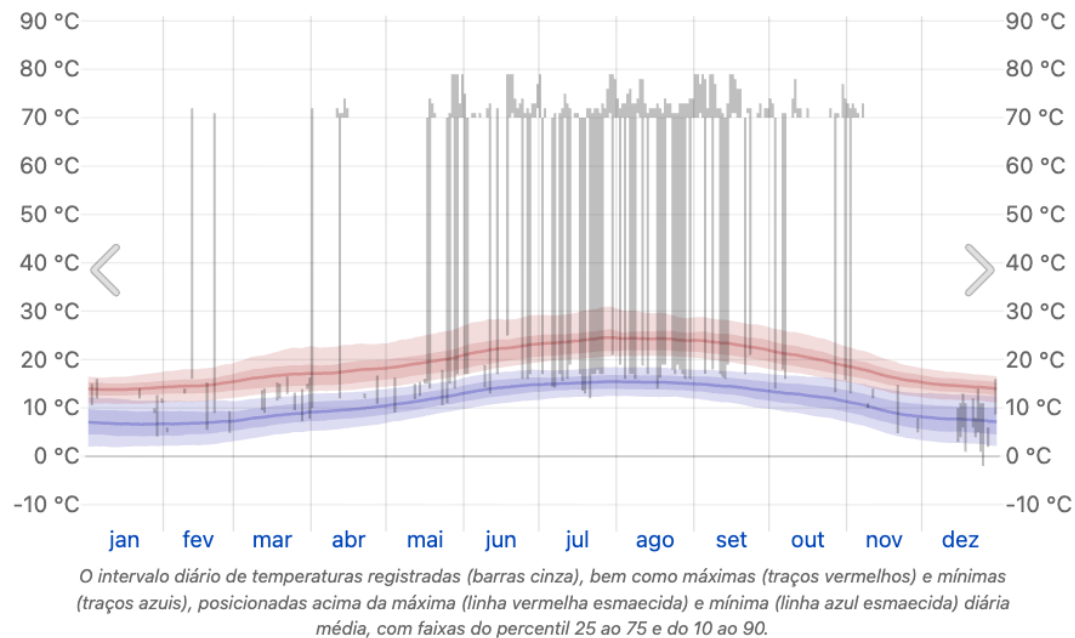


Figura 16 - Histórico da Temperatura observado em 2001 [25]

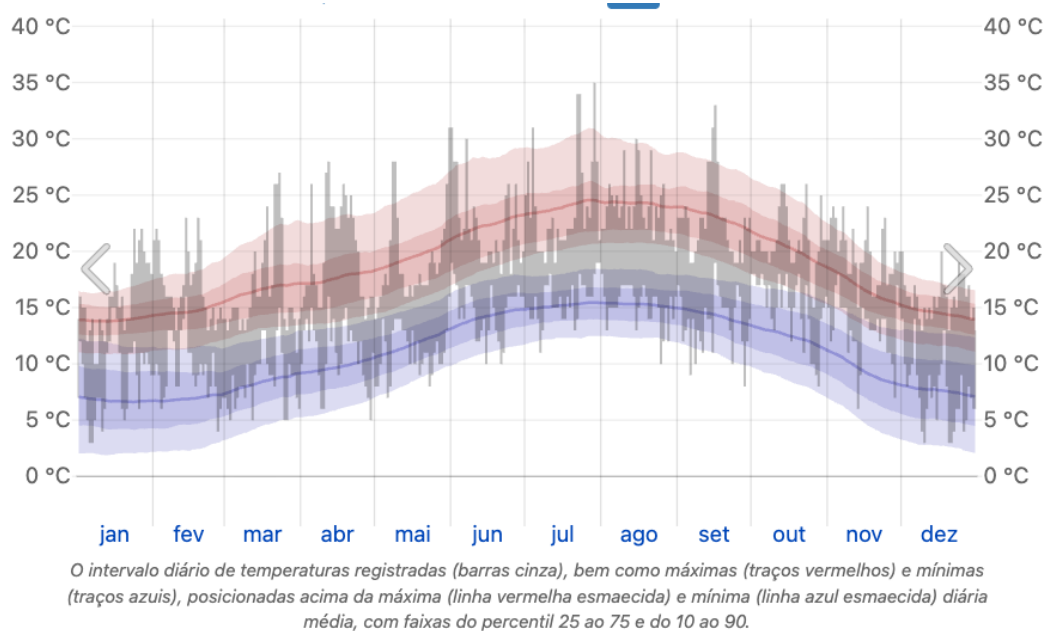


Figura 17 - Histórico da temperatura observado em 2024 [25]

Vento

A análise comparativa dos dados de velocidade do vento entre 2001 e 2024 revela uma evolução significativa nos padrões ventosos na Área Metropolitana do Porto. Em 2001 (Figura 18), registavam-se velocidades médias mais elevadas e uma variabilidade interanual mais acentuada, com rajadas máximas a atingirem valores consideráveis ao longo de todo o ano. Em contraste, os dados de 2024 (Figura 19) mostram uma clara redução nas velocidades médias do vento e uma diminuição na intensidade das rajadas máximas, particularmente durante os meses de inverno que tradicionalmente apresentavam condições mais ventosas. Esta tendência de suavização dos padrões ventosos, contudo, não elimina completamente o risco de eventos extremos esporádicos, mantendo-se a necessidade de protocolos operacionais para gestão de situações excecionais. Para o Metro do Porto, esta evolução traduz-se numa redução geral do risco associado ao vento para a operação regular, embora a monitorização e os planos de contingência para fenómenos abruptos devam manter-se, dada a imprevisibilidade inerente aos eventos climáticos extremos.

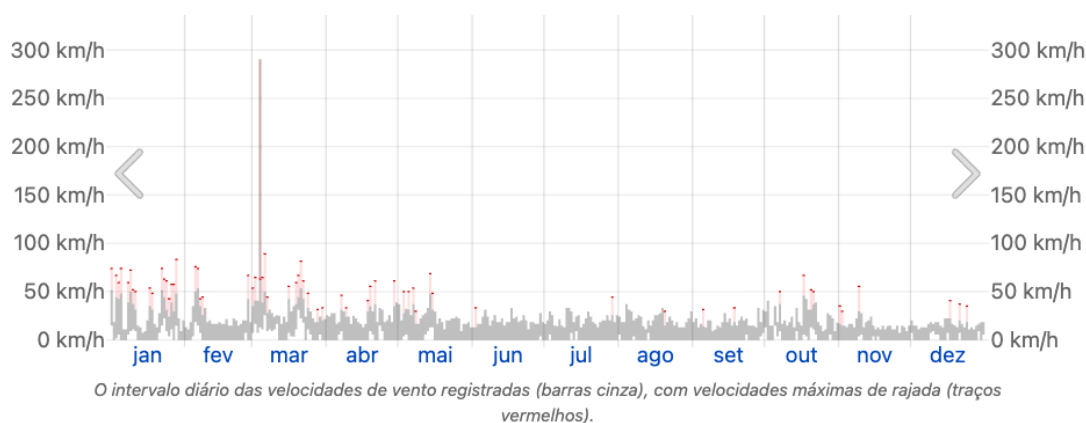


Figura 18 - Velocidade do vento observada no Porto em 2001 [25]

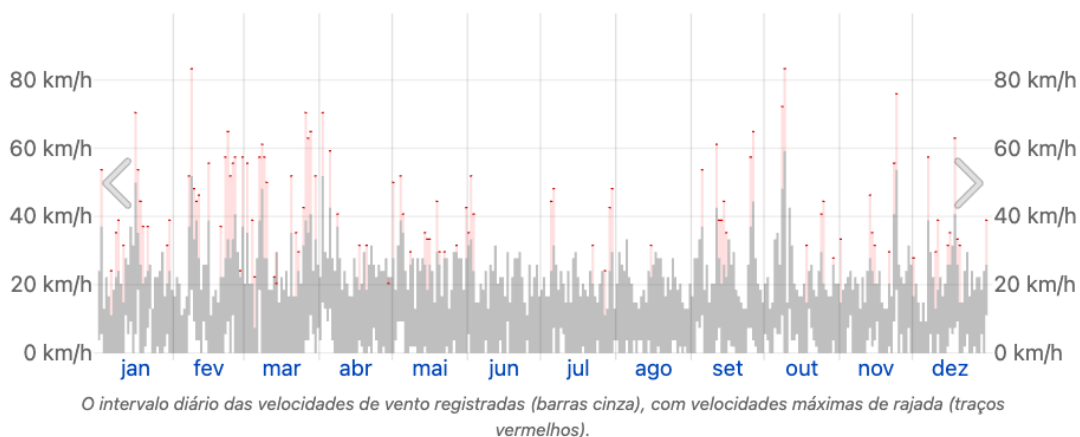


Figura 19 - Velocidade do vento observada em 2024 [25]

Precipitação

A análise comparativa da precipitação no Porto entre 2001 e 2024 revela uma transformação significativa no regime pluviométrico. Em 2001 registavam-se volumes anuais elevados, com chuvas concentradas no inverno e primavera, enquanto 2024 apresenta uma redução drástica da precipitação anual e uma alteração no padrão sazonal, com as chuvas a deslocarem-se para o final do outono e verões mais secos. Esta evolução implica uma dupla consequência operacional para o Metro do Porto: por um lado, reduz a probabilidade de perturbações por chuvas prolongadas, mas por outro, mantém a necessidade de protocolos de resposta a eventos extremos concentrados. A monitorização contínua mantém-se essencial face à imprevisibilidade dos padrões climáticos atuais.

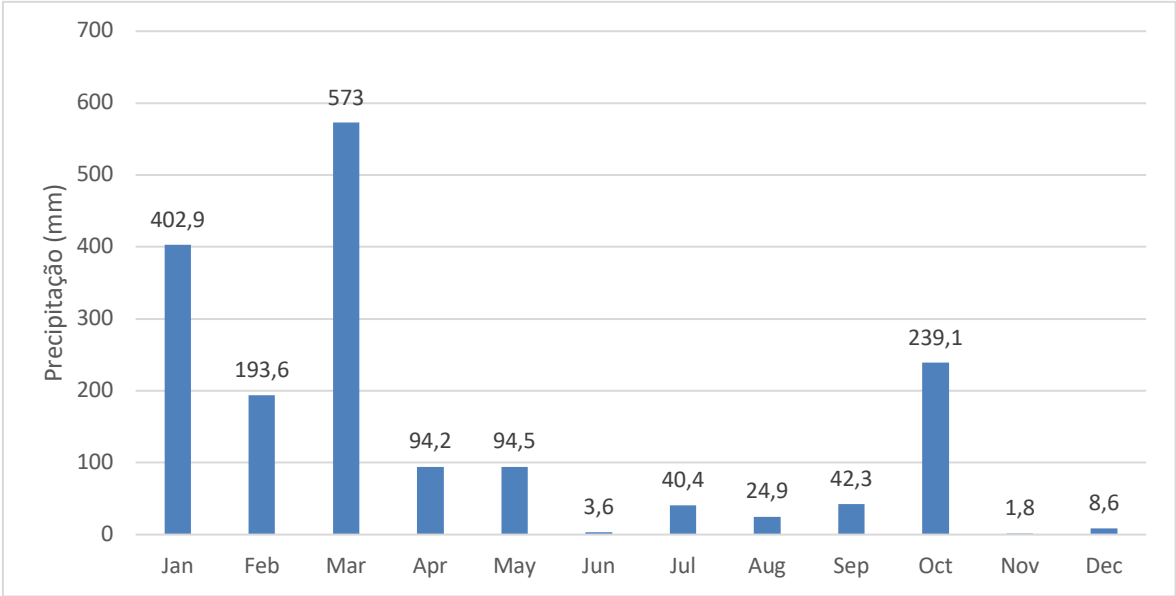


Figura 20- Precipitação observada em 2001. Adaptado de [19]

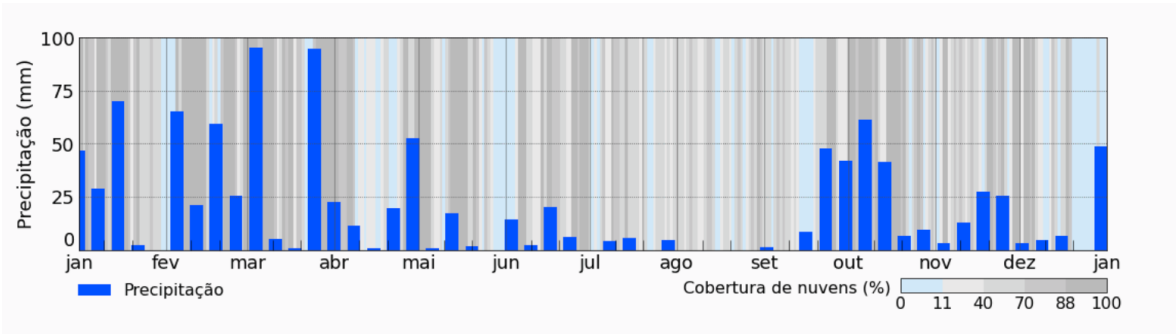


Figura 21- Precipitação observada em 2024 [26]

4.3 Projeções climáticas (2011-2040 e 2041-2070)

As projeções climáticas ajudam-nos a perceber como o clima poderá evoluir nas próximas décadas e quais os impactos mais prováveis para a rede do Metro do Porto. Mais do que olhar apenas para a situação atual, importa antecipar tendências futuras, como o aumento da frequência e intensidade das ondas de calor, a ocorrência de períodos de seca mais longos seguidos de episódios de chuva intensa e concentrada, bem como a possibilidade de ventos fortes mais regulares.

Estes cenários não pretendem prever o futuro com exatidão, mas sim indicar direções prováveis de mudança, permitindo preparar o sistema de mobilidade para enfrentar condições mais exigentes. Assim, as projeções climáticas servem de apoio essencial à definição de estratégias de adaptação, ajudando a reduzir riscos e a garantir maior resiliência da rede ao longo do tempo.

4.3.1 Temperatura

Temperatura média

As projeções de temperatura média para a Área Metropolitana do Porto mostram uma tendência de aquecimento claro e consistente em ambos os cenários de emissões, sendo significativamente mais acentuada no cenário RCP 8.5. No horizonte 2011-2040, o cenário RCP 4.5 (Figura 24) projeta um aumento moderado face aos valores de referência, enquanto o RCP8.5 (Figura 22) indica um aquecimento mais pronunciado. Esta divergência amplia-se substancialmente no horizonte 2041-2070, onde o RCP8.5 (Figura 23) mostra valores médios anuais drasticamente mais elevados, podendo exceder em mais de 2°C os valores projetados pelo RCP4.5 (Figura 25). Esta diferença traduzir-se-á em impactos operacionais significativamente mais severos para o Metro do Porto sob o cenário de altas emissões, incluindo stress térmico acelerado em infraestruturas, maior necessidade de climatização e riscos acrescidos para a segurança de passageiros e trabalhadores.

