



Universidade de Aveiro
2021

**Daniel Fernandes
Graça**

**Padrões temporais e espaciais da qualidade do ar
em Aveiro com base numa rede de monitorização
com sensores**



Universidade de Aveiro
2021

Padrões temporais e espaciais da qualidade do ar em Aveiro com base numa rede de monitorização com sensores

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Doutora Myriam Alexandra dos Santos Batalha Dias Nunes Lopes, Professora Associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e co-orientação científica da Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda, Professora Catedrática do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Apoio financeiro do Fundo de Desenvolvimento Regional Europeu da União Europeia no âmbito do programa europeu *Urban Innovative Actions*.



European Union
European Regional Development Fund



o júri
presidente

Professora Doutora Ana Paula Duarte Gomes
Professora Auxiliar, Universidade de Aveiro

Doutor Carlos Miguel de Sousa Silveira
Investigador, Instituto Politécnico de Bragança - Centro de Investigação de
Montanha

Professora Doutora Myriam Alexandra dos Santos Batalha Dias Nunes Lopes
Professora Associada, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Esta dissertação é o resultado da colaboração entre várias entidades, instituições e pessoas, que apoiaram diferentes fases deste trabalho. Entre elas agradeço especialmente:

À minha orientadora, Professora Myriam Lopes, e co-orientadora, Professora Ana Isabel Miranda, pelo incentivo, conselhos, disponibilidade e ajuda neste caminho de aprendizagem para concretizar os meus objetivos.

A todos os elementos do GEMAC pelas preciosas contribuições e conselhos. Em especial à Doutora Carla Gama, Doutor Diogo Lopes, Doutoranda Ana Ascenso e Doutorando Michael Russo, pelo tempo despendido na transmissão de conhecimentos e ajudas na prática, com programação em *Python* e R, indispensáveis para este trabalho. À Doutoranda Sandra Sorte e Doutoranda Ana Ascenso pela partilha de conhecimentos e no auxílio no trabalho.

Ao Johnny Reis pelo companheirismo e envolvimento no projeto.

A todos os elementos do Projeto Aveiro STEAM City, em especial à equipa do Caso de Estudo do Ambiente, pelo apoio no desenvolvimento das minhas competências.

À Câmara Municipal de Aveiro, por ter abraçado este projeto.

À Monitar - Engenharia do Ambiente, Lda pela gestão das estações de monitorização desde a sua instalação às ações de manutenção e transmissão de conhecimentos.

E à minha namorada pelo apoio e motivação que sempre me deu.

palavras-chave

Sensores, qualidade do ar, áreas urbanas, estações de monitorização, meteorologia, Aveiro

resumo

No âmbito do projeto *Aveiro STEAM City*, esta dissertação analisa os padrões temporais e espaciais da qualidade do ar na cidade de Aveiro com base em dados de monitorização ambiental provenientes de uma rede composta por 9 estações de monitorização com sensores de qualidade do ar e 2 estações meteorológicas, distribuídas por locais previamente selecionados na cidade de Aveiro.

Durante o período de medição de junho de 2020 a março de 2021, os sensores responderam de forma adequada e de forma aproximada às estações de referência, tendo, no entanto, apresentado algumas oscilações e problemas de sensibilidade que foram resolvidos com manutenções.

Os resultados mostraram que a qualidade do ar em Aveiro foi predominantemente boa, mas bastante afetada pelo tráfego rodoviário pendular, visível principalmente nos padrões diários das concentrações de PM10, PM2,5 e NO₂. Para além destas fontes de poluição atmosférica, o aumento da combustão residencial no inverno (janeiro) e a ocorrência de um incêndio de grandes dimensões em setembro contribuíram em grande parte para os índices de qualidade do ar médios, fracos e maus, e ultrapassagens aos valores legais.

keywords

Sensors, air quality, urban areas, monitoring stations, meteorology, Aveiro

abstract

Within the scope of the Aveiro STEAM City project, this dissertation analyses the temporal and spatial patterns of air quality in the city of Aveiro based on environmental monitoring data from a network comprising 9 monitoring stations with air quality sensors and 2 stations weather, distributed by previously selected locations in the city of Aveiro.

During the measurement period from June 2020 to March 2021, the sensors responded in an adequate and approximate way to the reference stations, having, however, presented some oscillations and sensitivity problems that were solved with maintenance.

The results showed that the air quality in Aveiro was predominantly good, but quite affected by commuting road traffic, visible mainly in the daily patterns of concentrations of PM₁₀, PM_{2.5} and NO₂. In addition to these sources of atmospheric pollution, the increase in residential combustion in winter (January) and the occurrence of a large fire in September contributed in large part to the average, weak and bad air quality indexes, and exceeding the legal values.

Índice

1. Introdução	1
2. Qualidade do ar em áreas urbanas	4
2.1. Poluição atmosférica em áreas urbanas e saúde humana.....	4
2.2. Emissões e dinâmicas da poluição atmosférica	5
2.3. Enquadramento legal da qualidade do ar	7
2.4. Qualidade do ar na Europa e em Portugal	11
3. Sensores de qualidade do ar	15
3.1. Tipos de sensores de qualidade do ar.....	18
3.1.1. Sensores eletroquímicos (EC).....	19
3.1.2. Sensores resistivos ou metal-óxido (MOS).....	20
3.1.3. Sensores de fotoionização (PID).....	20
3.1.4. Sensores não dispersivos por absorção de infravermelhos (NDIR)	21
3.1.5. Sensores óticos de dispersão de luz (LSPs)	22
3.2. Calibração dos sensores	23
3.3. Vantagens e desvantagens dos sensores	24
3.4. Redes de monitorização com sensores.....	26
3.5. Casos de estudo de monitorização com redes de sensores	29
4. Caso de estudo: cidade de Aveiro	33
4.1. A cidade Aveiro	33
4.2. Rede de sensores do projeto Aveiro STEAM City.....	39
4.3. Emissões atmosféricas	45
4.4. Estação da rede convencional.....	45
5. Tratamento e análise de dados	47
5.1. Metodologia	47
5.2. Eficiências das estações de monitorização	49
5.3. Análise dos dados meteorológicos.....	50
5.4. Análise da qualidade do ar	53
5.4.1. Evolução das concentrações de poluentes	54
5.4.2. Análise dos padrões temporais e espaciais.....	61
5.4.3. Análise de episódios de poluição atmosférica	67
5.5. Índices de qualidade do ar	71
6. Conclusões	75

Bibliografía.....	77
Anexos	82

Índice de Figuras

Figura 1 – Processos desde a emissão de poluentes atmosféricos até aos impactos na saúde humana e ambiente (adaptado de EEA, 2020a).....	6
Figura 2 – Média anual da concentração de NO ₂ em cada estação de monitorização de referência da Europa em 2019 (EEA, 2020b).	12
Figura 3 - Perfis médios diários das concentrações médias espaciais de PM10 e NO ₂ , por hora, observadas em (a) rural, (b) meio urbano e (c) estações de tráfego urbano, durante o período de bloqueio ou dias de bloqueio parcial (de 16 de março a 31 de maio de 2020) (Gama et al., 2021).	13
Figura 4 - Publicações científicas com o tópico "air quality" e "sensors" da <i>Web of Science Core Collection</i> (Web of Science, 2021).	16
Figura 5 - Esquema de uma célula eletroquímica (a) amperimétrica e (b) potenciométrica (adaptado de Cretescu et al., 2017).	19
Figura 6 - Esquema da estrutura de um sensor de metal óxido (adaptado de Rivai, 2014).	20
Figura 7 - Esquema de um detetor por fotoionização (adaptado de Thompson, 2016b).	21
Figura 8 - Esquema de um sensor NDIR (Thompson, 2016a).	21
Figura 9 - Contador ótico de partículas (a) e um nefelómetro (b) (adaptado de Yi et al., 2015).	23
Figura 10 - Esquema dos principais processos de validação de sensores (WMO, 2020).	24
Figura 11 - Esquema das diferentes estruturas principais numa estação de qualidade do ar com ordem crescente de complexidade.	26
Figura 12 - Arquitetura geral de uma rede de monitorização com recurso a sensores (WMO, 2020).	27
Figura 13 - Normais climatológicas das temperaturas médias, mínimas e máximas entre 1971 e 2000 para Aveiro (IPMA, 2021c).	34
Figura 14 - Variação da precipitação segundo as normais climatológicas de 1971-2000 (IPMA, 2021c).	34
Figura 15 - Rosa dos ventos para a cidade de Aveiro com dados recolhidos entre 2006 - 2013, obtido a partir de medições realizadas a 10 m de altura na torre meteorológica da Universidade de Aveiro (Sorte et al., 2018).	35
Figura 16 – Imagem de satélite (retirada do <i>google maps</i>) e divisão das freguesias do município de Aveiro (CMA, 2019b).	36
Figura 17 - Extrato da Carta da hierarquia funcional da Rede Rodoviária (Câmara Municipal de Aveiro, 2019a).	37
Figura 18 - Modos de transporte usados nas deslocações internas ao concelho (CMA, 2019a). ..	38
Figura 19 – Mapa com os locais de instalação das estações de monitorização de qualidade do ar, ruído e estações meteorológicas.	40
Figura 20 - Esquema da estação de qualidade do ar.	41

Figura 21 - Estações de monitorização da qualidade do ar no Edifício da Antiga Reitoria (esquerda), Centro de Congressos (centro), e uma estação meteorológica (direita).....	42
Figura 22 – Ficha de caracterização dos locais monitorizados.	44
Figura 23 - Emissões atmosféricas no concelho de Aveiro em 2015, 2017 e 2019, por setor de atividade.	45
Figura 24 - Índices de qualidade do ar para 2020 para as várias zonas. Na zona Norte Litoral não se obteve informação suficiente para fazer o cálculo do IQA.) (APA, 2021e).....	46
Figura 25 – Diagrama da metodologia usada para análise dos dados.....	47
Figura 26 - Intervalos de classificação da qualidade do ar para cada poluente (APA, 2021d).	49
Figura 27 - Rosas dos ventos das estações meteorológicas da Biblioteca Municipal e dos Bombeiros Velhos por estações do ano e horário diurno e noturno.....	52
Figura 28 – Variação dos acumulados diários de precipitação e da média diária de temperatura nas estações meteorológicas da Biblioteca Municipal e dos Bombeiros, respetivamente.....	53
Figura 29 - Variação das concentrações médias horárias de PM10 e PM2,5, em cada estação STEAM City e de referência mais próxima; temperatura média horária e acumulados horários de precipitação da estação meteorológica da Biblioteca Municipal, para o período analisado.	55
Figura 30 - Variação das concentrações médias horárias de CO em cada estação STEAM City e de referência mais próxima; temperatura média horária e acumulados horários de precipitação da estação meteorológica da Biblioteca Municipal, para o período analisado.	56
Figura 31 - Variação das concentrações médias horárias de NO ₂ em cada estação STEAM City e de referência mais próxima; temperatura média horária e acumulados horários de precipitação da estação meteorológica da Biblioteca Municipal, para o período analisado.	57
Figura 32 - Variação das concentrações médias horárias de O ₃ em cada estação STEAM City e de referência mais próxima; temperatura média horária e acumulados horários de precipitação da estação meteorológica da Biblioteca Municipal, para o período analisado.	58
Figura 33 – Diagramas de extremos e quartis das concentrações médias dos diferentes poluentes para cada estação de monitorização.	60
Figura 34 - Variação horária (em cima) e semanal (em baixo) das partículas (PM10 e PM2.5) para todas as estações de monitorização, nas diferentes estações do ano.	62
Figura 35 - Variação horária (à esquerda) e semanal (à direita) do CO para todas as estações de monitorização, nas diferentes estações do ano, nas diferentes estações do ano.	63
Figura 36 - Rosas de poluentes, por estações do ano, para PM10 na estação de monitorização do Museu de Arte Nova.....	64
Figura 37 - Variação horária (à esquerda) e semanal (à direita) das concentrações de NO ₂ para todas as estações de monitorização, nas diferentes estações do ano.	65
Figura 38 – Gráfico polar (<i>polarPlot</i>) com as concentrações máximas de NO ₂ a variar com a direção (de onde sopra o vento) e velocidade do vento.	65
Figura 39 - Variação horária (à esquerda) e semanal (à direita) das concentrações de O ₃ para todas as estações de monitorização nas diferentes estações do ano.	66