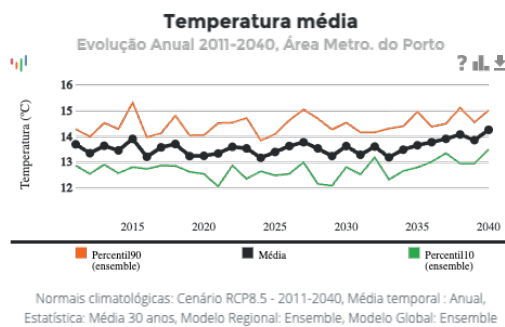


Figura 22 - Gráfico correspondente à temperatura média do horizonte temporal 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]

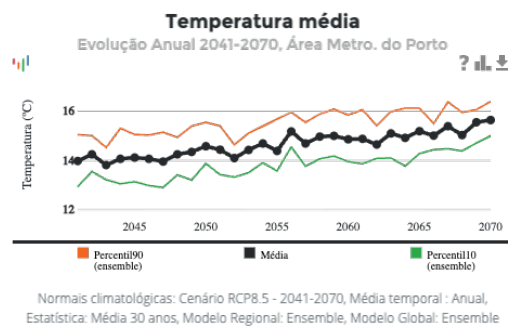


Figura 23- Gráfico correspondente à temperatura média do horizonte temporal 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]

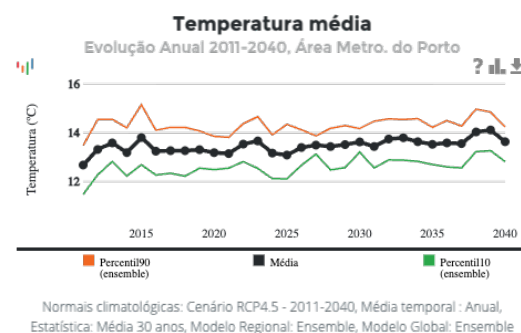


Figura 24 - Gráfico correspondente à temperatura média do horizonte temporal 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

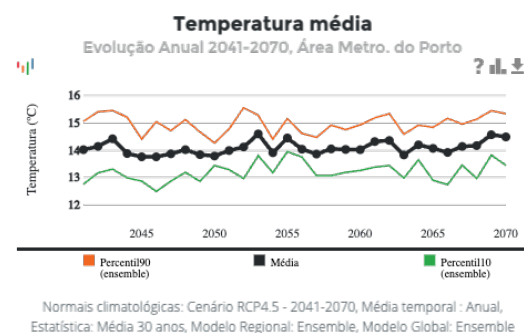


Figura 25 - Gráfico correspondente à temperatura média do horizonte temporal 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

Para uma melhor interpretação, foram incorporados os dados anteriores no *Google Earth pro*, correspondendo:

- o gráfico presente na Figura 22 ao mapa presente na Figura 26;
- a Figura 23 ao mapa presente na Figura 27;
- a Figura 24 correspondente ao mapa presente na Figura 28e, por último;
- a Figura 25, correspondente ao mapa presente na Figura 29

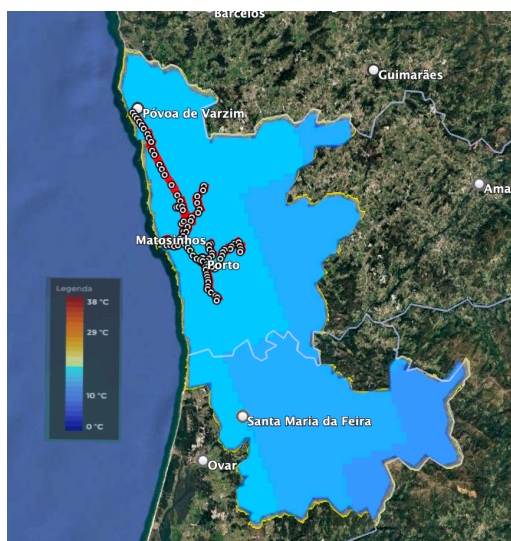


Figura 26 - Mapa correspondente à Temperatura média do horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]. Linhas do SMLAMP (a vermelho) sobre dados de temperatura e sobre Google Earth Pro, 2025. Mapa da autora.

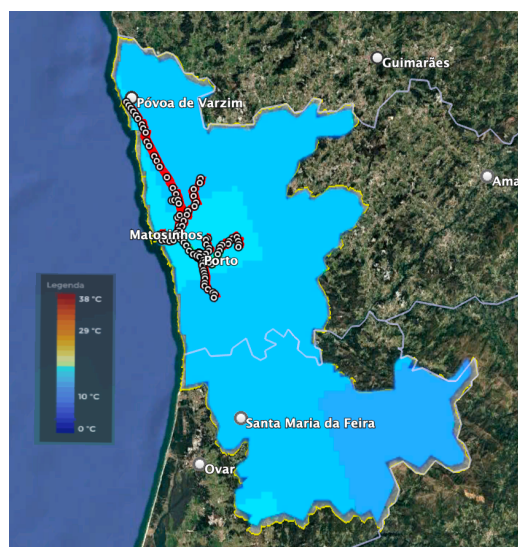


Figura 27 – Mapa correspondente à temperatura média do horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP8.5. Linhas do SMLAMP (a vermelho) sobre dados de temperatura e sobre Google Earth Pro, 2025. Mapa da autora.

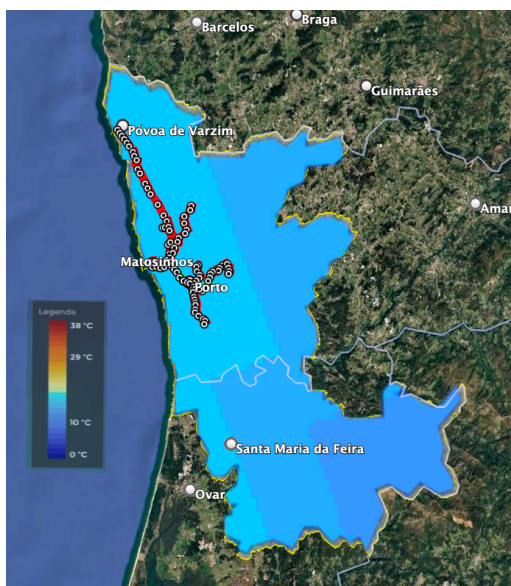


Figura 28- Mapa correspondente à Temperatura média do horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]. Linhas do SMLAMP (a vermelho) sobre dados de temperatura e sobre Google Earth Pro, 2025. Mapa da autora.

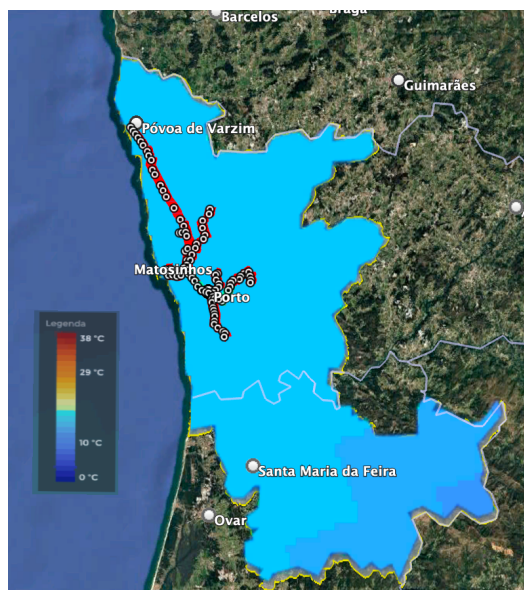


Figura 29 - Mapa correspondente à temperatura média do horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP4.5. Linhas do SMLAMP (a vermelho) sobre dados de temperatura e sobre Google Earth Pro, 2025. Mapa da autora.

Dias de dias quentes ($t_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$)

As projeções do número de dias quentes na Área Metropolitana do Porto revelam um aumento significativo e uma clara divergência entre os cenários RCP4.5 e RCP8.5. No horizonte 2011-2040, o cenário RCP4.5 (Figura 30) mostra um crescimento moderado, enquanto o RCP 8.5 (Figura 32) apresenta valores sensivelmente mais elevados. Esta diferença acentua-se drasticamente no período 2041-2070, onde o RCP 8.5 (Figura 33), projeta um número de dias quentes substancialmente superior, indicando uma exposição térmica muito mais intensa e prolongada. Para o metro do Porto, esta trajetória traduzir-se-á num agravamento dos riscos operacionais, incluindo maior stress térmico na infraestrutura, necessidade de refrigeração ampliada e potenciais limitações operacionais durante ondas de calor mais frequentes e prolongadas.

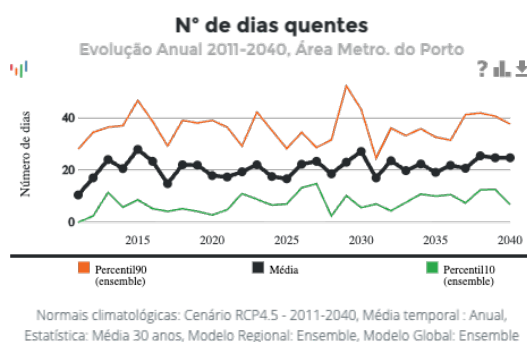


Figura 30 - Gráfico correspondente ao número de dias quentes para o horizonte temporal 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

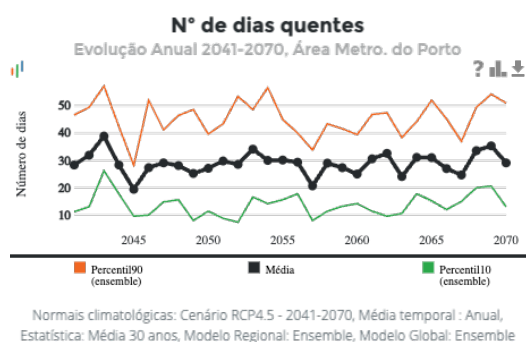


Figura 31 - Gráfico correspondente ao número de dias quentes para o horizonte temporal 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

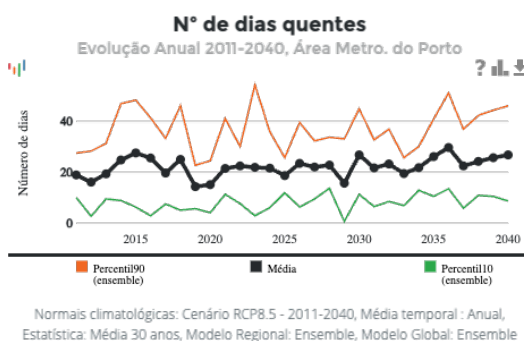


Figura 32 - Gráfico correspondente ao número de dias quentes para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8,5 para a AMP [19]

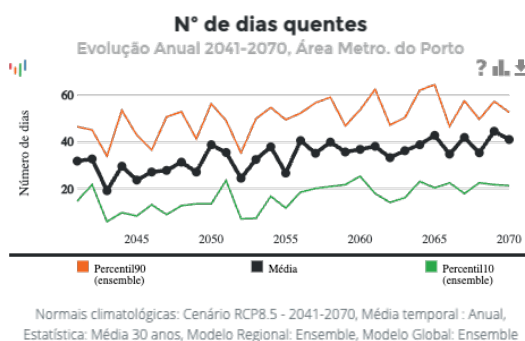


Figura 33 - Gráfico correspondente ao número de dias quentes para o horizonte temporal 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]

Dias de geada ($t_{min} < 0^{\circ}\text{C}$)

As projeções do número de dias de geada na Área Metropolitana do Porto mostram uma redução acentuada e consistente em ambos os cenários de emissões, sendo mais pronunciada no cenário RCP8.5. No horizonte 2011-2040, ambos os cenários indicam um declínio significativo face aos valores de referência, com o RCP 8.5 (Figura 35) a projetar valores ligeiramente inferiores aos do RCP4.5 (Figura 34). Esta tendência de redução acentua-se ainda mais no horizonte 2041-2070, onde o RCP8.5 (Figura 37) mostra

virtualmente a eliminação de dias de geada na região, enquanto o RCP 4.5 (Figura 36) mantém alguns eventos residuais, mas em frequência drasticamente reduzida. Para o Metro do Porto, esta trajetória representa uma das poucas consequências positivas das alterações climáticas, reduzindo os riscos operacionais associados à formação de gelo nas linhas de superfície, que afetam a tração e o sistema de travagem dos veículos, e diminuindo a necessidade de implementar medidas específicas de combate ao gelo. Contudo, este "benefício" é largamente ultrapassado pelos desafios colocados pelo aumento de outros extremos climáticos, como o calor intenso e a precipitação extrema.