Figura 40 - Coluna de fumo visível na Imagem de satélite (direita) e fotografia na Universidade de Aveiro, na manhã do dia 8 de setembro de 2020 (esquerda).....	67
Figura 41 - Variação das médias diárias das concentrações de PM10 em setembro de 2020 para a estação de monitorização no Museu de Arte Nova.	68
Figura 42 – (a) Gráfico da média horária das concentrações de PM10 entre 7 e 8 de setembro de 2020 medidos na estação de monitorização no Museu de Arte Nova.(b) Gráfico da média horária das concentrações de PM10 entre 7 e 8 de setembro de 2020 medidos na estação de referência de Aveiro.	69
Figura 43 - Calendários com a médias diárias de PM10 (em cima) e o máximo diário das médias de 8h de CO (em baixo), para cada dia na estação de monitorização do Museu de Arte Nova.....	70
Figura 44 - Imagem de satélite das poeiras saarianas sob a Península Ibérica no dia 30 de março de 2021.....	71
Figura 45 - Distribuição da frequência dos índices de qualidade do ar na cidade de Aveiro para o período geral entre junho de 2020 e março de 2021.....	73

Índice de tabelas

Tabela I - Objetivos de qualidade do ar estabelecidos pela diretiva.....	11
Tabela II - Resumo das características dos diferentes tipos de sensores para gases e partículas..	25
Tabela III - Datas de instalação das estações de qualidade do ar e meteorologia.	41
Tabela IV - Principais características dos sensores implementados na rede.	42
Tabela V - Principais características dos parâmetros medidos das estações meteorológicas.	43
Tabela VI - Eficiências (%) dos dados relativos a cada estação de monitorização por poluente para o intervalo temporal considerado na análise.....	49
Tabela VII - Eficiências (%) de dados de todos os parâmetros meteorológicos de cada estação de monitorização para o intervalo temporal considerado na análise.....	50

Siglas e acrónimos

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

CCDR – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional

CE – Comissão Europeia

CO – Monóxido de Carbono

COV – Compostos orgânicos voláteis

COVNM – Compostos orgânicos voláteis Não Metálicos

CO₂ – Dióxido de Carbono

O₃ – Ozono

NO₂ – Dióxido de Azoto

PM – Matéria Particulada

PM10 – Partículas em suspensão suscetíveis de passar através de um filtro seletivo com 50% de eficiência para um diâmetro aerodinâmico de 10 µm

PM2,5 – Partículas em suspensão suscetíveis de passar através de um filtro seletivo com 50% de eficiência para um diâmetro aerodinâmico de 2,5 µm

DL – Decreto-Lei

DQ – Diretiva-Quadro

DV – Direção do Vento

EM – Estados Membros

UE – União Europeia

HR – Humidade Relativa

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental para Alterações Climáticas)

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

IQA – Índice de Qualidade do Ar

MOS – Metal Oxide Semiconductor (*Óxidos Metálicos Semicondutores*)

MP – Matéria Particulada

MQA – Monitorização da Qualidade do Ar

NDIR – Non-Dispersive Infrared (*Infravermelho Não Dispersivo*)

OMS – Organização Mundial de Saúde

OPC – Optical Particle Counter (*Contador Ótico de Partículas*)

PID – Photo Ionization Detector (*Deteção por Fotoionização*)

1. Introdução

A poluição atmosférica é reconhecida como a maior ameaça ambiental à saúde humana. Riscos como uma dieta não saudável e o tabagismo têm impactos equiparáveis em relação à exposição a poluentes atmosféricos (WHO, 2021b). Este problema é principalmente preocupante em áreas urbanas devido ao aumento da urbanização e à presença de fontes de emissões antropogênicas como tráfego rodoviário, combustão residencial para aquecimento, emissões industriais e transporte marítimo (Borrego et al., 2016; Miranda et al., 2015).

De modo a controlar a poluição atmosférica é necessário definir estratégias de melhoria da qualidade do ar que passam por planos de diminuição das emissões, e monitorização dos seus efeitos na qualidade do ar. A monitorização tem vindo a ser realizada com estações de monitorização de referência que permitem verificar a conformidade com a legislação de qualidade do ar, suportar políticas de qualidade do ar e estudar a exposição humana. No entanto, o número de estações de monitorização de referência é reduzido, tendo em conta a variabilidade espacial das áreas urbanas, impedindo um mapeamento e análise detalhada da qualidade do ar em áreas urbanas (Borrego et al., 2016; Kumar et al., 2015; Schneider et al., 2017).

Com a rápida evolução tecnológica estão disponíveis, no mercado, sensores de qualidade do ar de pequenas dimensões. O desenvolvimento destes sensores veio revolucionar a Monitorização da Qualidade do Ar (MQA), uma vez que apresentam menores necessidades energéticas e são menos dispendiosos em relação a métodos de referência, revelando uma qualidade crescente na monitorização. Estes fatores tornam possível a sua integração em estações de monitorização de dimensões reduzidas que podem ser instaladas em grande número e em localizações onde não é possível recorrer a monitorização de referência, permitindo assim monitorizar uma maior área e ajudar os decisores políticos a implementar estratégias para melhorar a qualidade do ar (Borrego et al., 2016; Schneider et al., 2017). No entanto, a crescente variabilidade de novos sensores, módulos dos sensores e estações de monitorização da qualidade do ar no mercado cria desafios em relação à concordância e reprodutibilidade dos dados medidos em relação a métodos de referência. Atualmente existem apenas alguns protocolos padronizados e específicos para avaliar a qualidade de determinados sistemas de sensores em relação a métodos de referência, não sendo estes sistemas de sensores utilizados para fins de regulamentação (Borrego et al., 2016; Kumar et al., 2015; WMO, 2020).

Vários projetos e estudos têm sido realizados em relação a redes de estações de monitorização com sensores com variados objetivos, como: comparar com métodos de referência, analisar a qualidade do ar em zonas urbanas e possíveis *hotspots* de poluição atmosférica, analisar a dispersão de poluentes, validar modelos atmosféricos, analisar a exposição humana e informar e ensinar comunidades (Schneider et al., 2017).

O projeto Aveiro STEAM City pretende criar uma cidade inteligente com o intuito de desenvolver estratégias na área da mobilidade, energia e ambiente. A área do ambiente foi responsável pela instalação de uma rede de estações de monitorização com sensores de qualidade do ar, estações meteorológicas e de ruído na malha urbana da cidade de Aveiro. Esta rede de monitorização, tem como finalidade principal a avaliação da qualidade do ar, ruído e microclima urbano e o desenvolvimento de ferramentas para comunicação e alerta aos cidadãos e decisores políticos.

A presente dissertação é desenvolvida no âmbito deste projeto e tem como objetivo analisar os padrões da qualidade do ar na cidade de Aveiro com base numa rede de estações de monitorização de qualidade do ar com sensores.

Este estudo tem bastante relevância para três grupos distintos, comunidade científica, decisores políticos e cidadãos comuns. Para a comunidade científica é importante porque são produzidas informações úteis, inovadoras e com maior detalhe sobre a qualidade do ar na cidade de Aveiro. Adicionalmente, pode ser usado como aprendizagem para a operacionalização de outras redes de sensores e para futuros avanços científicos, assim como para dar uma perspetiva da variação dos níveis de poluentes e qualidade do ar em vários pontos da cidade durante um grande período de tempo e sobre os principais fatores preponderantes para estas variações. Para os cidadãos comuns será importante principalmente para os que vivem e desenvolvem atividades em Aveiro pois possibilita-lhes perceber de uma forma geral quais são as áreas da cidade de Aveiro que têm os níveis de poluição mais elevados, assim como os períodos temporais em que os diferentes poluentes atingem os picos mais elevados. Com esta informação os cidadãos podem melhorar a sua compreensão face a esta problemática e tomar medidas para evitar a sua exposição a níveis mais elevados de poluição atmosférica. Por último, para os decisores políticos este estudo será valioso para compreender quais são os locais e períodos com maiores níveis de poluentes atmosféricos, assim como as fontes que contribuíram para esses níveis. Com base nesta informação os decisores políticos podem tomar medidas para reduzir e mitigar o impacto das fontes de emissão mais críticas, como o tráfego rodoviário, através por exemplo de modificações nas rotas e vias de trânsito em determinados locais.

Como objetivos específicos pretendeu-se: (1) Avaliar o desempenho das estações de monitorização; (2) Identificar padrões temporais da qualidade do ar na cidade de Aveiro, com eventuais eventos de poluição e/ou períodos mais críticos; (3) Fazer uma análise dos padrões espaciais e identificar os pontos mais críticos de poluição atmosférica na cidade de Aveiro; (4) Avaliar a qualidade do ar na cidade de Aveiro.

A presente dissertação organiza-se em 6 capítulos. No presente capítulo é realizado um enquadramento da importância das redes de sensores de qualidade do ar, assim como a apresentação do projeto Aveiro STEAM City e a finalidade do caso de estudo do Ambiente. Por último são referidos os principais objetivos e estrutura da dissertação.

No capítulo 2 é feito um enquadramento do estado da arte sobre poluição atmosférica em áreas urbanas e efeitos na saúde, bem como o enquadramento legal da qualidade do ar.

No capítulo 3 realiza-se um estado de arte relativamente aos sensores de monitorização de poluentes atmosféricos, os seus diferentes tipos e a forma como se organizam em estações de monitorização, assim como as suas vantagens e desvantagens e aplicações.

No capítulo 4 é apresentado o caso de estudo da cidade de Aveiro com a sua caracterização física e demográfica, principais atividades económicas, emissões atmosféricas, mobilidade urbana e qualidade do ar.

No capítulo 5 são analisados os dados de monitorização do projeto Aveiro STEAM City e avaliado o desempenho das estações de monitorização. Inclui também a análise dos padrões temporais e espaciais da qualidade do ar, sendo paralelamente explicada a metodologia utilizada.

No último capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros estudos.