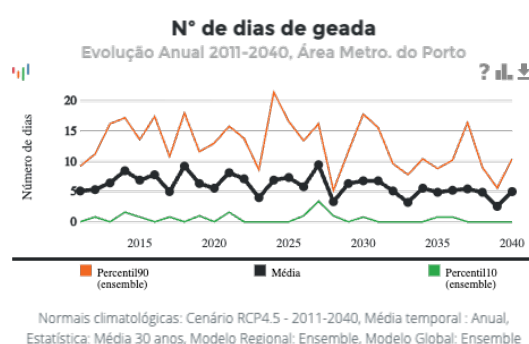


Figura 34 - Gráfico correspondente ao número de dias de geada para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

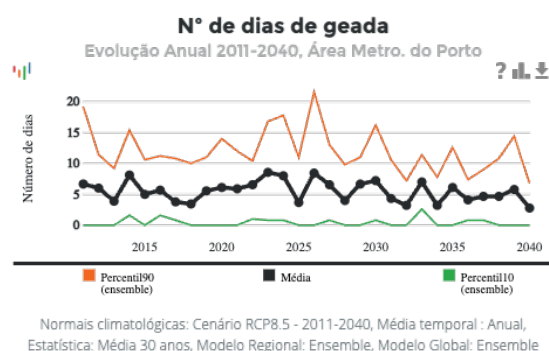


Figura 35 - Gráfico correspondente ao número de dias de geada para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8,5 para a AMP [19]

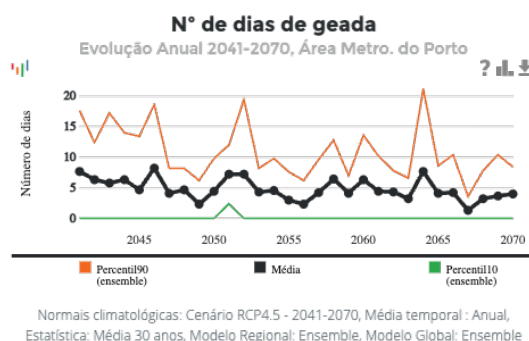


Figura 36 - Gráfico correspondente ao número de dias de geada para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

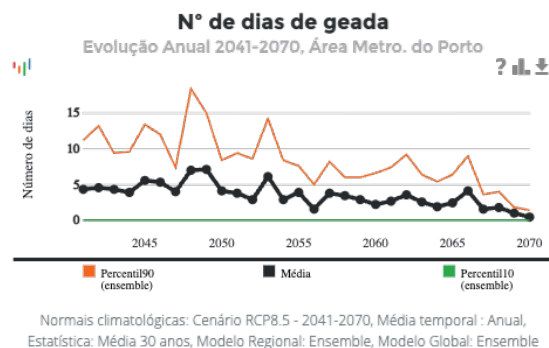


Figura 37 - Gráfico correspondente ao número de dias de geada para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 8,5 para a AMP [19]

4.3.2 Precipitação

Para além do aumento da temperatura e dos eventos de calor extremo, as alterações climáticas projetam também uma mudança significativa no regime de precipitação, caracterizada não por um aumento uniforme, mas por uma maior irregularidade. Espera-se uma tendência para invernos mais secos, intercalados com eventos de precipitação intensa e concentrada, que são particularmente críticos para um sistema de infraestruturas subterrâneas como o Metro do Porto. Esta análise foca-se em três indicadores-chave: a precipitação máxima em 5 dias consecutivos, e a frequência de dias de precipitação forte

(≥ 20 mm) e muito forte (≥ 50 mm), comparando os períodos de 2011-2040 e 2041-2070, e considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Precipitação máxima acumulada em 5 dias consecutivos

As figuras apresentam as projeções da precipitação máxima acumulada em 5 dias consecutivos na AMP. Para 2011-2040 (Figura 38 e Figura 39), ambos os cenários (RCP4.5 e RCP8.5) indicam valores elevados, frequentemente entre 200 e 300 mm, chegando por vezes a 400 mm. A variabilidade interanual é alta, mas no RCP8.5 a probabilidade de anos excecionalmente extremos é maior, podendo tornar insuficientes as infraestruturas concebidas para o RCP4.5.

Para 2041-2070, o cenário RCP4.5 (Figura 40) mantém variabilidade elevada, mas com tendência de estabilização, enquanto o cenário RCP8.5 (Figura 41) projeta eventos mais frequentes e intensos, acima dos 400 mm e, em casos excecionais, acima dos 500 mm. Isto aumenta o risco de falha sistémica das drenagens e pressiona de forma crítica as estações subterrâneas e sistemas de bombagem. No RCP4.5, estes eventos poderão ser mais espalhados enquanto no RCP 8.5, quase anuais.

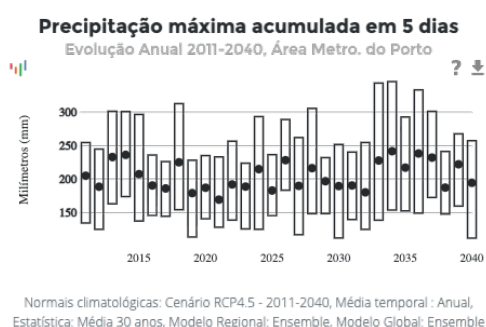


Figura 38 - Gráfico correspondente à precipitação máxima acumulada em 5 dias para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

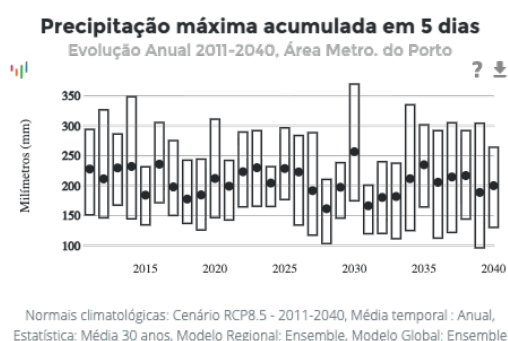


Figura 39 - Gráfico correspondente à precipitação máxima acumulada em 5 dias para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]

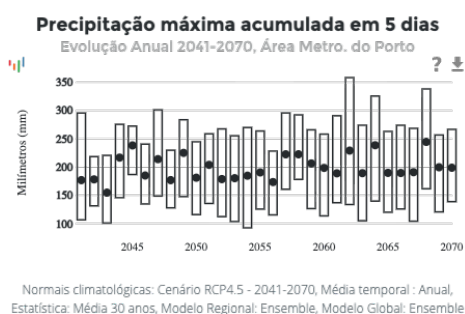


Figura 40 - Gráfico correspondente à precipitação máxima acumulada em 5 dias para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

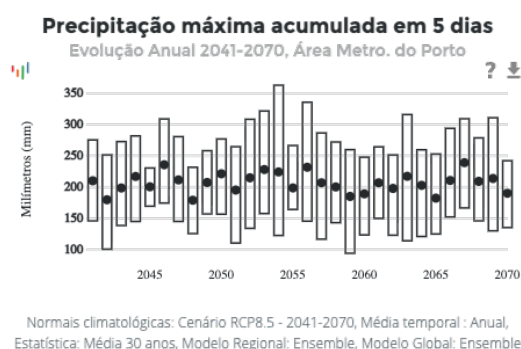


Figura 41 - Gráfico correspondente à precipitação máxima acumulada em 5 dias para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]

Frequência de dias com precipitação ≥ 20 mm

Com base nas projeções analisadas para o número de dias com precipitação igual ou superior a 20 mm na Área Metropolitana do Porto no horizonte 2011-2040, verifica-se uma clara distinção entre os dois cenários de emissões. No cenário de emissões intermédias RCP4.5 (Figura 42), observa-se uma variabilidade interanual considerável, com os valores a flutuarem maioritariamente entre 20 a 40 dias anuais, sem uma tendência de aumento consistente ao longo do período. Esta relativa estabilidade sugere que, embora os eventos de precipitação forte se mantenham frequentes, a sua ocorrência não se agravará significativamente sob este cenário de mitigação.

Em contraste, o cenário de altas emissões RCP8.5 (Figura 44) projeta uma realidade mais preocupante. Os valores médios anuais são sistematicamente superiores, situando-se frequentemente na faixa dos 30 a 50 dias, e revelam uma tendência de ligeiro, mas constante aumento ao longo das décadas. Esta trajetória implica que a rede de mobilidade da AMP enfrentará uma pressão climática constante e amplificada, com implicações operacionais diretas. A maior frequência de dias com precipitação intensa traduzir-se-á num *stress* acrescido nos sistemas de drenagem, numa probabilidade elevada de cheias rápidas e inundações, e num aumento da frequência de interrupções do serviço. Consequentemente, os custos operacionais e de manutenção serão continuamente mais elevados sob este cenário.

Assim, mesmo no horizonte temporal mais próximo 2011-2040, a escolha do trajeto de emissões altas RCP8.5 (Figura 44) implicará um impacto negativo tangível e recorrente na operação do sistema de mobilidade, contrastando com os efeitos mais mitigados do cenário RCP4.5 (Figura 42). Esta conclusão sublinha a importância crítica das ações de mitigação global e de adaptação local robusta para garantir a resiliência da infraestrutura.

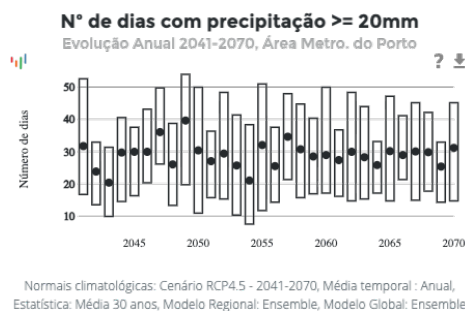


Figura 42 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação ≥ 20 mm para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

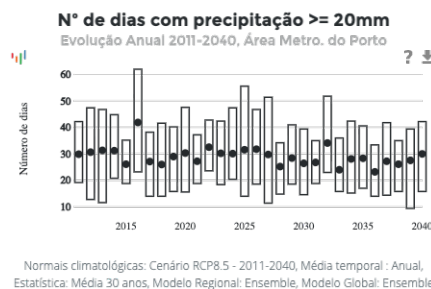


Figura 43 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação ≥ 20 mm para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

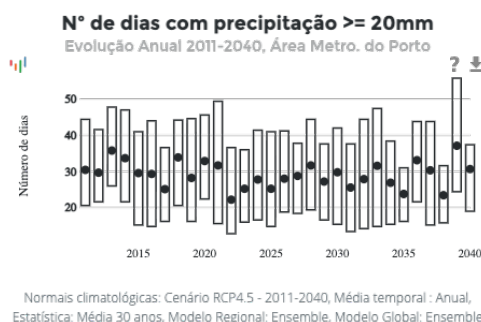


Figura 44 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação ≥ 20 mm para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]

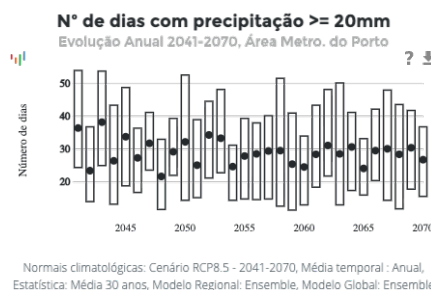


Figura 45 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação ≥ 20 mm para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]

Frequência de dias com precipitação ≥ 20 mm

As projeções para o número de dias com precipitação extrema (≥ 50 mm) na Área Metropolitana do Porto revelam uma clara divergência entre os cenários RCP 4.5 e RCP8.5, particularmente no horizonte 2041-2070 (Figura 47 e Figura 49). Enquanto o cenário de emissões intermédias RCP 4.5 (Figura 46 e Figura 48) mantém uma frequência estável e baixa (0-5 dias/ano), o cenário de altas emissões RCP 8.5 (Figura 47 e Figura 49) projeta um aumento marcado para 4-8 dias/ano, com picos anuais que podem exceder os 10 dias. Esta amplificação da frequência de eventos extremos sob RCP 8.5 traduzir-se-á num risco substancialmente acrescido de cheias rápidas, inundações severas e interrupções operacionais para o Metro do Porto, exigindo medidas de adaptação significativamente mais robustas face a uma pressão climática intensificada.

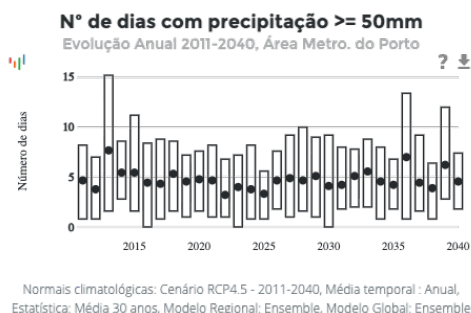


Figura 46 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação $\geq 50\text{mm}$ para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

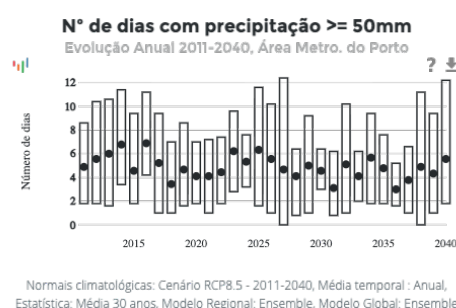


Figura 47 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação $\geq 50\text{mm}$ para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]

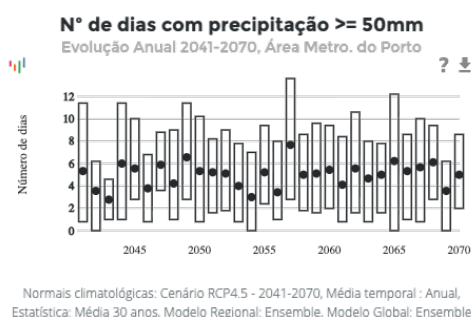


Figura 48 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação $\geq 50\text{mm}$ para o horizonte temporal de 2041-2070 cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

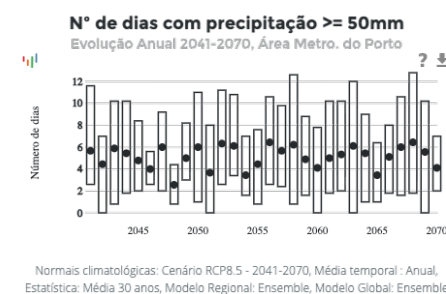


Figura 49 - Gráfico correspondente ao número de dias com precipitação $\geq 50\text{mm}$ para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]

4.3.3 Vento

A análise do regime de ventos é crucial para um sistema de transporte como o Metro do Porto, que inclui extensos troços em viaduto e à superfície, além de estações elevadas. As projeções climáticas para a velocidade do vento indicam mudanças relevantes, que podem afetar a operação, a segurança e a manutenção da rede. Esta análise foca-se em dois indicadores: a frequência de dias com vento moderado e de dias com vento forte, comparando os períodos de 2011-2040 e 2041-2070 sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Como implicações para o SMLAMP devido a esta variável salientam-se as seguintes:

- **Segurança Operacional em zonas elevadas:** As do Metro do Porto que circulam em zonas elevadas, como as que cruzam o rio Douro ou outros vales, são as mais expostas ao vento. Apesar de a frequência de dias de vento forte não dever aumentar significativamente, a ocorrência de um único evento extremo é suficiente para causar perturbações. Rajadas de vento lateral podem exercer forças significativas sobre as carruagens, potencialmente afetando a estabilidade. Isto pode obrigar à implementação de procedimentos de redução de velocidade ou mesmo à suspensão preventiva do serviço nessas secções específicas durante avisos laranja ou vermelhos por vento forte emitidos pelo IPMA.

- **Conforto e Segurança dos Passageiros em Estações Elevadas:** O vento pode dificultar a circulação de pessoas nos cais, aumentar a sensação de frio e levantar objetos soltos.
- **Risco de Queda de Objetos e Manutenção da Infraestrutura:** O vento forte é um dos principais fatores para a queda de ramos de árvores ou de outros detritos sobre a via, especialmente nas secções à superfície. Apesar de a frequência do vento não aumentar, a combinação de ventos fortes ocasionais com eventos de precipitação intensa (que tornam o solo mais instável e as árvores mais pesadas) pode aumentar este risco. Além disso, a ação constante do vento acelera o desgaste de componentes da infraestrutura, exigindo inspeções regulares.

Número de dias com vento moderado

As projeções para o número de dias com vento moderado na Área Metropolitana do Porto mostram uma relativa estabilidade em ambos os cenários de emissões. Para o horizonte 2011-2040 (Figura 50 e Figura 52, os cenários RCP4.5 e RCP8.5 apresentam uma variabilidade interanual sem tendência de crescimento consistente, mantendo-se os valores dentro de uma faixa similar. Esta estabilidade mantém-se no horizonte 2041-2070 (Figura 51 e Figura 53) onde ambos os cenários continuam a não revelar um aumento significativo na frequência de dias com vento moderado, indicando que esta variável climática particular não sofrerá alterações dramáticas nas próximas décadas, independentemente da trajetória de emissões seguido.

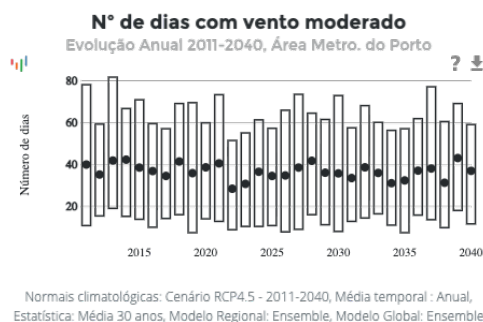


Figura 50 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento moderado para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

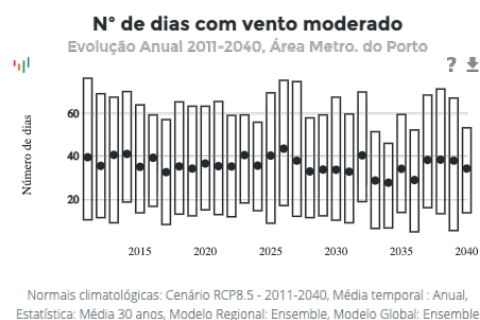


Figura 51 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento moderado para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP [19]

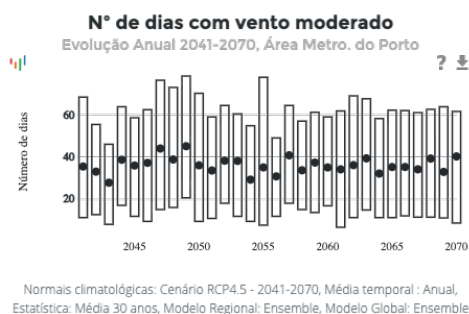


Figura 52 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento moderado para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]

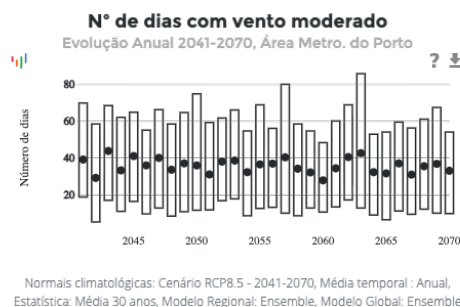


Figura 53 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento moderado para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP [19]

Número de dias com vento forte

Com base nas projeções analisadas, verifica-se que o cenário RCP8.5 apresenta, tanto no horizonte 2011-2040 (Figura 55) como em 2041-2070 (Figura 57), um número consistentemente maior de dias com vento forte em comparação com o RCP 4.5(Figura 54 e Figura 56), sendo esta diferença particularmente acentuada no período mais tardio, onde o RCP8.5 projeta um aumento progressivo enquanto o RCP4.5 tende a estabilizar. Esta trajetória sob altas emissões implicará riscos operacionais acrescidos para o Metro do Porto, incluindo uma maior frequência de perturbações na circulação, potenciais danos em infraestruturas e a necessidade de reforçar protocolos de segurança face a condições de vento extremo.

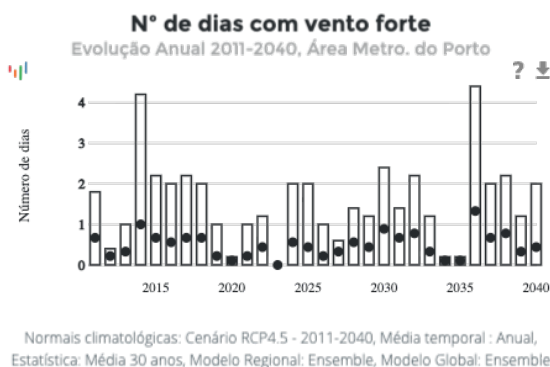


Figura 54 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento forte para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 4.5 para a AMP

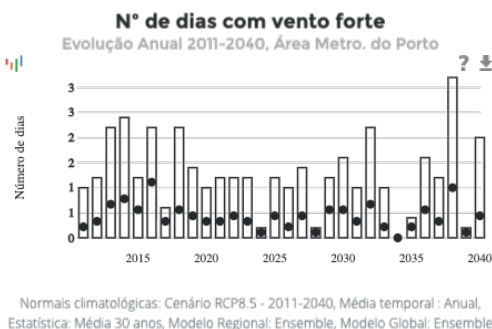


Figura 55 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento forte para o horizonte temporal de 2011-2040, cenário RCP 8.5 para a AMP

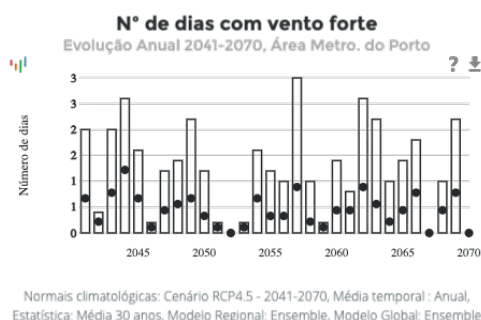


Figura 56 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento forte para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 4.5 para a AMP

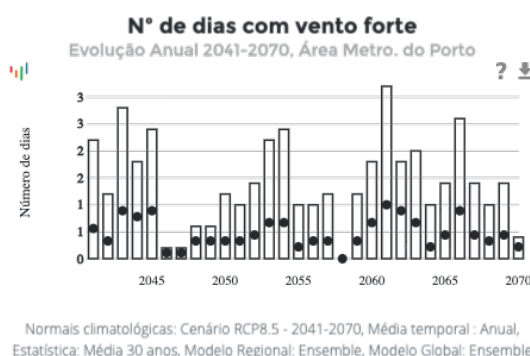


Figura 57 - Gráfico correspondente ao número de dias com vento forte para o horizonte temporal de 2041-2070, cenário RCP 8.5 para a AMP

4.3.4 Síntese das potenciais interferências associadas às AC

Assim, realizando uma análise comparativa entre os dois períodos (2011-2040 e 2041-2070), a mesma, revela uma clara intensificação de todos os riscos climáticos para o Metro do Porto.

- 2011-2040 (Curto/Médio Prazo): Período de manifestação clara das vulnerabilidades atuais. Os impactos (inundações, falhas por calor, quedas de árvores) tornar-se-ão mais frequentes e custosos, exigindo sobretudo medidas de gestão operacional, manutenção adaptativa e investimentos pontuais em resiliência.
- 2041-2070 (Médio/Longo Prazo): Período de mudança de paradigma. A magnitude projetada dos extremos (ondas de calor, precipitação intensa) poderá exceder a capacidade de adaptação do sistema atual. As intervenções necessárias deixam de ser apenas pontuais e tornam-se estruturais e sistémicas, requerendo

um replaneamento de infraestruturas críticas (drenagem, climatização, proteção costeira) e a integração de critérios de clima futuro em todos os novos projetos de expansão (linha da Trofa).

A seleção de variáveis mostrou-se robusta, captando os três eixos fundamentais de risco (stress térmico, risco de inundação e segurança operacional com vento) que efetivamente condicionarão a operação e a resiliência do Metro do Porto nas próximas décadas.

4.4 Análise de risco face às projeções climáticas

A análise espacial das projeções climáticas para a AMP, baseada nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 do Portal do Clima [19] e no PMAAC-AMP [26], permitiu cruzar os dados regionais com o traçado e a tipologia das infraestruturas do SMLMAP. Este cruzamento identificou padrões claramente diferenciados de exposição e sensibilidade ao longo da rede, destacando zonas críticas onde os impactos climáticos futuros se concentrarão, comprometendo a continuidade e a segurança do serviço. A avaliação de risco climático é dinâmica, evoluindo da exposição a perigos atuais para a materialização de impactos futuros mais severos e frequentes. A seguinte análise detalha esta progressão.

Zonas Costeiras

Embora estas linhas se localizem no litoral e estejam sujeitas à influência marítima, o impacto direto do mar não se revela particularmente significativo. Ainda assim, verifica-se uma maior exposição ao spray salino em comparação com outras linhas do interior, sem que isso constitua, no presente, um fator crítico. Mais relevantes são a exposição frequente a ventos marítimos intensos e a tempestades, bem como a vulnerabilidade indireta à subida do nível médio do mar (SNMM), cuja influência, apesar de limitada atualmente, poderá tornar-se significativa a longo prazo.

No que respeita à sensibilidade, esta é considerada elevada, uma vez que os componentes metálicos da infraestrutura são altamente suscetíveis à corrosão induzida pelos sais transportados pelo vento. Acresce ainda a vulnerabilidade a danos provocados pela queda de árvores ou pela projeção de detritos durante episódios de tempestade. Em contrapartida, a sensibilidade direta à SNMM é atualmente reduzida.

O nível de risco atual é classificado como elevado, com tendência para atingir níveis críticos a longo prazo, devido ao esperado aumento da frequência de fenómenos de precipitação extrema.

Quanto à capacidade adaptativa, esta é considerada baixa. O facto de a infraestrutura se encontrar implantada numa zona de difícil intervenção implica que qualquer modificação estrutural seja complexa e extremamente dispendiosa. A proteção das linhas face aos ventos salinos e às tempestades é praticamente inviável, uma vez que medidas como a instalação de barreiras corta-vento teriam eficácia limitada e um impacto visual e paisagístico significativo. Assim, a adaptação nestas áreas resume-se sobretudo a ações de manutenção corretiva e paliativa, nomeadamente através da utilização de tintas e ligas

metálicas mais resistentes à corrosão, bem como da implementação de planos de contingência operacional para situações de vento extremo. No caso das ameaças de longo prazo, como a subida do nível médio do mar, a mitigação local é praticamente impossível, sendo necessárias grandes intervenções de engenharia costeira em escala municipal ou metropolitana.

Núcleo Urbano Central Subterrâneo

O ponto em análise apresenta exposição muito alta, estando totalmente sujeito ao efeito de ilha de calor urbano e, especialmente, a eventos de precipitação intensa e concentrada que podem sobrecarregar os sistemas de drenagem da cidade. A sensibilidade é muito alta, pois trata-se do ponto mais crítico de toda a rede: a sua localização subterrânea e em cotas baixas, dependendo totalmente de sistemas de bombagem essenciais, enquanto os equipamentos elétricos e de AVAC são vulneráveis ao sobreaquecimento e à inundação. O risco atual é elevado, dado que qualquer evento de chuva extrema representa uma ameaça direta de inundação catastrófica, e projeta-se que o risco futuro seja muito alto, ou crítico, uma vez que o aumento da frequência e intensidade de precipitações extremas transforma a vulnerabilidade atual numa ameaça constante à operação do centro da rede. A capacidade adaptativa é muito baixa, sendo esta a zona com menor capacidade de adaptação de toda a rede. Estações e túneis são estruturas rígidas e complexas, situadas no subsolo de uma cidade densamente construída, tornando intervenções estruturais difíceis, disruptivas e dispendiosas. Melhorias em drenagem e sistemas de bombagem são tecnicamente possíveis, mas limitadas pelo espaço disponível e pela capacidade dos sistemas urbanos externos, sobre os quais o operador do metro não tem controlo. O reforço da resistência a eventos extremos depende de macro intervenções urbanas, como a ampliação de coletores de águas pluviais, responsabilidade das autarquias. Assim, a adaptação é largamente reativa e de gestão de crise, baseando-se em planos de evacuação, barreiras móveis anti cheia com eficácia limitada em eventos extremos e sistemas de alerta precoce.

Corredores Suburbanos

Os corredores suburbanos e de topografia acidentada apresentam exposição média a alta, estando sujeitos a um coquetel de perigos que inclui ondas de calor, precipitação intensa com escorrência rápida, ventos fortes em zonas abertas e períodos de seca que antecedem a chuva. A sensibilidade é também média a alta, refletindo a vulnerabilidade a inundações em vales, à instabilidade de taludes, especialmente devido ao ciclo seca/chuva intensa, e à dilatação térmica dos carris. O risco atual é médio, manifestando-se em problemas pontuais e localizados, mas projeta-se que o risco futuro seja alto, com impactos mais frequentes, generalizados e severos, sobretudo em termos de movimentos de vertente e cheias relâmpago. A classificação global destes corredores é variável, de média a alta, beneficiando de maior disponibilidade de espaço e de características menos consolidadas em alguns trechos.

A capacidade adaptativa nestes corredores é igualmente variável. Nos troços existentes, é média, permitindo obras de estabilização de taludes, melhoria de drenagens superficiais e substituição de carris por materiais mais resistentes ao calor, embora estas intervenções sejam caras, mas tecnicamente exequíveis. Em expansões futuras, a capacidade adaptativa é alta, oferecendo a oportunidade de integrar adaptação desde a conceção, como drenagens sustentáveis, traçados que evitem zonas de risco e uso de materiais resilientes a custos relativamente baixos. Em troços específicos, como a travessia do Douro e Jardim do Morro, a classificação é baixa devido à exposição fixa e limitada, com medidas restritas à gestão da vegetação e planos operacionais. Já em trechos como Verdes-Aeroporto (Linha E) e Vila d'Este (Linha D), a adaptação é média-baixa ou média, permitindo a instalação de quebra-ventos, melhorias localizadas na drenagem e reforço da infraestrutura conforme a capacidade da rede urbana existente.

Dessa forma, a análise detalhada de cada linha permitiu identificar e relatar um conjunto de ações recomendadas, orientadas para a redução dos impactos associados.

4.4.1 Horizonte 2011–2040

Para o horizonte de 2011 a 2040, foi realizada a matriz de risco, representada na Figura 59, partindo das seguintes evidências:

Linha A: Risco Muito alto. Linha litoral exposta aos efeitos indiretos do mar. As medidas focam-se na proteção e manutenção intensiva. A proteção anticorrosiva (tintas especiais, materiais substitutos) e a gestão da vegetação são defensivas críticas para prevenir falhas na catenária e danos por queda de árvores. O reforço da drenagem transversal é vital para escoar a precipitação intensa que acompanha as tempestades.