2. Qualidade do ar em áreas urbanas

2.1. Poluição atmosférica em áreas urbanas e saúde humana

O ar limpo é um recurso natural e requisito básico para a vida humana (Borrego et al., 2016; Singh et al., 2021). De facto, um adulto necessita de respirar em média 13 000 litros de ar por dia (Moyer et al., 2005). No entanto, com a intensificação de atividades humanas insustentáveis e aumento da população, principalmente em áreas urbanas, este recurso encontra-se ameaçado.

A nível mundial prevê-se que as áreas urbanas absorvam virtualmente todo o crescimento populacional (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2019). Em Portugal, de acordo com o Banco Mundial, em 2020, 66,31% da população vivia em zonas urbanas, com tendência a aumentar (Anexo 2) (Trading Economics, 2021).

A intensificação do crescimento populacional e das atividades antrópicas em áreas urbanas e o consequente aumento das emissões nestas áreas reflete-se num aumento crescente de população exposta a poluentes atmosféricos (Borrego et al., 2016; Miranda et al., 2015). Devido a estes fatores a poluição atmosférica é, atualmente, a maior ameaça ambiental para a saúde humana e das maiores ameaças aos ecossistemas, agricultura e clima (EEA, 2020b; Maynard et al., 2017; WHO, 2016). Esta ameaça reflete-se na opinião dos europeus, que a consideram a segunda maior preocupação ambiental depois das alterações climáticas (EEA, 2020b).

Com o objetivo de proteger a saúde humana face a esta problemática, a Organização Mundial de Saúde (OMS) tem publicado periodicamente estudos e recomendações para a qualidade do ar de forma a ajudar os governos e a sociedade civil a reduzir a exposição humana a poluentes atmosféricos. Esta organização estima que, em 2016, a poluição do ar ambiente foi responsável por cerca de 4,2 milhões de mortes prematuras a nível mundial e que 91% da população mundial vivia em locais onde as recomendações de qualidade do ar da OMS não eram cumpridas (WHO, 2021a). Vários estudos epidemiológicos têm demonstrado que a exposição de curto e longo prazo à poluição do ar pode levar à redução da função pulmonar, infeções respiratórias, asma agravada (EEA, 2020b) e problemas cardiovasculares, consequentemente, aumentando o internamento hospitalar (Shiva Nagendra et al., 2021). Além disso, a exposição à poluição do ar ambiente está associada a impactos adversos na fertilidade, gravidez, recém-nascidos e crianças (EEA (European Environment Agency), 2017), havendo também evidências emergentes de que a exposição à poluição do ar está associada a novos casos de *Diabetes Mellitus tipo 2* em adultos e pode estar ligada à obesidade, inflamação sistémica, doença de Alzheimer e demência (EEA, 2020b).

Embora a poluição do ar afete toda a população, alguns grupos são mais suscetíveis aos seus efeitos na saúde, nomeadamente crianças, porque respiram mais ar por quilo de peso

corporal do que os adultos, idosos, grávidas e pessoas com problemas de saúde prévios (EEA, 2020b; Moyer et al., 2005). Para além destes grupos de risco, os seus efeitos na saúde dependem também da concentração de poluentes, da sua natureza, da duração da exposição aos poluentes (Shiva Nagendra et al., 2021) e de comportamentos específicos, como dieta, atividade física e tabagismo (EEA, 2020b).

Na Europa, a poluição do ar continua a ter impactos significativos na saúde da sua população, sendo esta uma das principais causas de doenças e mortes prematuras (EEA, 2020b; Silveira et al., 2016).

Na literatura, os poluentes atmosféricos mais estudados devido aos seus impactos na saúde são o material particulado (PM), o ozono troposférico (O₃), o dióxido de azoto (NO₂) e o dióxido de enxofre (SO₂), os chamados poluentes clássicos (WHO, 2019).

De entre todos os poluentes problemáticos, as PM, em particular a fração fina, partículas com um diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 2,5 µm (PM_{2,5}), são frequentemente usadas como um indicador intermediário de exposição generalizada à poluição atmosférica (WHO, 2016). Vários estudos comprovaram que este poluente está associado a elevados números de mortalidade e morbilidade, sendo a principal preocupação para a saúde pública (WHO, 2019). Adicionalmente, as PM foram classificadas como cancerígenas pela *International Agency for Research on Cancer* (IARC) (Costa et al., 2014), estando associadas a cancro do pulmão e doenças cardiovasculares e pulmonares (WHO, 2021a).

2.2. Emissões e dinâmicas da poluição atmosférica

De modo a reduzir os impactos da poluição atmosférica na saúde é necessário compreender as principais características, fontes e dinâmicas dos poluentes na atmosfera.

Em relação às suas características, os poluentes podem ser divididos em dois grupos, os primários e os secundários. Os poluentes primários são emitidos diretamente pelas fontes para a atmosfera (PM e gases como o NO₂ e Compostos Orgânicos Voláteis (COV), emitidos diretamente pelo tráfego rodoviário, indústrias e combustão residencial). Os poluentes secundários, por sua vez, resultam de reações químicas que ocorrem na atmosfera entre poluentes primários quando reunidas condições ambientais favoráveis. São um exemplo as partículas secundárias e o O₃, que resulta de reações fotoquímicas, que se estabelecem entre os óxidos de azoto (NO_x) e os COV (Shiva Nagendra et al., 2021).

As principais fontes de emissão de poluentes atmosféricos dividem-se em (1) antrópicas, de que são exemplo a indústria, os transportes, as pequenas fontes de combustão (residencial e comercial) e a agricultura, e em (2) emissões naturais que são provenientes de incêndios florestais, da vegetação, de erupção vulcânicas e da ressuspensão e transporte de poeiras.

Contudo, é importante salientar que apesar das contribuições dos diferentes setores de fontes de emissão para as concentrações de poluentes do ar ambiente, os impactos da poluição do ar dependem não apenas da quantidade de poluente emitida, mas também da proximidade da

fonte, das condições físicas dos poluentes emitidos e outros fatores, como a topografia e meteorologia. Os setores de emissão que emitem a altitudes mais baixas, como tráfego e emissões domésticas, normalmente têm uma maior contribuição para as concentrações junto à superfície e, conseqüentemente, impactos mais significativos sobre a saúde humana são expectáveis em comparação com as emissões industriais, que por norma são lançadas na atmosfera a partir de chaminés elevadas (EEA, 2020b).

Na Figura 2 é possível visualizar de forma resumida os principais fatores que influenciam o percurso dos poluentes na atmosfera desde a emissão até aos impactos na saúde humana.

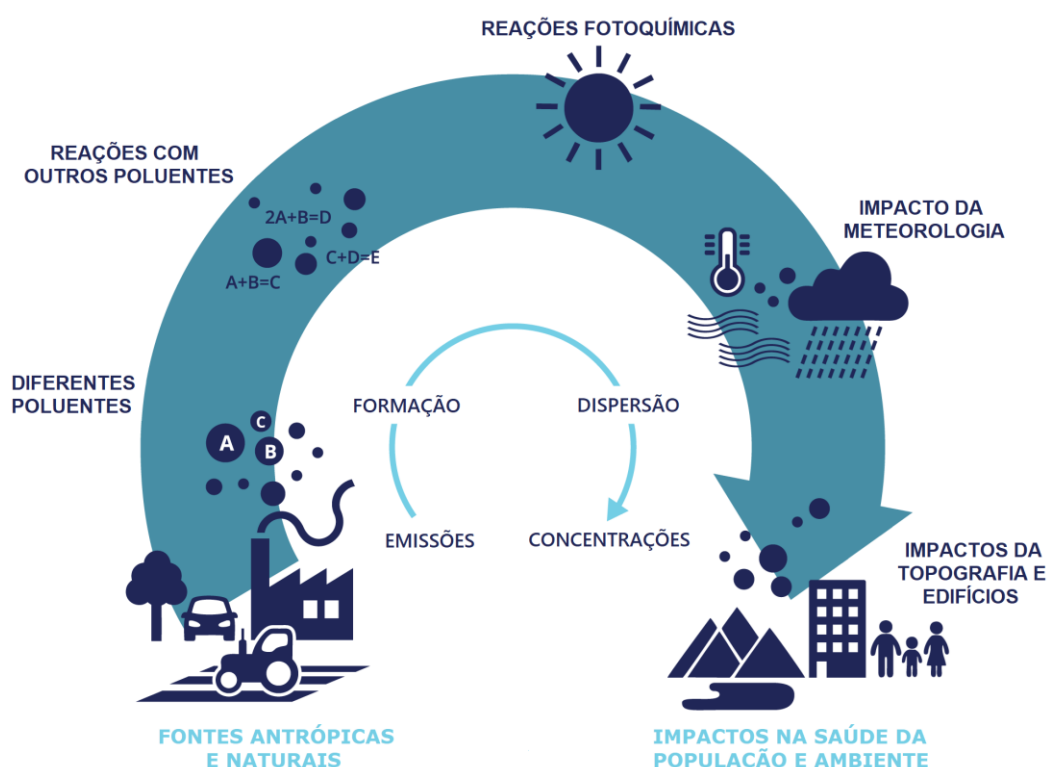


Figura 1 – Processos desde a emissão de poluentes atmosféricos até aos impactos na saúde humana e ambiente (adaptado de EEA, 2020a).

De uma forma geral, verifica-se que os esforços de redução das emissões na União Europeia (EU), produziram reduções nas emissões dos principais poluentes atmosféricos entre 2000 e 2018. Esta diminuição não ocorreu ao mesmo ritmo em todos os países e regiões, e para todos os poluentes e setores de emissão (EEA, 2020b). Também se verifica que as reduções nesse período de tempo foram comparativamente menores para partículas, principalmente a fração fina (PM_{2,5}), um dos poluentes que representa grande ameaça à saúde humana (EEA, 2020c).

As reduções mais significativas ocorreram nos setores de fornecimento de energia, seguido dos setores da indústria transformadora e extrativa. Nos setores do transporte rodoviário e não rodoviário, os maiores emissores de NO_x, as emissões dos principais poluentes (PM₁₀,

PM_{2,5}, NO₂ e monóxido de carbono (CO)) diminuíram significativamente, embora o volume de passageiros e carga transportados tenham aumentado progressivamente. As medidas tomadas pela UE no sentido de definir padrões de emissão cada vez mais rigorosos ou estabelecendo requisitos para a qualidade do combustível representam alguns dos bons exemplos. O setor com menos diminuição é o residencial, comercial e institucional, onde o consumo de energia e respetivas emissões têm vindo a aumentar ligeiramente desde 2014 (exceto para o SO₂). A agricultura e resíduos são os outros setores em que a redução nas emissões foi a mais baixa desde 2000. Não obstante, o setor agrícola apresenta também uma diminuição, especialmente para NO_x e PM_{2,5} e o setor de resíduos apresenta apenas uma redução nas emissões de metano (CH₄) (com redução de 43% nas emissões desde 2000) (EEA, 2020b).

Em Portugal as tendências de um modo geral na última década mostram uma redução nas emissões de poluentes, destacando-se no período de 2015 e 2019, uma redução de 10% nas emissões de NO₂ e de 3% nas PM_{2,5}. Comparando as emissões de 2019 com as metas de redução definidas na Diretiva Tetos 2020 (Diretiva (UE) 2016/2284) verifica-se que de uma forma geral cumprem com as metas de redução estabelecidas (APA, 2021b, 2021a).

2.3. Enquadramento legal da qualidade do ar

A Diretiva-Quadro 2008/50/EC define e fixa objetivos de qualidade do ar ambiente tendo por base as orientações e programas da OMS, através de medidas e ferramentas com base em métodos representativos, para medição da concentração de poluentes e gestão e avaliação da qualidade do ar nos Estados-Membros (UE, 2008). Esta Diretiva foi alterada e atualizada pela Diretiva 2015/1480/EC, onde foram alterados vários anexos das Diretivas 2004/107/CE e 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, que estabelecem as regras relativas aos métodos de referência, à validação dos dados e à localização dos pontos de amostragem para a avaliação da qualidade do ar ambiente.

A Diretiva-Quadro 2008/50/EC foi inicialmente transposta para a ordem jurídica nacional pelo Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro, que agregou ainda a quarta Diretiva filha (Diretiva 2004/107/CE, de 15 de dezembro), relativa ao arsénio, ao cádmio, ao mercúrio, ao níquel e aos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos no ar ambiente. Este decreto foi inicialmente alterado pelo Decreto-Lei n.º 43/2015, de 27 de março que introduz “alterações referentes à definição de «limiar de informação» e a aspetos relativos à qualidade dos dados, valores-limite, níveis críticos e limiares de alerta, planos de qualidade do ar, poluição transfronteiriça, acesso do público à informação, transmissão de informação a nível nacional e transmissão de informação à Comissão Europeia.”. (Decreto-Lei n.º 43/2015, de 27 de Março, 2015)

Mais recentemente foi realizada uma segunda alteração, pelo Decreto-Lei n.º 47/2017 que altera o regime de avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente, transpondo a Diretiva 2015/1480/CE.

Os principais poluentes considerados, pela presente diretiva e legislação, como indicadores da qualidade do ar são CO, NO₂, dióxido de enxofre (SO₂), PM10 e PM2,5, O₃, chumbo (Pb), cádmio (Cd), níquel (Ni), arsénio (As), benzeno (C₆H₆) e Benzo(a)pireno (BaP). A monitorização destes poluentes tem sido efetuada principalmente com cinco propósitos: fiscalizar o cumprimento da legislação, estudar a exposição, dar suporte à avaliação da qualidade do ar, investigar e disponibilização de informação ao público (Borrego et al., 2016; Castell et al., 2016).

De forma a melhor gerir a qualidade do ar em diferentes áreas territoriais, foram criadas zonas e aglomerações, delimitadas de acordo com os seguintes critérios:

- (i) Zonas: áreas geográficas de características homogéneas, em termos de qualidade do ar, ocupação do solo e densidade populacional;
- (ii) Aglomerações: zonas caracterizadas por um número de habitantes superior a 250 000, ou que se situe entre 250 000 e 50 000 e tenha uma densidade populacional superior a 500 habitantes/km².

As zonas são estabelecidas com base na avaliação da qualidade do ar ambiente e as aglomerações são zonas em que os critérios que as definem estão apenas relacionados com parâmetros estatísticos da população residente nessa área.

Em Portugal a delimitação das zonas pode ser consultada através da base de dados do sistema de informação Qualar (<https://qualar.apambiente.pt/>).

A delimitação das zonas e aglomerações é revista periodicamente, em função dos resultados da avaliação da qualidade do ar ambiente e de alterações dos critérios que determinaram a sua delimitação.

A Diretiva também determina que todos os Estados-Membros têm de realizar e entregar anualmente a avaliação da qualidade do ar à Comissão Europeia. Para realizar adequadamente as avaliações da qualidade do ar, esta Diretiva define métodos a serem utilizados consoante os resultados da avaliação preliminar da qualidade do ar em cada zona. Os métodos definidos são os seguintes (APA, 2021g; Diretiva 2008/50/CE, 2008):

- (i) Medições fixas, que recorrem a métodos de referência e/ou equivalentes, em modo contínuo ou por amostragem aleatória, dependendo do poluente e visam a verificação do cumprimento dos valores limite. São implementados onde as concentrações previamente avaliadas ultrapassem o limiar de avaliação superior fixado para os diferentes poluentes e requerem medições durante todo o ano, com exceção do C₆H₆.
- (ii) Medições indicativas, que são complementares às medições fixas, realizadas em zonas onde existam valores de concentração inferiores aos limiares superiores de avaliação e superiores aos limiares inferiores de avaliação. Adicionalmente, este método requer um período mínimo de 14% do ano para SO₂, NO₂, NO_x e CO, sob a forma de uma medição aleatória repartida de modo uniforme ao longo do ano ou oito semanas distribuídas igualmente ao longo do ano, e maior que 10% para o O₃ no verão.
- (iii) Modelação, que consiste em simulações dos fenómenos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera de forma a estimar (com incertezas definidas no Anexo I da Diretiva) a

concentração dos poluentes numa determinada área. Este método pode ajudar a interpretar dados de medições fixas tendo em conta a distribuição geográfica das concentrações, mas também pode servir de complemento às medições fixas e indicativas nas zonas onde as concentrações previstas se situam abaixo do limiar superior de avaliação. Adicionalmente, pode ser usado como complemento de estimativas objetivas em zonas onde as concentrações projetadas se situem abaixo do limiar inferior de avaliação.

- (iv) Estimativas objetivas, que são usadas em zonas cujos valores de concentração de poluentes se situem abaixo do limiar inferior de avaliação. Permitindo desta forma estimar concentrações com objetivos de qualidade e incertezas menos rigorosos do que os requeridos para a modelação.

As medições fixas são realizadas por estações de medição de qualidade do ar de referência que apresentam tipologias diferentes dependendo das emissões predominantes na zona onde se encontram, representando diferentes tipos de exposição da população à poluição atmosférica e estando, por esse motivo, equipadas com analisadores que medem diferentes poluentes.

Estas estações podem ser instaladas, em 3 tipos de áreas: urbanas, suburbana ou rural. Em cada uma destas áreas, a sua posição pode ainda variar de acordo com critérios de micro-localização, sendo identificadas como (APA, 2021f; Diretiva 2008/50/CE, 2008):

- (i) estações de tráfego, que medem as concentrações de poluentes resultantes das emissões do tráfego rodoviário, localizando-se próximo de vias de tráfego intenso. Têm também como objetivo a medição das concentrações máximas de poluentes a que a população poderá estar exposta;
- (ii) estações de fundo, que têm como objetivo monitorizar as concentrações fora da influência direta de zonas urbanas ou fontes de poluição. Adicionalmente servem para avaliar a exposição média a que a população pode estar exposta;
- (iii) estações industriais, que permitem a análise das concentrações de poluentes com origem industrial, encontrando-se situadas na proximidade de zonas industriais. Pretendem também monitorizar as concentrações máximas de determinados poluentes de origem industrial.

Estas redes fixas, por vezes, também são complementadas por estações móveis de monitorização da qualidade do ar com o mesmo tipo de instrumentos de referência e as mesmas necessidades de manutenção e calibração. Estas estações de monitorização móveis são usadas para medições durante um determinado período em certos locais que se pretendam estudar, fora das zonas de influência das estações de referência fixas. No entanto, devido aos custos operacionais elevados, os veículos móveis para MQA também não aumentam significativamente a densidade espacial de amostragem. Para além disso, uma das suas grandes limitações deve-se às suas medições terem períodos temporais incompletos (Castell et al., 2016).

A MQA também pode ser feita com recurso a amostradores passivos. Estes dispositivos têm a vantagem de serem simples, fáceis de implementar e operar (excluindo as análises laboratoriais) e não requerem eletricidade. A limitação dos amostradores passivos deve-se a apenas permitirem a quantificação dos níveis cumulativos de poluentes atmosféricos. Portanto, este método não permite identificar episódios pontuais de poluição e a variação das concentrações de poluentes a curto prazo. Além disso, os amostradores passivos não são tão precisos quanto a instrumentação de referência, sofrem de interferência química, e também são afetados pelas condições atmosféricas (Castell et al., 2016).

Os modelos de qualidade do ar são uma ferramenta eficaz e versátil para complementar as lacunas na densidade das estações de monitorização de qualidade do ar, possibilitando análises de cenários e previsões. No entanto, o uso de modelos requer, muitas vezes, um conhecimento especializado e dados de entrada relativamente recentes que em muitos casos não estão facilmente disponíveis, ou são inexistentes, para determinadas fontes emissoras. Para além disso, as concentrações modeladas também podem sofrer de erros sistemáticos, incluindo viés, dependendo dos dados de entrada e das escolhas de parametrização do modelador (Castell et al., 2016; Mihăiță et al., 2019)

Em Portugal estão estabelecidos objetivos de qualidade do ar ambiente (valores limites, valores-alvo e níveis críticos), sendo os mais importantes no âmbito deste trabalho os apresentados na tabela I, e limiares de informação e alerta para os níveis de qualidade do ar a curto prazo (horários e/ou diários) e a longo prazo (anuais) relativamente aos poluentes relevantes. Os objetivos para os níveis de longo prazo são mais restritivos em relação aos de curto prazo, tendo em conta os efeitos graves na saúde que podem resultar de uma exposição prolongada aos poluentes.

As Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR) e as direções regionais de ambiente das Regiões Autónomas (DRA), na área da respetiva competência, devem adotar as medidas necessárias para garantir que as concentrações dos poluentes atmosféricos cumprem os objetivos de qualidade do ar ambiente estipulados para cada poluente.

Para além dos valores referidos, para alguns poluentes cujo exposição da população a concentrações elevadas em períodos de curta duração importa prevenir, foram estabelecidos limiares de informação e alerta. Quando os resultados das medições indicam a excedência a estes valores as CCDR e DRA tem a obrigação de avisar a população tendo em vista a redução da sua exposição diminuindo assim os efeitos negativos na saúde.

Tabela I - Objetivos de qualidade do ar estabelecidos pela diretiva.

Poluente	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Período	Natureza legal	N.º de excedências permitidas por ano
PM2,5	20	1 ano	Valor limite ¹	n.a.*
PM10	50	24 horas	Valor limite ¹	35
	40	1 ano	Valor limite ¹	n.a.*
NO₂	200	1 hora	Valor limite ¹	18
	40	1 ano	Valor limite ¹	n.a.*
CO	10 000	Máximo diário das médias de 8 horas	Valor limite ¹	n.a.*
Ozono	120	Máximo diário das médias de 8 horas	Valor alvo ²	25 dias média de 3 anos

*n.a. - não aplicável

Os valores-limite da UE são delineados a partir de diretrizes estabelecidas pela OMS, todavia não são critérios juridicamente vinculativos, mas pretendem ser relevantes para apoiar uma vasta gama de opções políticas para a gestão da qualidade do ar na UE. No entanto, como no caso de PM10 e PM2,5, os limites são consideravelmente mais elevados (ou seja, menos rigorosos) do que as recomendações da OMS.