Linha B: Risco Muito Alto a Crítico. Partilha a exposição da Linha A, com foco adicional na corrosão. A abordagem é de monitorização proativa e resposta. A monitorização contínua da salinidade permite intervenções de manutenção antes que surjam danos críticos. Inspeções frequentes e planos de contingência específicos transformam a gestão do risco de reativa para preventiva.

Linha C: Risco médio-Alto. Atravessa zonas suburbanas com risco hidrológico (cheias rápidas) e exposição térmica. O foco está na gestão da água e no conforto térmico. Bacias de retenção e manutenção de drenos são essenciais para mitigar inundações localizadas. O aumento da resiliência térmica é necessário para manter o serviço e o conforto durante ondas de calor.

Linha D: Risco Alto. Apresenta uma dupla vulnerabilidade: exposição a ventos fortes em viadutos/encostas e partilha do risco de inundação do núcleo subterrâneo. Requer uma abordagem híbrida e operacional. A gestão do vento é feita através de tecnologia (anemómetros) e protocolos claros de redução de velocidade ou paragem. A gestão da água é semelhante ao núcleo central, focando-se no reforço da drenagem em pontos críticos como taludes.

Linha E: Risco Médio. Maior exposição a episódios extremos de calor e vento, exigindo a revisão e atualização de protocolos operacionais, bem como o reforço de sistemas de ventilação em áreas de grande afluxo de passageiros. Beneficia de uma estratégia baseada em protocolos e design. A integração com avisos meteorológicos oficiais (IPMA) permite uma resposta operacional ágil. Medidas de design passivo, como sombreamento e ventilação natural, aumentam a resiliência a baixo custo operacional.

Linha F: Risco médio alto. Sujeita a cheias rápidas e caudais de pico elevados. A adaptação é estrutural e de engenharia civil.

Linha G: Risco Alto. Nova expansão que atravessa zonas de risco diversificado hidrológico. Para garantir a resiliência futura, deve prever integração plena de sistemas de drenagem inteligente. Requer o redimensionamento de infraestruturas hidráulicas (passagens, coletores) para os novos caudais extremos projetados, associado a planos de contingência. A integração de medidas de resiliência na fase de projeto (bacias de retenção, portas estanques, redundância de sistemas e materiais adequados) é drasticamente mais eficiente e barata do que adaptar infraestruturas existentes mais tarde.

Expansão Trofa: Risco médio. Expansão futura em zona periurbana, exposta a riscos térmicos e de vento. Segue a mesma lógica da Linha G, ou seja, incorporar a adaptação no design. A monitorização meteorológica e os critérios operacionais definidos desde o início permitirão uma operação segura e resiliente. Neste momento ainda apresenta um risco baixo pois tem possibilidades de em projeto se mitigar possíveis problemas.

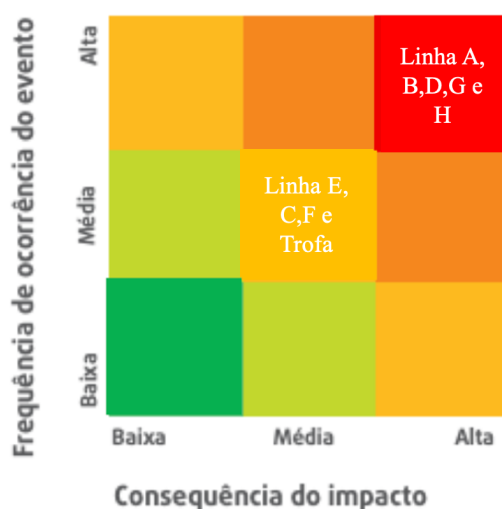


Figura 58 - Matriz de Risco Horizonte 2011-2040 (adaptado de [18])

4.4.2 Horizonte 2041–2070

Neste horizonte temporal, as medidas de adaptação necessárias são semelhantes às do período anterior, uma vez que, se já tiverem sido implementadas previamente, poderão inclusive contribuir para reduzir os impactos neste período.

Linha A: Risco Muito Alto. Linha litoral onde a exposição aos elementos marítimos se intensifica drasticamente. A corrosão acelera para um ritmo insustentável e as tempestades costeiras tornam-se mais violentas. A abordagem de adaptação é semelhante ao horizonte temporal anterior.

Linha B: Risco Muito Alto a Crítico. Linha de maior risco onde o impacto da subida do nível médio do mar torna-se direto e iminente. A combinação de SNMM com tempestades intensas gera risco de inundação costeira e erosão que ameaça a integridade da infraestrutura. Requer proteção costeira de grande escala, sistemas redundantes de proteção e protocolos de evacuação rápida. A longo prazo, poderá ser necessário discutir o realinhamento ou elevação de secções da linha.

Linha C: Risco Alto. Os riscos de calor e cheias agravam-se qualitativamente, com ondas de calor extremas, degradação da qualidade do ar durante períodos de calmaria e precipitação extrema que sobrecarrega os sistemas de drenagem.

Linha D: Risco Alto. A pressão sobre o núcleo central subterrâneo atinge ponto crítico, transformando o risco de inundações severas em probabilidade elevada.

Linha E: Risco Médio-Alto. A exposição a episódios extremos de calor e vento torna-se mais frequente, testando os limites dos protocolos e do design atuais.

Linha F: Risco Muito Alto. A precipitação extrema atinge intensidade que torna obsoletas as soluções de drenagem atuais.

Linha G: Risco Alto. Sendo linha nova, o risco alto reflete a pressão climática esperada, mas com capacidade adaptativa intrínseca ao projeto.

Expansão Trofa: Risco médio Expansão futura onde os perigos climáticos agravados exigem padrões de projeto conservadores. O risco permanece baixo, pois considera-se que os possíveis impactos foram mitigados em projeto.

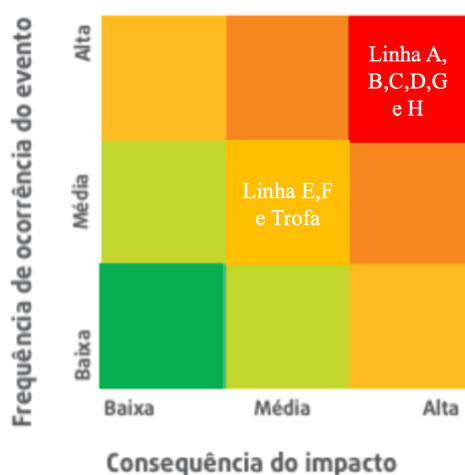


Figura 59- Matriz de risco Horizonte 2041–2070 (adaptado de [18])

A distribuição provável de ocorrência dos diferentes eventos climáticos extremos não é, nem será, uniforme ao longo da rede do Metro do Porto. Partindo do conhecimento do contexto climático atual da Área Metropolitana do Porto e dos cenários futuros, mas também da constatação de que os impactos não terão a mesma magnitude em todos os troços e estações, foi elaborada uma síntese da exposição provável da infraestrutura do Metro do Porto aos principais fenómenos climáticos extremos (Figura 60). Destacam-se três aspetos principais:

- É muito provável que ocorram eventos climáticos extremos com impacto na rede do Metro do Porto, abrangendo tanto linhas subterrâneas como de superfície;
- Fatores como a proximidade ao mar, a altitude ou a morfologia do território contribuem para diferenciar espacialmente a probabilidade e intensidade dos impactos.
- As áreas mais intensamente urbanizadas, onde a impermeabilização do solo e o efeito de ilha de calor urbana são mais pronunciados, constituem os pontos críticos da rede, onde os fenómenos climáticos extremos têm maior probabilidade de se traduzir em falhas de operação ou interrupções de serviço, podendo mesmo assumir a dimensão de catástrofes urbanas.

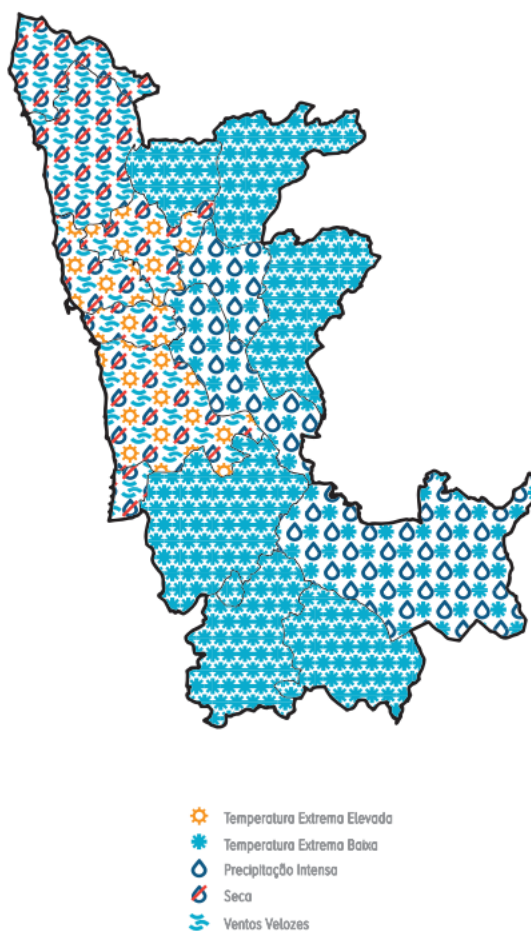


Figura 60 – Distribuição geográfica da probabilidade de ocorrência de eventos climáticos extremos
[26]

5.

ADAPTAÇÃO DO SISTEMA

5.1 Avaliação crítica da adaptação em sistemas de transporte - o caso do metro do Porto

Os sistemas de transporte urbano localizados em áreas costeiras, como acontece em parte da rede do metro da cidade do Porto, enfrentam vulnerabilidades acrescidas face às alterações climáticas. A exposição direta a fenómenos como tempestades, precipitação intensa, ventos fortes e, a médio e longo prazo, a subida do nível médio do mar, coloca metros e elétricos numa posição de risco elevado, comprometendo a segurança das infraestruturas e dos passageiros, bem como a fiabilidade do serviço. A análise de casos internacionais permite retirar lições importantes.

Em Portugal, a Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas [2], prorrogada até 2025, constitui o enquadramento de base para a definição de políticas setoriais e territoriais de adaptação, identificando os transportes como área prioritária. A nível regional, o Plano Metroclima, aprovado pela Área Metropolitana do Porto em 2021, representa um avanço importante ao diagnosticar riscos climáticos para a região Norte e definir medidas setoriais aplicáveis aos transportes, como o reforço da drenagem, a criação de corredores verdes, a melhoria da resiliência energética e a integração da adaptação em projetos de expansão de infraestruturas. Para a MP, o Metroclima fornece um quadro estratégico que deve ser internalizado em planos próprios, através da definição de indicadores específicos de desempenho e da articulação institucional com a AMP. Contudo, permanece a ausência de um plano interno formal de adaptação, o que representa uma lacuna face ao agravamento das AC.

A adaptação climática não deve ser entendida apenas como uma questão de engenharia ou planeamento a longo prazo, mas também como uma prática de gestão operacional quotidiana. O SMLAMP, que já enfrenta inundações em estações subterrâneas, falhas de equipamentos em ondas de calor, beneficiaria de protocolos sistemáticos de resposta rápida, integração de previsões meteorológicas no centro de controlo e planos de evacuação testados com as equipas operacionais. Estas práticas, complementares às grandes obras de adaptação, permitiriam reduzir impactos imediatos, salvaguardar passageiros e reforçar a confiança dos utilizadores.

5.2 Limitações Estruturais e Caminhos para a Adaptação do Metro do Porto

O sistema do Metro do Porto, apesar de ser relativamente recente e amplamente reconhecido pela sua eficiência na mobilidade urbana e contribuição para a redução de emissões, enfrenta diversos desafios importantes decorrentes das alterações climáticas. Como uma infraestrutura de transporte organizada e maioritariamente rígida, a sua capacidade de adaptação a fenómenos meteorológicos extremos e mudanças ambientais rápidas é limitada.

Neste contexto, o conceito de “sistema rígido” refere-se a uma rede com pouca flexibilidade física e operacional, baseada em infraestruturas fixas, como túneis, estações, linhas e subestações elétricas, que não podem ser facilmente modificadas, deslocadas ou adaptadas sem recorrer a intervenções complexas e dispendiosas. A expansão ou reconfiguração da rede implica obras de grande dimensão, estudos técnicos detalhados, aprovações legais e um investimento elevado, dificultando a resposta rápida a novas condições, como o aumento do nível da água, a necessidade de alterar traçados devido a riscos climáticos ou a adaptação a picos imprevisíveis de procura. Esta rigidez estrutural limita também a capacidade de reação imediata a eventos disruptivos, como inundações ou tempestades.

No caso concreto do Metro do Porto, os custos associados às medidas de adaptação são, na maioria das vezes, relativamente fáceis de quantificar, uma vez que envolvem intervenções tangíveis como a melhoria dos sistemas de drenagem, o reforço das estruturas ou a atualização tecnológica dos equipamentos. O verdadeiro desafio reside na estimativa dos benefícios, especialmente quando se trata de medidas com impactos indiretos ou dependentes de mudanças comportamentais.

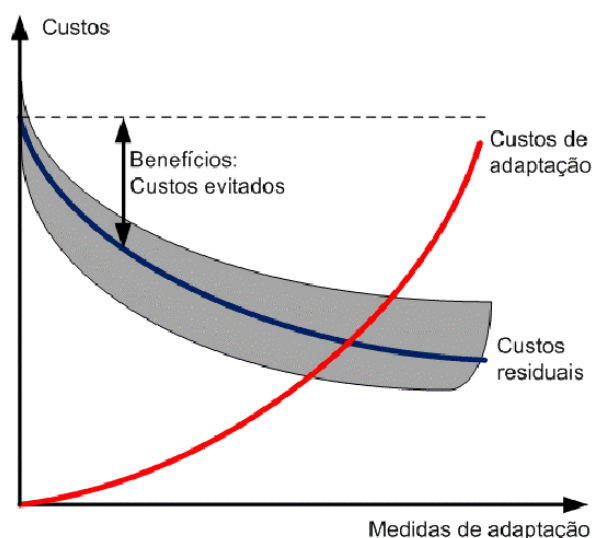


Figura 61 - Relação entre custos de adaptação, custos residuais e benefícios obtidos [27]

A Figura 61, mostra a relação entre os custos das alterações climáticas e as medidas de adaptação implementadas, destacando a importância da avaliação económica na decisão

dessas ações. À medida que se intensificam as medidas, os custos de implementação aumentam, mas os custos residuais (danos e prejuízos após a adaptação) diminuem. O objetivo é encontrar um ponto de equilíbrio onde o custo total seja minimizado, maximizando os benefícios económicos.