2.4. Qualidade do ar na Europa e em Portugal

Atualmente, apesar das reduções nas emissões de poluentes, ainda se verificam ultrapassagens dos padrões de qualidade do ar para os principais poluentes, como PM, NO₂ e O₃ definidos pela Diretiva-Quadro 2008/50/EC e diretrizes da OMS para proteção da saúde humana (EEA, 2020b). Um exemplo de ultrapassagens aos valores limite na Europa pode ser visualizado na Figura 2 para o NO₂, na qual se verifica que as ultrapassagens ocorrem principalmente em grandes áreas urbanas.

¹ Valor-limite - nível fixado com base em conhecimentos científicos com o intuito de evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos na saúde humana e ou no ambiente, a atingir num prazo determinado e que, quando atingido, não deve ser excedido.

² Valor-alvo - nível fixado com o intuito de evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos na saúde humana e ou no ambiente, a atingir, na medida do possível, durante um determinado período de tempo

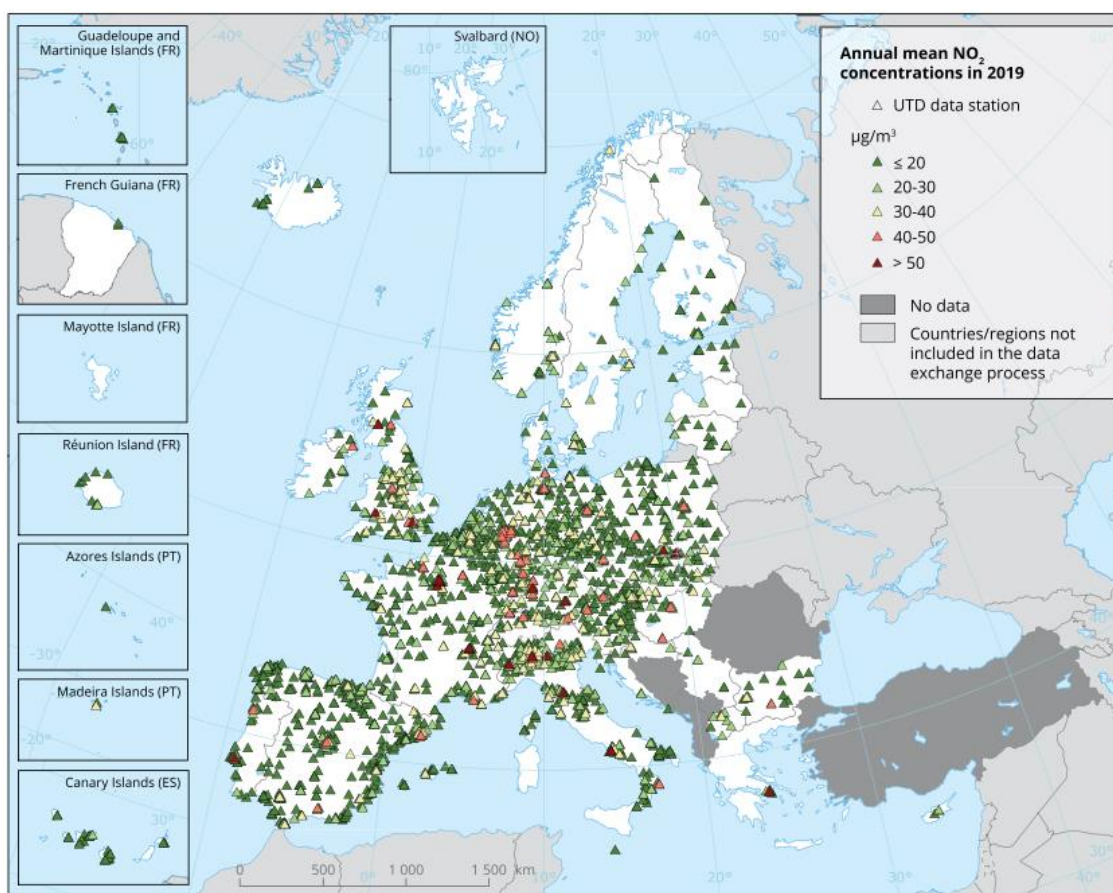


Figura 2 – Média anual da concentração de NO₂ em cada estação de monitorização de referência da Europa em 2019 (EEA, 2020b).

A qualidade do ar continua fraca em muitas zonas da Europa, segundo o Relatório de 2020 da qualidade do ar na Europa da Agência Europeia do Ambiente (AEA) (EEA, 2020b).

Em Portugal tem-se verificado uma melhoria da qualidade do ar de uma forma geral. A análise relativa ao período entre 2002 e 2020 permite identificar uma tendência decrescente na percentagem de dias com classificação “Fraco” e “Mau”, tendo diminuído de cerca de 17% em 2005 para 0,8% em 2020.

O impacto da pandemia da COVID-19 e das medidas de confinamento adotadas com implicações no normal funcionamento da economia, e na consequente melhoria generalizada da qualidade do ar, resultaram num ano de 2020 atípico. Neste ano a classe do índice de qualidade do ar (IQA) dominante é “Bom” com uma melhoria de 2,7% de dias com qualidade “Muito Bom” e “Bom” em relação a 2019 e uma diminuição de 0,8% na percentagem de dias com classificação “Fraco” e “Mau”, indicando uma melhoria na qualidade do ar face a 2019. No entanto, apesar das melhorias ainda existe uma percentagem significativa de dias com qualidade do ar “Média”.

Contudo, no que se refere ao Índice de Qualidade do Ar (IQA) e tendo em conta o seu método de cálculo e o facto dos principais poluentes responsáveis pela sua classificação serem o

ozono (poluente secundário) e as partículas, a melhoria observada não é muito significativa. O principal impacto da pandemia verificou-se na redução dos níveis de NO_2 , poluente que não é habitualmente responsável pela classificação do IQA.

Segundo Gama et al. (2021) que analisou as reduções da concentração de poluentes durante o confinamento entre os meses de março e maio, em Portugal, as maiores reduções foram visíveis principalmente com o NO_2 , PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$. Também verificou que as reduções foram maiores em meio urbano, particularmente em estações urbanas de tráfego. Durante o estado de emergência estas reduções chegaram a ser de 64% para o NO_2 e 27% para PM_{10} , como é visível na Figura 3.

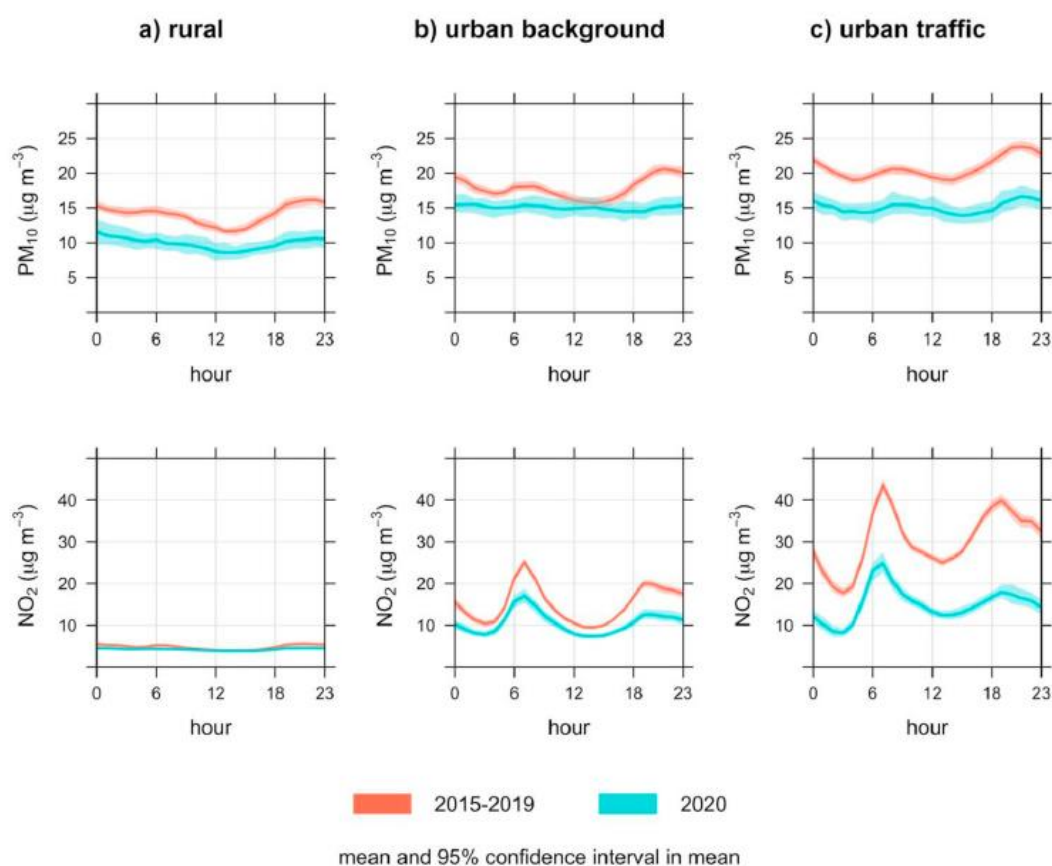


Figura 3 - Perfis médios diários das concentrações médias espaciais de PM_{10} e NO_2 , por hora, observadas em (a) rural, (b) meio urbano e (c) estações de tráfego urbano, durante o período de bloqueio ou dias de bloqueio parcial (de 16 de março a 31 de maio de 2020) (Gama et al., 2021).

Apesar destas reduções, após o levantamento das restrições no fim de maio e junho foram visíveis novos aumentos na concentração de poluentes (Gama et al., 2021).

Futuramente, apesar do impacto da pandemia, espera-se que as concentrações de poluentes atmosféricos, atualmente, acima das recomendações da OMS, passem a estar praticamente em conformidade até 2030, com a implementação total das atuais políticas de

redução de emissões. Também se prevê que o número atual de mais de 400 000 mortes prematuras atribuídas à poluição do ar nos 28 Estados Membros da UE diminua para menos de 200 000 mortes com base anual até 2030, enquanto a redução dos impactos sobre os ecossistemas deverá ser menor (EEA, 2020c).

Para estas reduções se verificarem serão também necessárias medidas sistémicas adicionais para reduzir as emissões, especialmente nos setores da agricultura (alimentação), transportes (mobilidade) e produção de energia a par com o aquecimento doméstico (Borrego et al., 2018; EEA, 2020c).

3. Sensores de qualidade do ar

Os métodos mais utilizados para MQA têm por base medições de referência através de estações de monitorização convencionais que são estrategicamente colocadas segundo os pressupostos da legislação da qualidade do ar e que permitem estudar a exposição, apoiar a gestão da qualidade do ar e desenvolver políticas adequadas (Borrego et al., 2016). Apesar de fornecerem dados precisos, os altos custos de instalação e manutenção das estações de monitorização de referência fazem com que a rede de monitorização seja dispersa, satisfazendo os requisitos legais, mas não fornecendo dados suficientes, tendo em conta a variabilidade espacial à escala urbana e local, e eventuais *hotspots* que podem apresentar riscos localizados para a saúde pública (Borrego et al., 2016; Castell et al., 2016; Kumar et al., 2015).

As grandes cidades de países desenvolvidos possuem na sua generalidade uma ampla rede de estações de referência para MQA exterior, mas em cidades pequenas ou regiões subdesenvolvidas, a MQA pode não existir.

Os analisadores de poluentes atmosféricos utilizados nestas estações têm dimensões relativamente grandes, são pesados e dispendiosos, com preços a variar entre 5 000 € e 30 000 € por dispositivo (Borrego et al., 2016; Castell et al., 2016; Federico Karagulian et al., 2019; Kumar et al., 2015). Para garantir dados de alta qualidade em tempo real e comparabilidade entre as diferentes estações e regiões, estas estações estão sujeitas a rigorosas rotinas de manutenção e calibração de todos os seus instrumentos (Castell et al., 2016; Kumar et al., 2015).

Atualmente, os avanços nas tecnologias para a construção de sensores e microsensores promoveram uma enorme disponibilidade comercial destas tecnologias. Devido a este fato, na última década, tem havido uma rápida adoção de sensores de baixo custo para MQA por parte de entidades públicas e cidadãos, para complementar as redes de monitorização existentes e suportar as tomadas de decisão (Borrego et al., 2016; Federico Karagulian et al., 2019) Iguualmente inúmeras publicações científicas têm vindo a ser disseminadas de forma crescente nas últimas décadas como é possível verificar pela Figura 4.

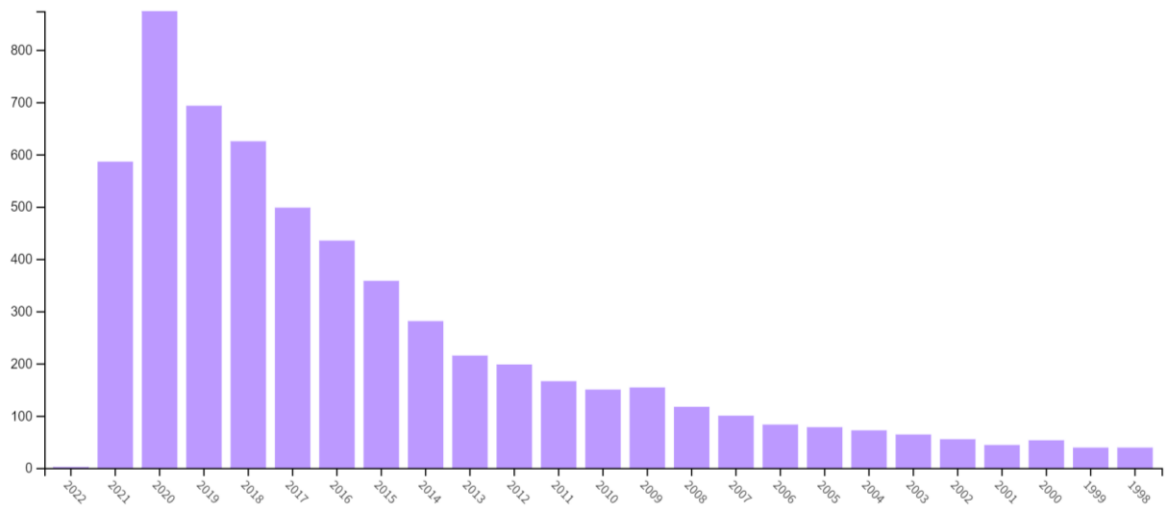


Figura 4 - Publicações científicas com o tópico "air quality" e "sensors" da *Web of Science Core Collection* (Web of Science, 2021).

O grande desafio para a monitorização com sensores passa pela necessidade de atingir os requisitos restritos de qualidade dos dados exigidos na monitorização convencional, definidos pela Diretiva Europeia da Qualidade do Ar, não sendo atualmente considerada para fins regulamentares na legislação europeia (Borrego et al., 2016; Castell et al., 2016).

Apesar destes fatores, a MQA com estes dispositivos pode ser uma mais-valia em comparação com os equipamentos de monitoramento tradicionais. De facto, estes equipamentos possibilitam um aumento da densidade espacial dos pontos de monitorização, validação de modelos de dispersão atmosférica e avaliação da exposição da população. Apesar das vantagens, são necessárias mais pesquisas e desenvolvimentos nestas tecnologias para que possam ser integradas nas monitorizações convencionais (Borrego et al., 2016), podendo, no entanto, ser utilizadas para consciencialização dos cidadãos e monitorização de comunidades (Castell et al., 2016).

Alguns estudos apresentaram resultados promissores, como por exemplo, Borrego et al., 2018 e Castell et al., 2016, mostrando ser possível realizar medições em conformidade com as exigências nas incertezas de medições indicativas.

No entanto, a falta de informações exaustivas e acessíveis para comparar os sensores e sistemas de sensores entre si e estações de referência levam a incertezas pouco caracterizadas e que não se encaixam facilmente nas estruturas técnicas existentes para verificação da qualidade ou calibração dos dados, criando, portanto, desafios para o desenvolvimento de regulamentação (Lung et al., 2018). Por outro lado, a existência de uma ampla oferta comercial dificultam a seleção dos sensores de baixo custo mais adequados (Federico Karagulian et al., 2019).

Outra dificuldade na implementação de regulamentação deve-se à elevada variabilidade na performance entre sensores e variações que apresentam em relação às diferentes condições meteorológicas e padrões de emissão (Castell et al., 2016).

Estes problemas fazem com que, atualmente, estes sensores sejam inadequados para aplicações que requerem alta precisão e confiabilidade, como conformidade legislativa e avaliações científicas de estimativas de exposição. No entanto, estudos recentes mostram que a aplicação de calibrações de campo baseadas em técnicas de *machine learning* podem reduzir a incerteza das medições (Castell et al., 2016).

Antes de abordar as diferentes tecnologias de sensores atualmente disponíveis para monitorizar poluentes atmosféricos, é necessário descrever e caracterizar as diferentes designações usadas para cada componente de uma estação de monitorização.

Diferentes estudos usam diferentes designações para se referir a sensores de qualidade do ar, sendo as mais comuns as seguintes:

- 1) **Sensor ou dispositivo de deteção:** dispositivo que realiza a medição analítica de componentes físicos (temperatura, humidade relativa, partículas) ou químicos (gases) da atmosfera, convertendo-os num sinal elétrico onde a magnitude relativa desse sinal está relacionada com concentração atmosférica ou no caso de parâmetros meteorológicos com uma escala (WMO, 2020). Este termo é também o mais utilizado nas publicações científicas.
- 2) **Microsensor:** são sensores microscópicos bidimensionais e tridimensionais que têm menor tamanho e custos de produção mais baixos do que muitas formas alternativas de sensores. Os tamanhos típicos de microsensores variam entre 10 μm (0,01 mm ou 10^{-5} m) até 5 mm (Morris & Langari, 2016). Este termo é usado apenas em alguns artigos, como por exemplo, em Borrego et al. 2016.
- 3) **Sensores de baixo custo (LCS):** Sensores ou microsensores que têm um custo reduzido em relação ao custo individual de analisadores de referência e sua operação (Federico Karagulian et al., 2019). Este termo tem sido usado na literatura de forma relativa e imprecisa, dependendo dos utilizadores e das suas finalidades específicas. Por exemplo, um instrumento entre 1 700€ e 4 300 € pode ser de baixo custo para uma autoridade reguladora, mas inacessível à comunidade científica e população. Este termo foi identificado de forma informal pela *Environmental Protection Agency* (EPA) dos EUA como sendo dispositivos que custam menos de 2500 \$ (aproximadamente 2150€), principalmente porque este é o limite aproximado que define o investimento de capital dos cientistas e cidadãos (Morawska et al., 2018). No entanto, este limite para o qual se considera um sensor de baixo custo varia na literatura científica, por exemplo, L. Morawska et al. 2018, considera a designação de sensores de baixo custo para aplicações individuais ou comunitárias com um preço inferior a 86€.

- 4) **Estação de monitorização (sensor box, sistema de sensores, monitor, nó):** a junção de um abrigo (caixa) e de um ou vários sensores de medição dos poluentes, bem como outros sensores de humidade e temperatura, com uma fonte de energia (interna ou externa), sistemas de armazenamento e/ou transmissão dos dados e, opcionalmente, um processador para converter sinais elétricos em unidades de concentração, climatização e tomadas de ar para amostragem (Arroyo et al., 2016; WMO, 2020).

No entanto, apesar do termo “sensores de baixo custo” ser bastante utilizado, a maioria das informações relatadas na literatura científica é, na verdade, sobre estações de monitorização com sensores de baixo custo e as suas redes (Morawska et al., 2018). Como tal, a qualidade, tipo de componentes e organização dos mesmos na estação de monitorização fazem com que existam diferenças entre os vários sistemas de sensores usados.

Ao longo desta dissertação, de modo ser mais abrangente, a designação que será utilizada para os dispositivos de deteção será “sensores” devido ao seu preço e qualidade global.

Relativamente ao conjunto dos sensores e componentes de suporte será designada por estação de monitorização.

3.1. Tipos de sensores de qualidade do ar

Os sensores de poluição do ar podem ser classificados em dois grupos principais: os que medem poluentes em fase gasosa e aqueles que medem partículas (sólidos ou líquidos) em suspensão.

Tendo em conta as diferentes tecnologias, os sensores podem ser divididos em seis grupos. Dividem-se em: eletroquímicos, semicondutores (metal - óxido), sensores por fotoionização, sensores não dispersivos por absorção de infravermelhos, para gases, e sensores classificadores de tamanhos e sensores de dispersão de luz para partículas.

Existem também outras variantes destes métodos e outros sensores com tecnologias mais dispendiosas que não vão ser aprofundadas por serem bastante dispendiosas e pouco utilizadas. Estas tecnologias são por exemplo, sensores de Cromatografia de gases (GC) que custam entre 13 000€ e 86 000€; sensores de Microbalança Oscilante com Elemento Cônico (TEOM) que usam mudanças na frequência de oscilação de um tubo de vidro vibratório; os sensores de monitores de atenuação beta (BAM) que usam a absorção de radiação beta para estimar a densidade das partículas e sensores de deteção e dimensionamento de partículas móveis (SMPS), que estimam o tamanho e a concentração de partículas.

3.1.1. Sensores eletroquímicos (EC)

Os sensores eletroquímicos têm cerca de 20 milímetros (Aleixandre et al., 2012) e são sensores de gases populares e comuns, tendo sido usados para monitorizar CO, NO, NO₂, O₃ e SO₂ (Concas et al., 2021; WMO, 2020).

Existem dois tipos de EC, os amperimétricos e os potenciométricos. Em ambos os casos, o gás é difundido no eletrodo de trabalho para a área de detecção do sensor através de uma membrana porosa e hidrofóbica. No eletrodo de trabalho, o gás reage por reações de oxidação ou redução, dando origem a uma corrente elétrica analisada pelo circuito externo. No caso de sensores amperimétricos (Figura 5) (dois eletrodos) o sinal medido é amplificado e posteriormente processado mantendo uma tensão entre os eletrodos de trabalho e contra eletrodos. No caso de sensores potenciométricos, são constituídos por três eletrodos e a tensão é mantida entre os eletrodos de trabalho e de referência (Figura 5). As reações de oxidação e redução ocorrem em pares opostos, portanto, se no eletrodo de trabalho ocorre uma oxidação; no contra eletrodo ocorrerá uma redução. Ao medir a corrente entre o eletrodo de trabalho e o contra eletrodo, é possível deduzir a concentração do gás ambiente alvo. O eletrodo de referência é usado para controlar as reações de oxidação-redução e reduzir possíveis desvios no eletrodo de trabalho devido à sua deterioração (Concas et al., 2021; Cretescu et al., 2017).