Do mesmo modo, a Figura 62, representa a evolução do risco ao longo do tempo em função de diferentes estratégias de adaptação. No eixo vertical está representado o nível de risco, enquanto o eixo horizontal traduz a dimensão temporal. A linha horizontal tracejada indica o limiar do risco considerado aceitável.

A linha vermelha representa o cenário de não adaptação. Neste percurso, o risco aumenta de forma contínua ao longo do tempo, ultrapassando progressivamente o nível considerado aceitável, o que pode resultar em consequências adversas significativas, nomeadamente para infraestruturas e sistemas mais vulneráveis.

A linha azul ilustra uma estratégia de adaptação progressiva. Esta abordagem assenta na implementação faseada de medidas de adaptação, que permitem uma redução temporária do risco. Contudo, à medida que o tempo avança, o risco volta a aumentar, exigindo novas intervenções. Trata-se de uma estratégia que procura manter o risco próximo do limiar aceitável, sem ultrapassá-lo, mediante ações corretivas periódicas.

A linha verde representa uma estratégia de adaptação por precaução. Neste caso, são implementadas de forma antecipada medidas robustas logo após a tomada de decisão, promovendo uma redução mais expressiva e duradoura do risco. Esta abordagem permite manter os níveis de risco consistentemente abaixo do limiar aceitável, favorecendo uma maior segurança e resiliência a longo prazo.

O ponto de decisão assinalado no gráfico indica o momento em que se opta por iniciar a adaptação. A sua definição atempada é essencial para assegurar a eficácia das respostas adotadas e para minimizar os impactos negativos futuros. Este enquadramento reforça a importância de uma avaliação cuidada dos riscos e da definição de estratégias de adaptação adequadas às especificidades do contexto e das infraestruturas envolvidas.

As estratégias de adaptação implicam custos, que aumentam consideravelmente quando as medidas são adiadas. Implementar ações de adaptação de forma antecipada gera benefícios líquidos a médio e longo prazo. Segundo a Comissão das Comunidades Europeias, agir rapidamente traz vantagens económicas significativas, prevenindo prejuízos e reduzindo riscos que impactam ecossistemas, saúde pública, economia, bens materiais e infraestruturas essenciais.

O sistema do Metro do Porto, apesar de ser relativamente recente e amplamente reconhecido pela sua eficiência na mobilidade urbana e contribuição para a redução de emissões, enfrenta diversos desafios importantes decorrentes das alterações climáticas. Como uma infraestrutura de transporte organizada e maioritariamente rígida, a sua capacidade de adaptação a fenómenos meteorológicos extremos e mudanças ambientais rápidas é limitada.

Neste contexto, o conceito de “sistema rígido” refere-se a uma rede com pouca flexibilidade física e operacional, baseada em infraestruturas fixas, como túneis, estações,

linhas e subestações elétricas, que não podem ser facilmente modificadas, deslocadas ou adaptadas sem recorrer a intervenções complexas e dispendiosas. A expansão ou reconfiguração da rede implica obras de grande dimensão, estudos técnicos detalhados, aprovações legais e um investimento elevado, dificultando a resposta rápida a novas condições, como o aumento do nível da água, a necessidade de alterar traçados devido a riscos climáticos ou a adaptação a picos imprevisíveis de procura. Esta rigidez estrutural limita também a capacidade de reação imediata a eventos disruptivos, como inundações ou tempestades.

No caso do SMLAMP, é fundamental planear e investir estrategicamente em medidas como a melhoria dos sistemas de drenagem, reforço de túneis e proteção contra cheias e ventos fortes, apesar dos custos iniciais elevados, pois evitam prejuízos futuros e aumentam a resiliência do sistema.

A incerteza surge porque os custos são suportados a curto prazo, enquanto os benefícios estendem-se por várias décadas ou séculos, o que exige a aplicação de taxas de desconto para avaliar o valor presente dos benefícios futuros. Medidas muito caras ou com benefícios incertos devem ser adiadas para fases posteriores, permitindo incorporar novos conhecimentos e gerir riscos.

Além da análise custo-benefício, deve considerar-se o tempo de execução, a vida útil das intervenções e a evolução do desempenho face às alterações climáticas. No Metro do Porto, o horizonte temporal da análise situa-se entre 40 e 60 anos.

Sempre que possível, deve preferir-se uma abordagem faseada para a adaptação, reduzindo riscos e permitindo melhores condições financeiras e técnicas. Contudo, para infraestruturas complexas, como as do Metro, muitas vezes é necessário realizar grandes intervenções numa única fase, implicando investimentos elevados desde o início.

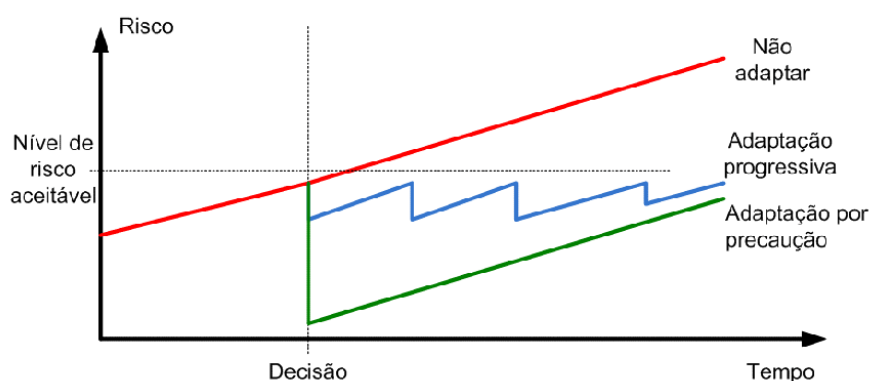


Figura 62 - Evolução do risco ao longo do tempo em função de diferentes estratégias de adaptação [27]

Ainda que os custos de adaptação sejam relativamente fáceis de quantificar, o verdadeiro desafio encontra-se na estimativa dos benefícios. Estes manifestam-se muitas vezes de forma indireta, através da prevenção de falhas, da proteção de equipamentos sensíveis ou da redução do tempo de inatividade do serviço. Cada episódio de inundação evitado, por

exemplo, pode representar milhares de euros em poupanças, além de evitar danos da reputação e perda de confiança dos seus utilizadores.

A definição de estratégias de adaptação para o Metro do Porto deve apoiar-se numa análise económica sólida, capaz de quantificar não apenas os custos imediatos das medidas, mas também os benefícios futuros associados à redução de riscos. Os custos correspondem a investimentos tangíveis – obras de engenharia, instalação de equipamentos de monitorização, reforço estrutural – enquanto os benefícios se traduzem em prejuízos evitados, segurança reforçada, continuidade operacional e ganhos de reputação. A principal dificuldade é que os custos são sentidos no curto prazo, enquanto os benefícios se prolongam por décadas, exigindo metodologias de avaliação baseadas no valor presente líquido e na aplicação de taxas de desconto.

No caso do Metro do Porto, as medidas de adaptação podem agrupar-se em três eixos principais:

- *Reforço físico das infraestruturas*: inclui o aumento da capacidade de drenagem em estações subterrâneas críticas (Trindade, Bolhão, Campo 24 de Agosto), o reforço estrutural de túneis em zonas de maior exposição hídrica, a aplicação de materiais resistentes à corrosão em linhas na zona do litoral e a instalação de barreiras móveis contra inundações.
- *Modernização tecnológica*: envolve a introdução de sistemas de ventilação inteligente com sensores térmicos, a monitorização em tempo real de níveis de água e salinidade, redes elétricas inteligentes e sistemas de climatização de elevada eficiência para reduzir falhas em ondas de calor.
- *Medidas operacionais*: abrangem protocolos de encerramento preventivo, planos de evacuação testados, sistemas de alerta precoce integrados com as previsões do IPMA e programas de formação contínua para trabalhadores, aumentando a capacidade de resposta imediata a fenómenos extremos.

Para a MP, agir cedo significa não apenas reduzir custos futuros, mas também aumentar a confiança da população no sistema, melhorar a qualidade do serviço e alinhar a rede com as boas práticas internacionais de mobilidade resiliente. Medidas como drenagem reforçada em estações centrais, barreiras contra cheias em zonas críticas e revestimentos anticorrosivos nas linhas da zona do litoral não devem ser vistas apenas como investimentos técnicos, mas como garantias de continuidade de um serviço essencial à mobilidade metropolitana.

5.3 Medidas de Adaptação

5.3.1 Estrutura das medidas de adaptação

As medidas de adaptação delineadas para o Metro do Porto organizam-se estrategicamente em três categorias principais: infraestruturas cinzentas, infraestruturas verdes e medidas não estruturais, as quais, de forma sinérgica, visam reduzir a vulnerabilidade do sistema, ampliar a sua capacidade adaptativa e assegurar uma resposta sustentável e proativa aos riscos climáticos atuais e futuros. A adaptação do sistema foi pensada a partir de duas linhas de pensamento: as medidas de mitigação e as medidas de adaptação, que se encontram descritas de seguida.

Medidas de Adaptação

Medida 1A: Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS) e Mitigação da Precipitação

Face aos fenómenos de precipitação intensa e irregular, é imperativo desenvolver uma estratégia de gestão de águas pluviais que seja resiliente, multifuncional e integrada no tecido urbano. A filosofia central dos SUDS é imitar o ciclo hidrológico natural, gerindo a água no local onde cai, em vez de a expedir rapidamente para os coletores públicos. Esta abordagem previne a sobrecarga das redes de drenagem e oferece benefícios ecológicos e sociais adicionais.

Ação 1: Pavimentos Permeáveis em Zonas Pedonais e de Baixo Tráfego

Substituição de superfícies de betão betuminoso por materiais porosos que permitem a infiltração direta da água no solo. Seria necessário a limpeza regular e evitar zonas com elevada deposição de sedimentos. Como vantagens poderá observar-se a redução do escoamento superficial, mitigação de ilhas de calor, bem como a utilização da água absorvida para outros fins.

Ação 2: Jardins de chuva/canteiros pluviais

São depressões paisagísticas alongadas (valas) ou em bacias (jardins) preenchidas com vegetação nativa e tolerante a inundações (ex: lírios, juncos). Canalizam e retêm temporariamente a água da chuva, permitindo infiltração lenta e evapotranspiração.

Como vantagens, para além da função hidráulica, valorizam esteticamente o espaço público, promovem a biodiversidade e arrefecem o ambiente urbano.

Ação 3: Bacias de Retenção e Detenção Multifuncionais:

Estas bacias são o elemento central de retenção. As bacias de detenção armazenam água temporariamente, libertando-a lentamente para a rede, prevenindo inundações a jusante. As bacias de retenção promovem a infiltração total da água no local.

Em períodos secos, podem funcionar como parques, anfiteatros, campos de jogos ou zonas de lazer. Em eventos de chuva, transformam-se em lagos temporários, cumprindo a sua função hidráulica sem comprometer a segurança.

Ação 4: Barreiras Móveis Anti Inundação - Proteção de Infraestruturas Críticas

As estações subterrâneas são pontos extremamente vulneráveis. A sua proteção requer soluções de engenharia robustas e de ativação rápida. Têm como função o impedimento de inundação nos acessos vulneráveis à água: entradas de passageiros, acessos viários, ventilações e claraboias. Implementação de sensores de nível de água colocados nas ruas adjacentes que disparam alertas e podem mesmo comandar o encerramento automático das barreiras antes que a ameaça se materialize, sem depender de intervenção humana. Prevê-se a redução do impacto de eventos críticos no contexto de precipitação elevada, melhoria da qualidade de utilização do serviço, prevenção da degradação das infraestruturas.

Medida 2A: Telhados Coletores e Aproveitamento de Águas Pluviais –Valorização do Recurso

Em vez de ver a água da chuva como um problema, esta solução encara-a como um recurso valioso, promovendo a economia circular de água.

Ação 1: Telhados Coletores

As coberturas das estações, parques de estacionamento e oficinas são transformadas em superfícies de captação. A água é canalizada através de caleiras e para um sistema de filtragem (para remover folhas e outros sólidos) e subsequentemente para cisternas subterrâneas de armazenamento, onde posteriormente serão aproveitadas para outros fins de valorização dos mesmos, como, por exemplo descarga de sanitas, limpeza de espaços e rega de espaços verdes.

Como vantagens prevê-se a redução significativa do consumo de água da rede pública (potável), levando a poupanças financeiras substanciais e aumentando a autonomia do sistema face a cenários de seca.

Medida 3A: Mitigação ação dos ventos fortes

Para fazer face a ventos fortes, propõe-se:

Ação 1: Barreiras corta-vento e deteção de obstáculos

Instalação de barreiras corta-vento naturais ou artificiais ao longo das linhas mais expostas, com o intuito de impedir que a ação erosiva do vento danifique os equipamentos e a via. Paralelamente a implementação de sensores de deteção de obstáculos em tempo real, promove a Longevidade da infraestrutura e monitorização ativa das condições da via.

Ação 2: Gestão fitossanitária

Implementação de um plano de gestão fitossanitária contínua da vegetação adjacente às infraestruturas, assegurando a execução de podas fitossanitárias e de formação em conformidade com os ciclos biológicos das espécies e as épocas do ano mais adequadas,

de modo a garantir a sua vitalidade, controlar o crescimento e prevenir riscos para a operação e segurança dos sistemas de transporte.

Como vantagens prevalece a prevenção de riscos para a operação e segurança dos sistemas de transportes, reduzindo o número de árvores caídas na via.

Medida 4A: Regulação de temperatura

Ação 1: Coberturas Verdes e “Jardins Verticais”

A instalação de coberturas verdes e jardins verticais nos abrigos das estações ou em telhados de estações subterrâneas, como, por exemplo, na estação da Trindade. Esta ação tem como objetivo reduzir o efeito de ilha de calor urbano, melhorar o isolamento térmico das edificações e promover a biodiversidade, bem como a retenção de águas pluviais e melhoria da qualidade do ar e do conforto térmico nas áreas envolventes.

Ação 2: Elevadores

Implementação de sistema de ar condicionado dedicado à casa das máquinas, com regulação da temperatura para a eficiência ideal dos equipamentos. Aplicação de painéis de material isolante nas paredes e teto das casas das máquinas. Esta ação promove o arrefecimento do ambiente de trabalho dos elevadores em dias de maior calor, impedindo que estes deixem de funcionar, melhorando a qualidade de vida a utilizadores com mobilidade reduzida.

Ação 3: Estruturas e veículos

Aplicação de materiais de elevada refletância nas paredes e vidros das carruagens, contribuindo para a minimização da absorção de calor nos veículos, garantir o conforto térmico no interior das carruagens em eventos de calor intenso.

Medidas de mitigação

Medida 1M: Expansão da Geração de Energia Renovável

A estratégia energética para o setor dos transportes assenta em dois pilares fundamentais: a maximização da eficiência energética e a diversificação das fontes de energia, com vista à redução da pegada carbónica, à garantia de resiliência operacional e à minimização de custos. As medidas propostas integram tecnologias maduras e inovadoras, alinhadas com as melhores práticas internacionais.

Ação 1: Instalação Generalizada de Painéis Fotovoltaicos

A instalação generalizada de painéis fotovoltaicos é uma medida estratégica de alto A instalação de painéis fotovoltaicos em coberturas de estações, parques de estacionamento (*Park and Ride*) e ao longo das linhas (em zonas desimpedidas) permite aproveitar a elevada irradiação solar da região. Esta medida não só gera energia limpa, mas também oferece sombreamento, reduzindo o calor em dias de temperaturas elevadas. As

vantagens incluem a redução de custos operacionais, a potencial venda de excedentes à rede nacional, o alinhamento com metas europeias de sustentabilidade e o reforço da imagem institucional.

Ação 2: Sistemas de Armazenamento e Gestão de Energia: Baterias Estacionárias

A instalação de baterias estacionárias em pontos estratégicos da rede (como por exemplo subestações, centrais de alimentação ou interfaces de passageiros) para armazenar excedentes de energia gerada por painéis fotovoltaicos ou pela travagem regenerativa dos veículos. Esta energia por sua vez é disponibilizada durante a noite, em picos de procura ou em situações de falha de rede (como por exemplo no apagão de 28 de abril de 2025), assegurando a estabilidade do sistema e fornecendo backup crítico a operações essenciais. Como vantagens inerentes, há a redução de custos com energia comprada em horas de ponta e melhoria da fiabilidade do sistema bem como melhoria da sustentabilidade, uma vez que há a maximização do aproveitamento de fontes renováveis, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

Ação 3: Travagem Regenerativa

Os motores dos veículos funcionam como geradores durante a travagem, convertendo energia cinética em energia elétrica, por sua vez esta energia será consumida por outros veículos ou injetada na rede interna do metro para alimentar estações ou outros equipamentos importantes ao funcionamento do sistema. Indo ao encontro da ação anterior (Ação 3), poderá mesmo ser armazenada nas baterias estacionárias para uso posterior.

Como vantagens detalhadas, salientam-se a promoção da economia circular, uma vez que se cria um ciclo de energia dentro do próprio sistema de transporte, redução de custos de energia bem como a redução do desgaste, uma vez que se diminui o uso dos travões físicos, reduzindo os custos de manutenção de travagem.

Ação 4: Medidas Complementares de Eficiência Energética

Implementação LED inteligente, recorrer à substituição de toda a iluminação convencional por LED, em estações, túneis e oficinas. Acoplada de sensores de movimento e luminosidade, ou seja, a iluminação adapta-se à presença de pessoas e à luz natural disponível ao longo do dia. Outro ponto seria a eletrificação de frotas auxiliares, substituindo os veículos que ainda sejam a diesel ou gasolina por versões elétricas.

Como vantagens à semelhança de outras ações já mencionadas, a passagem para LED inteligente poderia reduzir o consumo base de eletricidade, a melhoria da qualidade do ar, visto que se elimina as emissões locais de poluentes e gases com efeitos de estufa dentro das instalações da empresa (como oficinas) bem como no exterior. Além disso a implementação de iluminação adaptativa garante níveis de luz adequados, melhorando a experiência do utilizador.

Medida 2M: Sensibilização e promoção da sustentabilidade

No âmbito da sensibilização e promoção da sustentabilidade, considera-se crucial a implementação das seguintes iniciativas:

Ação 1: Programas de literacia climática

Desenvolvimento de programas contínuos de literacia climática dirigidos a passageiros e colaboradores, complementados por mecanismos de gamificação. Pretende-se aproveitar os elementos visuais das estações e veículos para veículos com informação pertinente, reforçando o papel dos transportes públicos na descarbonização e incentivando a sua utilização como opção consciente e responsável. Como vantagens pretende-se aumentar a consciencialização geral para a importância da sustentabilidade e alterações climáticas.

Ação 2: Parcerias com Universidades

Estabelecimento de parcerias estratégicas com instituições de ensino superior, integrando projetos académicos em iniciativas de valor aplicado no sistema de transportes, o que seria benéfico para os alunos de desenvolver competências em contextos reais e com utilidade prática, e benefício para empresa no acesso a conhecimentos atualizados e a visões inovadoras, fomentando uma dinâmica de intercâmbio contínuo entre a universidade e o setor empresarial.

Ação 3: Digitalização dos bilhetes físicos

Neste momento, a forma de validação da viagem nos veículos realiza-se maioritariamente através de um cartão físico recarregável. Embora já haja um esforço por parte da MP, em realizar a transição para o digital, a mesma ainda não está totalmente implementada e ainda incorpora poucos sistemas operativos. A digitalização dos títulos de transporte físicos para suporte digital, com validação dinâmica e renovação automática, constitui uma medida estratégica de adaptação às alterações climáticas ao reduzir significativamente o consumo de recursos materiais, como plástico e papel, minimizando a pegada carbónica associada à sua produção e gestão de resíduos. Como vantagens adicionais, a melhoria da experiência do utilizador bem como a redução dos custos operacionais com reposição de títulos físicos e manutenção dos equipamentos de recarregamento.

5.4 Classificação das medidas de adaptação

As medidas propostas são classificadas em três categorias principais, de acordo com a sua natureza e objetivo principal:

1. *Infraestruturas Cinzentas* (Soluções de Engenharia Convencional e Tecnológica)

- *Sistemas de Energia*: Instalação de painéis fotovoltaicos, Baterias estacionárias para armazenamento de energia e os Sistemas de travagem regenerativa.

- *Proteção contra Inundações*: Barreiras móveis anti inundação (ex.: metálicas, insufláveis) e os Sistemas de drenagem urbana (ex.: bacias de retenção/detenção).
- *Gestão Térmica e Resiliência*: Sistemas de ar condicionado para casas de máquinas de elevadores, Ventilação termostática forçada, Sensores IoT para monitorização de temperatura e as Películas de controlo solar em vidros de carruagens.
- *Proteção contra Ventos Fortes*: Barreiras corta-vento e os Sensores de deteção de obstáculos em tempo real.

2. *Infraestruturas Verdes* (Soluções Baseadas na Natureza - SbN)

- *Gestão de Águas Pluviais*: Pavimentos permeáveis, Valas de drenagem e canteiros pluviais e Bacias de retenção multifuncionais (com uso recreativo em períodos secos).
- *Controlo Térmico e Ambiental*: Coberturas verdes e jardins verticais em estações e os Materiais de elevada refletância (pavimentos frios, revestimentos claros).
- *Proteção contra Ventos*: Barreiras corta-vento recorrendo à vegetação.
- *Gestão da Vegetação*: Planos de manutenção fitossanitária e podas seletivas.

3. *Medidas Não Estruturais* (Organizacionais, de Gestão e Sensibilização)

- *Cooperação e Inovação*: Parcerias com instituições de ensino superior para projetos aplicados.
- *Sensibilização Pública*: Programas de literacia climática com gamificação e Campanhas de promoção do uso dos transportes públicos.
- *Digitalização dos bilhetes de transporte*

A força das medidas de adaptação propostas na presente dissertação, reside na complementaridade e sinergia entre os diferentes tipos de medidas, criando um ecossistema de resiliência onde o todo é maior do que a soma das partes.

Por exemplo, os painéis fotovoltaicos instalados em coberturas de estações e parques de estacionamento geram energia limpa que alimenta bombas de água para sistemas de reutilização de águas pluviais e sistemas de ar condicionado que arrefecem casas de máquinas de elevadores. As coberturas verdes sob os painéis solares reduzem a temperatura local, aumentando a eficiência dos painéis fotovoltaicos e simultaneamente retendo águas pluviais, que são depois reaproveitadas.

Na proteção integrada contra inundações e calor, as bacias de retenção e pavimentos permeáveis gerem as águas pluviais na origem, reduzindo a carga sobre os sistemas de drenagem. Esta água armazenada é usada para regar os jardins verticais e coberturas verdes que, por sua vez, arrefecem as estações e reduzem a necessidade de ar condicionado. As barreiras móveis protegem as estações subterrâneas de cheias, enquanto

os sistemas de alerta precoce garantem que estas são ativadas a tempo, com base em dados de sensores IoT.

A resiliência operacional é fortalecida através da combinação de dados e competência humana. Sensores IoT monitorizam a temperatura das casas de máquinas, o nível da água nas vias e a velocidade do vento. Estes dados alimentam sistemas de gestão de energia e algoritmos de controlo inteligente, que otimizam o consumo energético e previnem avarias. A formação técnica e os simulacros de emergência capacitam os colaboradores para interpretar estes dados e atuarem de forma eficaz, fechando o ciclo entre tecnologia e competência humana.

As infraestruturas verdes, como jardins, telhados verdes e canteiros pluviais, não só gerem recursos como melhoram a qualidade do ar, reduzem o ruído e valorizam esteticamente o espaço público, atraindo mais passageiros [28].

As parcerias com universidades geram inovação contínua, como o desenvolvimento de materiais mais reflexivos ou algoritmos de previsão de falhas, reduzindo custos de operação a médio prazo.

Assim, esta abordagem sinérgica transforma o Metro do Porto num sistema adaptativo, eficiente e circular, onde a água, a energia e os recursos são otimizados em ciclo fechado. Mais do que uma lista de medidas, propõe-se uma rede de soluções interligadas que garantem que o sistema não só resiste a ameaças climáticas, como emerge delas mais forte, sustentável e preparado para o futuro.

5.5 Avaliação e priorização

A avaliação das medidas propostas seguiu uma metodologia multidimensional, considerando critérios de impacto potencial na resiliência do sistema e urgência de implementação face às projeções climáticas. Esta análise permitiu estabelecer uma hierarquização clara das intervenções, organizada em três níveis de prioridade e horizontes temporais distintos.

As medidas classificadas com prioridade alta concentram-se na prevenção de riscos imediatos e críticos para a operação do sistema. Incluem o reforço dos sistemas de drenagem e instalação de barreiras móveis contra inundações em estações subterrâneas, o melhoramento dos sistemas de climatização e ventilação para fazer face ao aumento de temperaturas, e a gestão ativa da vegetação circundante para prevenir danos causados por ventos fortes. Estas intervenções, a implementar até 2030, intervêm nos riscos mais urgentes identificados nas projeções climáticas

As medidas de prioridade média focam-se no reforço progressivo da resiliência sistémica e na modernização tecnológica da rede. Incluem a implementação de sistemas de baterias estacionárias e travagem regenerativa, a construção de bacias de retenção e pavimentos permeáveis, a instalação de coberturas verdes e sensores de deteção de obstáculos, e programas de formação contínua para trabalhadores. Estas ações, calendarizadas para

2031-2035, permitirão uma transição gradual para um sistema mais adaptado às condições climáticas futuras.

As medidas de prioridade baixa completam a estratégia de adaptação com intervenções complementares e ações de sensibilização. Incluem a instalação de painéis fotovoltaicos, a aplicação de pavimentos frios e revestimentos refletivos, o aproveitamento de águas pluviais, o reforço estrutural de coberturas, e campanhas de literacia climática. Estas medidas, a implementar até 2040, contribuirão para a sustentabilidade de longo prazo do sistema e para o envolvimento das comunidades.

Esta estrutura de priorização permite ao Metro do Porto dispor de um plano de ação estratégico e faseado, garantindo que os recursos são alocados de forma eficiente para responder aos riscos mais urgentes, seguindo uma abordagem de adaptação progressiva e sustentável. Primeiro os riscos mais críticos, enquanto se prepara progressivamente para os desafios climáticos das décadas futuras. A implementação bem-sucedida destas medidas transformará o Metro do Porto num sistema de transporte urbano mais resiliente, sustentável e preparado para enfrentar as alterações climáticas.

Quadro 1 - Resumo das principais propostas de adaptação e avaliação do impacto e urgência das mesmas, de forma a definir a prioridade das mesmas

Domínio	Medida	Impacto (1–3)	Urgência (1–3)	Prioridade
Temperatura	Reforço de climatização e ventilação inteligente	3	3	Alta
Temperatura	Coberturas verdes e jardins verticais	2	2	Média
Temperatura	Pavimentos frios e revestimentos refletivos	2	2	Média
Energia	Painéis solares fotovoltaicos	2	1	Baixa
Energia	Baterias estacionárias e travagem regenerativa	3	2	Média
Energia	Monitorização inteligente de consumos	2	2	Média
Precipitação	Reforço da drenagem e instalação de barreiras móveis	3	3	Alta
Precipitação	Bacias de retenção e pavimentos permeáveis	2	2	Média
Precipitação	Telhados coletores e reaproveitamento de águas pluviais	2	1	Baixa

Vento	Gestão da vegetação e limpeza regular das linhas	2	3	Alta
Vento	Sensores de deteção de folhas e obstáculos	3	2	Média
Vento	Reforço estrutural de coberturas e barreiras corta-vento	2	2	Média
Sensibilização	Formação contínua de trabalhadores	2	2	Média
Sensibilização	Campanhas de literacia climática	1	1	Baixa
Sensibilização	Parcerias com escolas e universidades	1	1	Baixa

A priorização confirma que as medidas críticas para o Metro do Porto estão ligadas à prevenção de inundações em estações subterrâneas e à adaptação ao calor extremo, ambas classificadas com prioridade alta. Estas ações devem ser implementadas de forma imediata, dada a frequência crescente dos fenómenos e os impactos já registados na operação.

As medidas de prioridade média concentram-se na modernização energética, na adaptação progressiva de infraestruturas expostas e na formação interna das equipas técnicas, assegurando uma transição gradual para uma rede mais resiliente.

Por fim, as medidas classificadas com prioridade baixa, como campanhas de sensibilização ou telhados coletores de água pluvial, assumem carácter complementar, sendo relevantes no médio e longo prazo como reforço da sustentabilidade e da ligação com a comunidade.

Este processo de avaliação e priorização permite que o Metro do Porto disponha de um plano de ação estruturado, em que as medidas mais críticas são implementadas de imediato e as restantes são calendarizadas de forma estratégica, garantindo uma adaptação climática progressiva e sustentável.