Os sensores amperimétricos são os sensores eletroquímicos de gases mais utilizados, devido à dependência linear da corrente gerada com a concentração do gás (Cretescu et al., 2017).

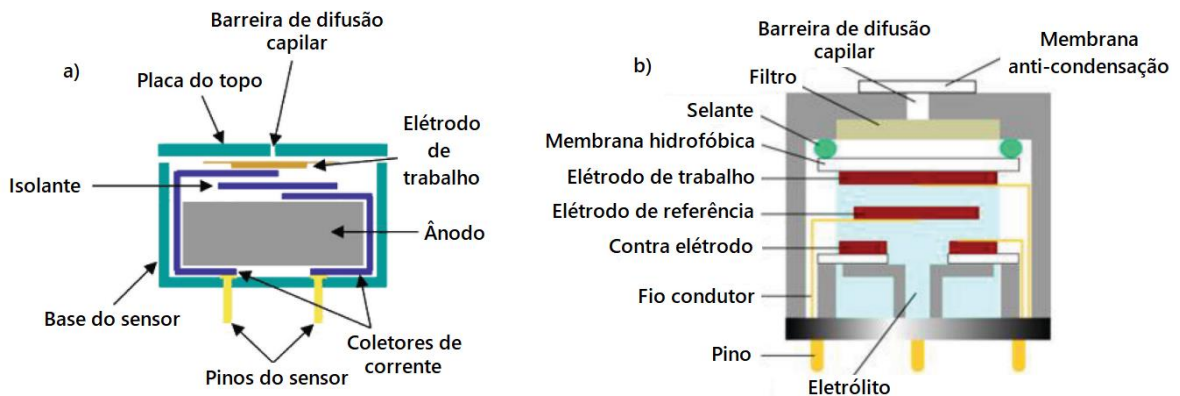


Figura 5 - Esquema de uma célula eletroquímica (a) amperimétrica e (b) potenciométrica (adaptado de Cretescu et al., 2017).

3.1.2. Sensores resistivos ou metal-óxido (MOS)

Os sensores resistivos também são uma tecnologia popular para monitorizar concentrações de bastantes gases como CO, CO₂, NO, NO₂ e O₃ (Concas et al., 2021).

Estes sensores são constituídos por um elemento sensível composto por óxidos metálicos semicondutores e um elemento de aquecimento. Os óxidos metálicos mais usados são os óxidos de zinco e estanho (ZnO and SnO₂), por reagirem com uma grande quantidade de gases e por sofrerem grandes alterações na sua resistência. Estes são altamente sensíveis em relação a gases redutores como H₂, H₂S, CO, etanol, entre outros e a gases oxidantes como O₃, O₂, NO₂. O elemento de aquecimento, aquece a superfície do sensor a uma temperatura entre 300°C e 500°C que permite que ocorram reações químicas na sua superfície (Concas et al., 2021). O oxigênio atmosférico é adsorvido pela superfície do material semiconductor criando um limite na camada de depleção (barreira Schottky) que altera a condutividade elétrica do sensor (Thompson, 2016b). Esta alteração é depois medida pelo circuito externo sendo proporcional a uma concentração. (Concas et al., 2021; Thompson, 2016a)

Na Figura 6 é possível observar a estrutura típica deste tipo de sensores.

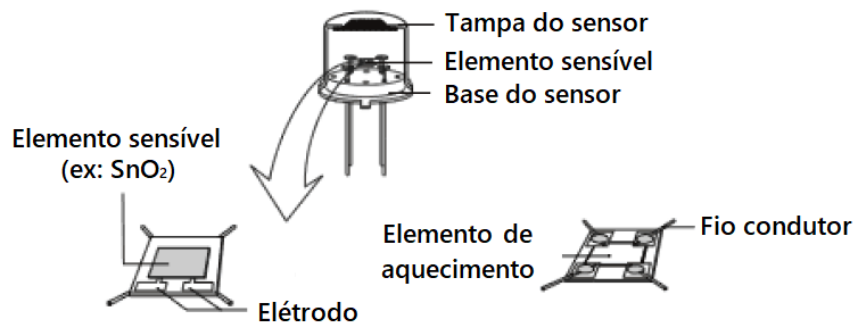


Figura 6 - Esquema da estrutura de um sensor de metal óxido (adaptado de Rivai, 2014).

3.1.3. Sensores de fotoionização (PID)

Este tipo de sensores é geralmente usado para medir concentrações de COV (European Commission, 2018). Operam através da emissão de luz ultravioleta com uma determinada energia que ioniza apenas as moléculas gasosas de interesse, cuja energia de ionização é menor do que a dos fotões emitidos. Estes iões são depois capturados por um elétron coletor produzindo uma corrente elétrica. A corrente elétrica medida é proporcional à taxa de ionização das moléculas ionizadas e conseqüentemente à sua concentração (Thompson, 2016a). Na Figura 7 apresenta-se um esquema ilustrativo destes sensores.

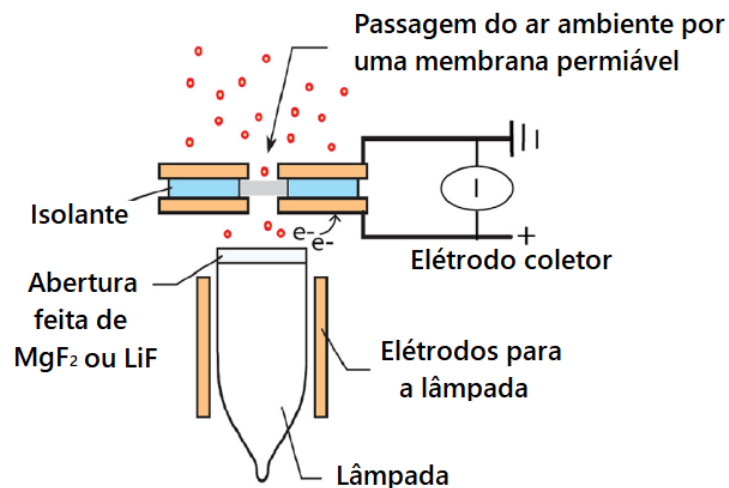


Figura 7 - Esquema de um detector por fotoionização (adaptado de Thompson, 2016b).

3.1.4. Sensores não dispersivos por absorção de infravermelhos (NDIR)

Os sensores NDIR são geralmente constituídos por uma fonte de luz infravermelha, uma câmara de amostragem atmosférica, um filtro ótico e um detector (Concas et al., 2021; Thompson, 2016a).

O princípio de funcionamento baseia-se na emissão de luz infravermelha para uma câmara por onde o ar ambiente passa e algumas frequências são absorvidas de acordo com os gases presentes. As frequências de luz que não são absorvidas atravessam o filtro seletivo e chegam ao detector que converte as frequências absorvidas para um sinal elétrico que se relaciona com a concentração de um determinado gás (Concas et al., 2021).

Sensores NDIR têm sido usados principalmente para detectar concentrações de CO₂. No entanto, eles podem ser usados para detectar também outros gases como CO, NO_x, SO₂ e CH₄, entre outros, por meio de mudanças no comprimento de onda da luz (Concas et al., 2021; Thompson, 2016a).

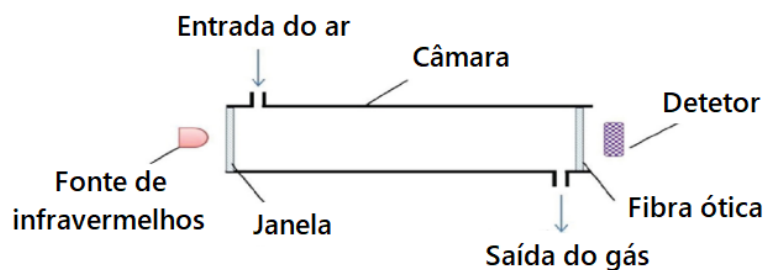


Figura 8 - Esquema de um sensor NDIR (Thompson, 2016a).

3.1.5. Sensores óticos de dispersão de luz (LSPs)

Sensores deste tipo são normalmente utilizados para medir a concentração de partículas através de princípios óticos, normalmente analisando a dispersão de um feixe de luz de baixa potência (LED ou laser) contrário dos instrumentos de referência que se baseiam em princípios gravimétricos.

Relativamente ao princípio de medição existem duas técnicas principais: os nefelómetros, que mede a dispersão de luz de partículas de um conjunto de aerossóis, e contadores óticos de partículas (OPCs), que contam os pulsos de luz dispersada e medem a intensidade de luz dispersada em cada pulso, por cada partícula (Figura 9). Nenhuma das técnicas mede diretamente a massa das partículas. Para calcular a concentração, normalmente é usada uma regressão linear que foi anteriormente criada entre o *output* do sensor e a massa de partículas medida por um instrumento de referência para uma determinada quantidade de aerossóis. Existem algumas técnicas de monitorização de referência que usam princípios óticos semelhantes a sensores de baixo custo (LCS). No entanto, estes métodos possuem um fluxo de amostragem ativo, bem controlado e fontes óticas melhoradas e muitas vezes mais caras (Castell et al., 2016; WMO, 2020).

O desempenho dos sensores de PM depende de uma variedade de fatores, como princípios de medição e características das partículas (composição química, densidade, higroscopicidade, índice de refração, forma e distribuição de tamanho). As partículas também podem ser altamente reativas e sujeitas a vieses de amostragem se, durante o processo de amostragem, as partículas forem transferidas através de fortes gradientes de temperatura/humidade. Portanto, estes sensores podem sofrer interferências consoante a humidade relativa, caso não seja instalado um sistema de secagem das partículas, quando a humidade relativa é elevada (acima de 80-90%). O sensor mede também as gotículas de água superestimando a massa da matéria particulada. O limite inferior dos tamanhos de partículas detetados atualmente pelos sensores disponíveis é de cerca de 10 nm (Bartonova et al., 2019; WMO, 2020).