5.6 Gestão da Adaptação

O período de 2025 a 2035 constitui uma janela crítica de ação para a implementação de uma estratégia de adaptação climática robusta e multidimensional no Metro do Porto. A gestão deverá assumir uma abordagem progressiva, articulando intervenções imediatas com um planeamento de longo alcance, estruturada em três horizontes temporais complementares e sustentada por um sistema sólido de monitorização.

Curto Prazo (2025-2027): Reforço da Resposta de Emergência

O foco primordial deve ser o reforço da capacidade de resposta e resiliência operacional perante eventos climáticos extremos. As ações-chave incluem a atualização de Protocolos Operacionais: Integração automática de avisos meteorológicos do IPMA nos sistemas de controlo e definição de limiares claros para redução de velocidade, paragens preventivas e ativação de equipas de emergência.

Médio Prazo (2028-2032): Intervenções Estruturais Corretivas

A estratégia deve evoluir para intervenções físicas que corrijam vulnerabilidades já identificadas nas infraestruturas existentes. Serão prioritários:

- **Reforço de Sistemas de Drenagem:** Ampliação da capacidade de bombagem em estações subterrâneas críticas (e.g., São Bento, Trindade) e melhoria da drenagem superficial em taludes e valas.
- **Proteção contra Inundações:** Instalação de barreiras estanques móveis ou fixas em entradas de estações e acessos de túneis particularmente vulneráveis.
- **Resiliência Térmica e anticorrosiva:** Melhoria da climatização de salas de equipamentos vitais e aplicação de revestimentos anticorrosivos avançados nas linhas perto do litoral (Linhas A e B).
- **Modernização Tecnológica:** Investimento em sistemas de monitorização em tempo real (humidade e temperatura da via).

Longo Prazo (2033-2035): Integração Estratégica e Expansão Resiliente

A gestão climática deve ser plenamente integrada no planeamento estratégico e nos processos de expansão da rede. Esta fase implica:

- **Critérios de Adaptação em Projetos:** Incorporação sistemática de requisitos de resiliência (drenagem sobredimensionada, materiais tolerantes ao calor, localização a cotas seguras) nos projetos de renovação e, crucialmente, nas novas expansões (e.g., Trofa).
- **Modelos de Análise de Risco Dinâmicos:** Desenvolvimento de ferramentas de modelação que permitam simular o impacto de diferentes cenários climáticos na operação da rede.
- **Soluções Baseadas na Natureza:** Adoção de medidas complementares, como a naturalização de taludes para reduzir o risco de derrocadas ou a criação de zonas de infiltração para retenção de águas pluviais.

Por sua vez, a eficácia da estratégia deve ser continuamente aferida através de um sistema de indicadores de desempenho chave (KPIs), incluindo:

- **Tempo Médio de Recuperação:** tempo decorrido entre a ocorrência de um incidente climático e o pleno restabelecimento do serviço.
- **Percentagem de Infraestrutura Adaptada:** Evolução do estado de implementação das medidas de adaptação física.

- Redução de Interrupções: Número e duração de interrupções do serviço diretamente atribuíveis a eventos climáticos extremos.

Neste contexto, avaliação da estratégia revela um cenário bastante preocupante, uma vez que, em determinados pontos, a estratégia deixa de se limitar à “proteção”, passando a englobar medidas de “substituição” e “gestão de falhas”. A fiabilidade do sistema dependerá, portanto, da existência de planos específicos para os seus pontos mais críticos. Por outro lado, muitas soluções necessárias, como melhorias na drenagem ou na defesa costeira, ultrapassam a capacidade de intervenção direta da Metro do Porto, tornando indispensáveis estratégias integradas de adaptação a nível metropolitano, nas quais o planeamento do uso do solo e das infraestruturas públicas seja alinhado com a proteção dos ativos críticos de mobilidade. Além disso, as linhas novas, como a Linha G e a extensão até à Trofa, continuam a representar uma oportunidade significativa para evitar custos futuros de adaptação, embora os objetivos de projeto tenham de ser muito mais ambiciosos do que os atuais. Esta abordagem estruturada e colaborativa garantirá que a gestão evolua de forma proativa, assegurando não apenas a resiliência operacional imediata, mas também a sustentabilidade a longo prazo do sistema de transporte.

6.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Principais Conclusões

As alterações climáticas constituem um dos maiores desafios contemporâneos, com impactos diretos nos sistemas urbanos e, em particular, nos transportes públicos. O caso do Metro do Porto, analisado nesta dissertação, demonstra a urgência de integrar a adaptação climática no planeamento e na gestão de infraestruturas críticas de mobilidade.

O objetivo central deste estudo consistiu em avaliar os impactos das alterações climáticas sobre a infraestrutura e a operação do Metro do Porto, propondo medidas de adaptação capazes de reforçar a sua resiliência, segurança e sustentabilidade. Para tal, foi aplicada a metodologia *ADAM*, complementada com projeções climáticas regionais (RCP 4.5 e RCP 8.5) e análises espaciais desenvolvidas no *Google Earth Pro*. Este processo permitiu identificar vulnerabilidades críticas, hierarquizar riscos e priorizar intervenções.

Os resultados evidenciaram que os principais riscos climáticos para o Metro do Porto se relacionam com a ocorrência de precipitação intensa, que potencia inundações principalmente em estações subterrâneas, com as temperaturas extremas e ondas de calor, que afetam carris, catenárias e equipamentos técnicos, comprometendo a fiabilidade operacional e com os ventos fortes, que provocam danos, maioritariamente, em linhas de superfície, quedas de árvores e interrupções no serviço. Estes fenómenos, já responsáveis por custos adicionais de manutenção e constrangimentos na operação, tenderão a intensificar-se, aumentando os riscos para a segurança e o conforto dos utilizadores.

Para responder a estas vulnerabilidades, foram propostas medidas de adaptação enquadradas em diferentes tipologias: soluções de engenharia, como o reforço dos sistemas de drenagem e a climatização de equipamentos críticos, soluções baseadas na natureza, como coberturas vegetadas e pavimentos permeáveis e medidas de carácter não estrutural, incluindo planos de contingência, protocolos operacionais, sistemas de alerta precoce e campanhas de sensibilização. A análise demonstrou que a adaptação das estações subterrâneas e a melhoria da drenagem devem constituir prioridades imediatas, enquanto outras medidas assumem carácter complementar, contribuindo para o reforço gradual da resiliência da rede a médio e longo prazo.

Conclui-se, assim, que a adaptação climática do Metro do Porto exige uma abordagem integrada e contínua, que combine intervenções técnicas, planeamento estratégico e sensibilização social. A articulação destas medidas com instrumentos como o Plano Metroclima da Área Metropolitana do Porto e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável reforça a sua pertinência, permitindo alinhar a ação local com compromissos nacionais e internacionais de combate às alterações climáticas.

Não obstante, reconhecem-se limitações, relacionadas sobretudo com a resolução espacial dos dados climáticos disponíveis, que não permite análises microclimáticas detalhadas por estação, e com a ausência de uma avaliação económica completa das medidas propostas, através de análises custo-benefício ou custo-eficácia, que possibilitariam uma hierarquização mais objetiva. Torna-se igualmente relevante aprofundar a definição de indicadores de monitorização que permitam avaliar periodicamente a eficácia das medidas e introduzir ajustamentos em função da evolução climática.

6.2 Trabalhos futuros

A investigação realizada abre caminho a várias linhas de aprofundamento.

Em primeiro lugar, destaca-se a necessidade de desenvolver uma avaliação económica detalhada das medidas propostas. A análise custo-benefício e custo-eficácia permitirá comparar investimentos com os benefícios decorrentes da redução de falhas, interrupções e danos, fornecendo um suporte mais robusto à priorização e calendarização de intervenções.

Em segundo lugar, a integração de sistemas de monitorização em tempo real constitui um eixo fundamental. A instalação de sensores de temperatura, humidade, salinidade, qualidade do ar e níveis de água permitiria disponibilizar dados contínuos para plataformas digitais de apoio à decisão, possibilitando uma gestão mais dinâmica e adaptativa da rede.

Outro campo de investigação futura diz respeito à articulação com políticas urbanas e regionais. A resiliência do Metro do Porto depende também da coordenação com planos municipais de drenagem, programas de gestão costeira e iniciativas de arborização urbana. A integração destas dimensões num quadro metropolitano de adaptação climática permitirá reforçar a eficácia das medidas.

A participação pública e a perceção social constituem igualmente dimensões críticas. Estudos baseados em inquéritos, campanhas de consulta ou projetos de co-criação podem contribuir para alinhar soluções técnicas com as expectativas da comunidade, reforçando a aceitação social e a confiança dos utilizadores.

Por último, sublinha-se a necessidade de atualização periódica dos estudos de vulnerabilidade, em função da evolução dos modelos climáticos regionais e do enquadramento político nacional e europeu. Esta atualização garantirá que a Metro do Porto mantém a sua capacidade de resposta perante novos desafios climáticos.

Em síntese, os trabalhos futuros deverão aprofundar as dimensões económica, tecnológica, institucional e social da adaptação climática, assegurando que o Metro do Porto se consolida como referência de resiliência urbana e como ator fundamental na construção de uma Área Metropolitana mais sustentável e preparada para as transformações do clima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IPCC, “Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” Cambridge University Press, 2023.
- [2] APA, “Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas 2020 (ENAA 2020),” Lisboa, Portugal, 2015.
- [3] EEA, “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019,” EEA - European Environment Agency, 2019.
- [4] Porto., “Plano Municipal de Adaptação às Ações Climáticas do Porto 2030,” 2025.
- [5] EEA, “The European environment — state and outlook 2020,” EEA - European Environment Agency, 2020.
- [6] UNCC, “Annual Report 2022,” UNCC - United Nations Climate Change, 2022.
- [7] Porto., “Plano Municipal de Ação Climática do Porto - Caderno I – Avaliação de Riscos e Vulnerabilidades,” Simbiente, Porto, 2024.
- [8] WHO, “WHO Results Report,” WHO - World Health Organization, 2020.
- [9] Assembleia da República, “Lei n.º 98/2021, de 31 de dezembro — Lei de Bases do Clima,” 21 Dezembro 2021. [Online]. Available: <https://files.dre.pt/1s/2021/12/25300/0000500032.pdf>. [Acedido em 19 09 2025].
- [10] UNFCCC, “Paris Agreement,” em *Paris Climate Change Conference*, Paris, 2015.
- [11] Comissão Europeia, “O Pacto Ecológico Europeu,” 2019. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0008.02/DOC_1&format=PDF. [Acedido em 19 09 2025].
- [12] APA, “Programa de Ação para a Adaptação às Alterações Climáticas (P-3AC),” APA - Agência Portuguesa do Ambiente, 2023.
- [13] APA, “Roteiro Nacional para a Adaptação 2100 (RNA 2100),” APA - Agência Portuguesa do Ambiente, 2023.
- [14] AMP, “METROCLIMA – ADAPTAÇÃO ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA ÁREA METROPOLITANA DO PORTO (AMP): CONHECER, PLANEAR, COMUNICAR, ANTECIPAR,” AMP - Área Metropolitana do Porto, 2020.

- [15] S. S. P. B. S. K. M. B. M. Z. a. W. K. Kerstin Fritzsche, “The Vulnerability Sourcebook-Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments”.
- [16] T. C. L. V. K. Luís Dias, “Manual Avaliação de vulnerabilidades atuais,” SBN: 978-989-99084-8-2., Lisboa, 2016.
- [17] A. C. R. Leitão, “As alterações climáticas e os transportes: As políticas públicas de mitigação de emissões no setor dos transportes em Portugal,” 2022.
- [18] L. K. V. e. a. Dias, “ClimAdaPT.Local – Manual Avaliação de Vulnerabilidades Futuras,” 2016.
- [19] IPMA, “Portal do Clima - Dados,” 2025. [Online]. Available: ipma.pt/pt/oclima/portaldoclima/. [Acedido em setembro 2025].
- [20] DGAL, “Portal Autarquico - Áreas Metropolitanas,” Direção Geral das Autarquias Locais, 2025. [Online]. Available: <https://portalautarquico.dgal.gov.pt/pt-PT/entidades-locais/areas-metropolitanas/area-metropolitana-do-porto/>. [Acedido em 22 Setembro 2025].
- [21] Metro do Porto, S.A, “Concurso Público para a Subconcessão do Sistema de Transporte da MP, S.A. Caderno de Encargos,” Metro do Porto, Porto, 2017.
- [22] Metro do Porto, “Mapas e horários: Mapa da Rede,” 24 março 2025. [Online]. Available: <https://www.metrodoporto.pt/pages/337>. [Acedido em setembro 2025].
- [23] Metro do Porto, “Relatório de sustentabilidade 2022-2024,” Porto, 2025.
- [24] Porto Canal, “Queda de árvore corta circulação do metro do Porto em Matosinhos,” Porto, 2025.
- [25] Weather Spark, “Histórico de condições meteorológicas em 2001 em Porto Portugal,” 2025. [Online]. Available: <https://pt.weatherspark.com/h/y/32397/2001/Condi%C3%A7%C3%B5es-meteorol%C3%B3gicas-hist%C3%B3ricas-durante-2001-em-Porto-Portugal>. [Acedido em setembro 2025].
- [26] AMPorto, “Plano Metropolitano de Adaptação às Alterações Climáticas,” Metroclima, Porto, 2017.
- [27] R. Proença de Oliveira e J. Saldanha Matos, “Estratégias de adaptação dos sistemas de abastecimento de água aos impactos das alterações climáticas,” IST, Lisboa, 2009.
- [28] EEA, “Nature-based solutions in Europe: Policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction,” EEA - European Environment Agency, 2021.

- [29] Naturlink, “TERRA À TERRA - Projecto de Compostagem Caseira,” 2009. [Online]. Available: <http://naturlink.sapo.pt>. [Acedido em Março 2012].
- [30] J. F. d. C. Oliveira e M. A. d. S. L. d. Carravilla, “Optimização Combinatória: modelos e algoritmos,” 2001.
- [31] H.-M. F. a. R. J. T. KLEIN, “Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking,” pp. 306-307, 2006.
- [32] H. Hajmohammadi e B. Heydecker, “Evaluation of air quality effects of the London ultra-low emission zone by state-space modelling,” *Atmospheric Pollution Research*, vol. 13, nº 8, 2022.
- [33] Município do Porto, “Plano Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas,” 2016.
- [34] Assembleia da República, “Decreto-Lei 173/2011 - Diário da República, 1.ª série — N.º 116 — 17 de Junho de 2011,” Diário da República, Lisboa, 2011.