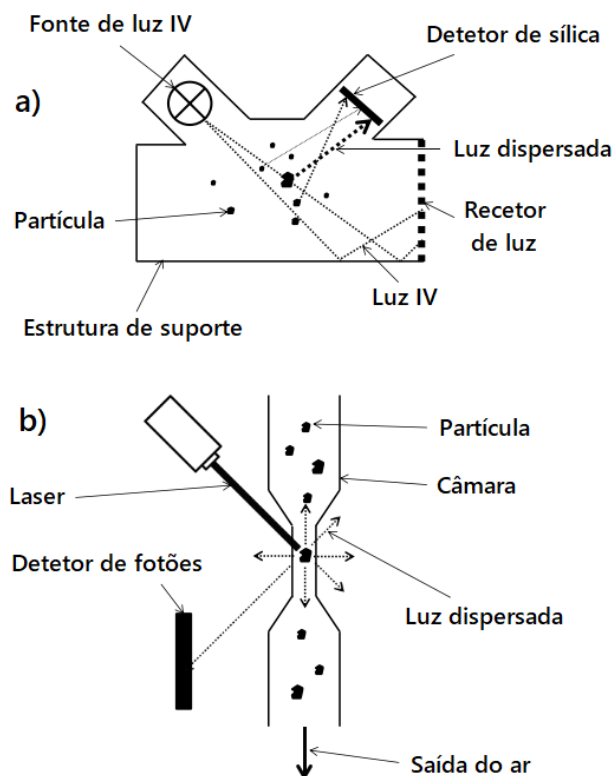


Figura 9 - Contador óptico de partículas (a) e um nefelômetro (b) (adaptado de Yi et al., 2015).

3.2. Calibração dos sensores

A calibração de sensores é feita através do desenvolvimento de um modelo que pode ser utilizado para converter um determinado parâmetro de acordo com a tecnologia do sensor (por exemplo, absorção de luz, voltagem ou condutividade) na variável pretendida, normalmente numa concentração.

Na maioria dos sensores, o modelo de calibração de fábrica é disponibilizado e representa o principal método de calibração. No entanto, as calibrações de fábrica em grande parte dos casos não permitem uma precisão robusta e a longo prazo para todos os ambientes possíveis nos quais o sensor pode ser usado. Portanto, as calibrações e validações dos dados também devem ser realizadas num ambiente semelhante ao qual o sensor será exposto, proporcionando maior confiança na exatidão e precisão dos dados.

Os métodos mais usados para validação dos sensores são esquematizados e explicados na Figura 10.

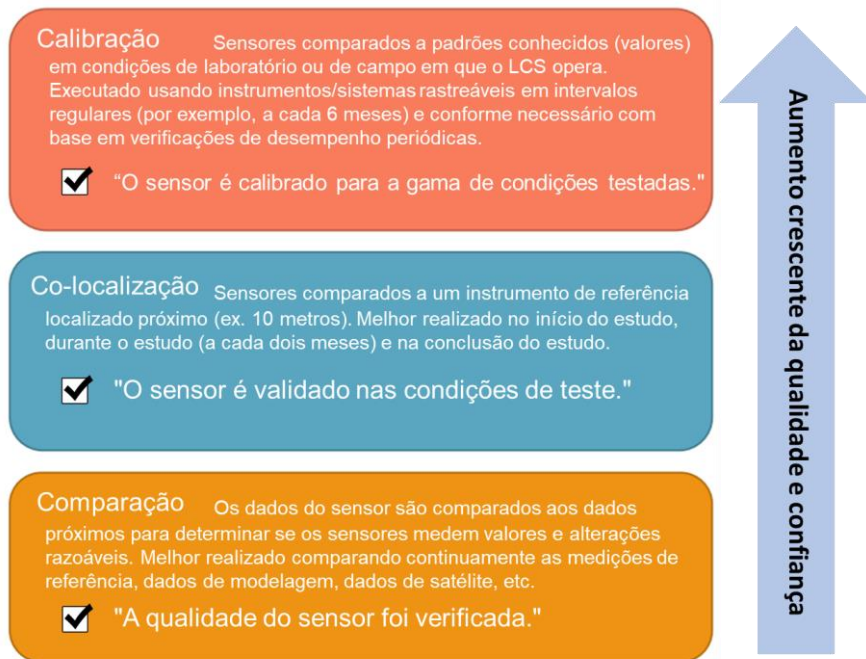


Figura 10 - Esquema dos principais processos de validação de sensores (adaptado de WMO, 2020).

3.3. Vantagens e desvantagens dos sensores

Os sensores de qualidade do ar têm atualmente sido implementados em projetos para envolver os cidadãos na ciência (educação e informação), quer por parte de entidades públicas governamentais ou Organizações Não Governamentais (ONG) quer por parte de setores privados (indústria). Em estudos científicos também têm sido usados para identificar *hotspots* nas áreas urbanas e mapear a poluição atmosférica nas cidades. Adicionalmente também têm como vantagem a sua portabilidade e podem ser usados para monitorizações móveis em veículos ou dentro de edifícios. Também podem ser usados para resposta a emergências como incêndios ou episódios críticos de poluição (Borrego et al., 2016; WMO, 2020).

O mercado de sensores está a evoluir rapidamente e novas gerações de sensores são lançadas regularmente pelos fabricantes com novas abordagens para caracterização de sensores e análise de dados. Assim, o desempenho do sensor pode ser substancialmente melhor do que o que foi encontrado em trabalhos anteriores. No entanto, é necessário proceder à calibração, correção de interferências e monitorização contínua dos sensores. Por outro lado, os poluentes atmosféricos podem ter características únicas ou muito particulares que afetem a performance do sensor. Por exemplo, um contador ótico de partículas pode variar a sua resposta em relação a uma determinada concentração de aerossóis de acordo com a sua distribuição de tamanhos, constituição física e química (diferentes cores) (WMO, 2020).

No entanto, um dos grandes problemas dos sensores são a sua suscetibilidade para desenvolverem desvios de zero e efeitos de envelhecimento, que afetam as calibrações e podem levar a erros sistemáticos que podem piorar ao longo do tempo. Na tabela II é feito um resumo da maior parte dos parâmetros que são essenciais na avaliação da qualidade de cada tipo de sensor e as suas vantagens e desvantagens.

Tabela II - Resumo das características dos diferentes tipos de sensores para gases e partículas.

Tipo	Poluentes	Custo (€)	Tempo de resposta	Tempo de vida	Precisão	Sensibilidade	Desvio	Calibração	Vantagens	Desvantagens
EC	NO ₂ , NO, SO ₂ , O ₃ , CO	50 a 150	30 - 200 s	Curto	Boa	Elevada	2%-15% por ano	Alguma frequência	- Custo moderado; - Boa sensibilidade (mg/m ³ a µg/m ³); - Resposta rápida.	- Bastante sensíveis à variação de temperatura e humidade (dependendo do eletrólito); - Sensibilidade cruzada entre moléculas do mesmo tipo.
MOS	NO ₂ , NO, SO ₂ , O ₃ , CO	10 a 15	5 - 50 min	Longo	Baixa	Elevada	Sim	Frequente	- Custo reduzido; - Boa sensibilidade (mg/m ³ a µg/m ³);	- Afetados pela variação de temperatura e humidade; - Longo tempo de resposta; - Resultados dependentes do histórico de reações; - Pode ser observada instabilidade.
PID	VOC	400	Alguns segundos	Longo	Elevada	Elevada	20% em semanas	Frequente	- Custo moderado; - Boa sensibilidade (mg/m ³ a µg/m ³); - Tempo de resposta rápido;	- Não são seletivos aos VOC; - Apresentam desvios significativos no sinal ao longo do tempo.
NDIR	CO, CO ₂ , SO ₂ , NO ₂ , NO, CH ₄	100 a 350	20 - 120 s	Longo	Elevada	Elevada	(0,4±0,4)%	Frequente	- Custo moderado; - Boa sensibilidade (350 – 2000 ppm para o CO ₂); - Tempo de resposta rápido; - Desvios limitados após a calibração do sensor.	- Necessita de correção devido aos efeitos da temperatura, humidade e pressão.
LSP	PM	300	1 s	Longo	Elevada	Pouca	Nenhum	Frequente	- Custo moderado; - Resposta rápida; - Sensibilidade no intervalo de 1 µg/m ³ ; - Capaz de identificar o tamanho das partículas.	- Conversão para massa a partir das contagens de partículas baseia-se em modelos teóricos; - Sinais medidos dependem de parâmetros como: cor, formato, densidade, humidade e índice de refração.

3.4. Redes de monitorização com sensores

Este subcapítulo fornece uma breve caracterização das estações de monitorização de qualidade do ar com sensores, suas características e funcionamento dos sensores de qualidade do ar.

A forma como um conjunto de sensores e todos os componentes são integrados numa estação de monitorização é importante, assim como a forma como os dados dos sensores são processados. (WMO, 2020)

Na Figura 11 é esquematizada a forma de organização de sensores numa ordem crescente de complexidade e a sua respetiva terminologia.

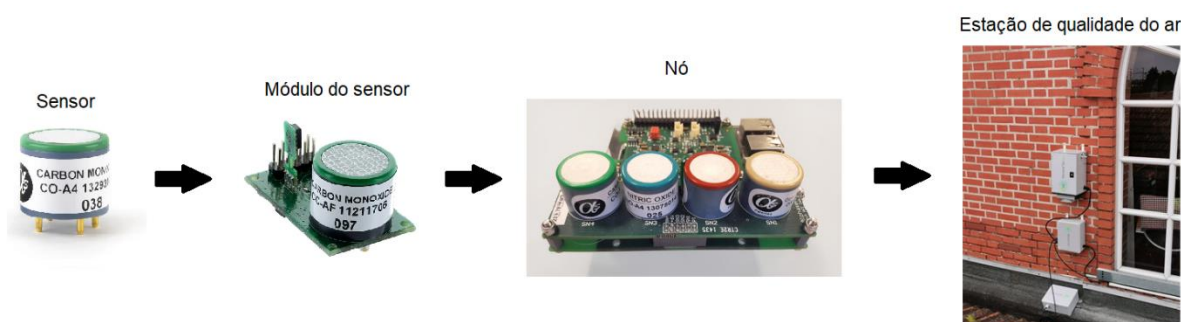


Figura 11 - Esquema das diferentes estruturas principais numa estação de qualidade do ar com ordem crescente de complexidade.

Para o bom funcionamento de uma rede de sensores fixos é necessário ter em conta os seguintes sistemas e componentes (WMO, 2020):

- **Sistemas de amostragem:** de forma à medição ser representativa do ambiente que se pretende monitorizar, o sensor deve estar exposto de forma contínua à atmosfera ambiente. Neste sentido podem ser utilizados sistemas passivos com passagens de ar ou aberturas, ou sistemas ativos, que fazem uso de uma bomba de ar.
- **Componentes eletrónicos:** representam a capacidade computação e comunicação do nó (como microcontroladores ou computadores de placa única). Estes componentes são necessários para o controlo do sensor, gestão do sinal e conversão analógica para digital, processamento digital e armazenamento de dados. Também se inserem nesta categoria os sistemas de comunicação com servidores, que asseguram a capacidade de transmissão e receção de informação. Estes podem ser sistemas baseados em transmissão por *WiFi*, rede de dados móveis, que vão desde GSM1 a 5G, *LoRaWAN*, entre outras.

- **Fornecimento de eletricidade:** permitem acesso a recursos de energia como a rede elétrica ou bateria e fazem a gestão da energia (suavização e estabilização do sinal e backup).
- **Invólucro físico ou abrigo:** permitem proteger os componentes dos elementos naturais como chuva, humidade, temperaturas extremas, poeiras e animais.
- **Softwares/firmware:** incluem o software do dispositivo, e o da *cloud* para aquisição, processamento e transferência de dados e que permitem uma gestão remota.

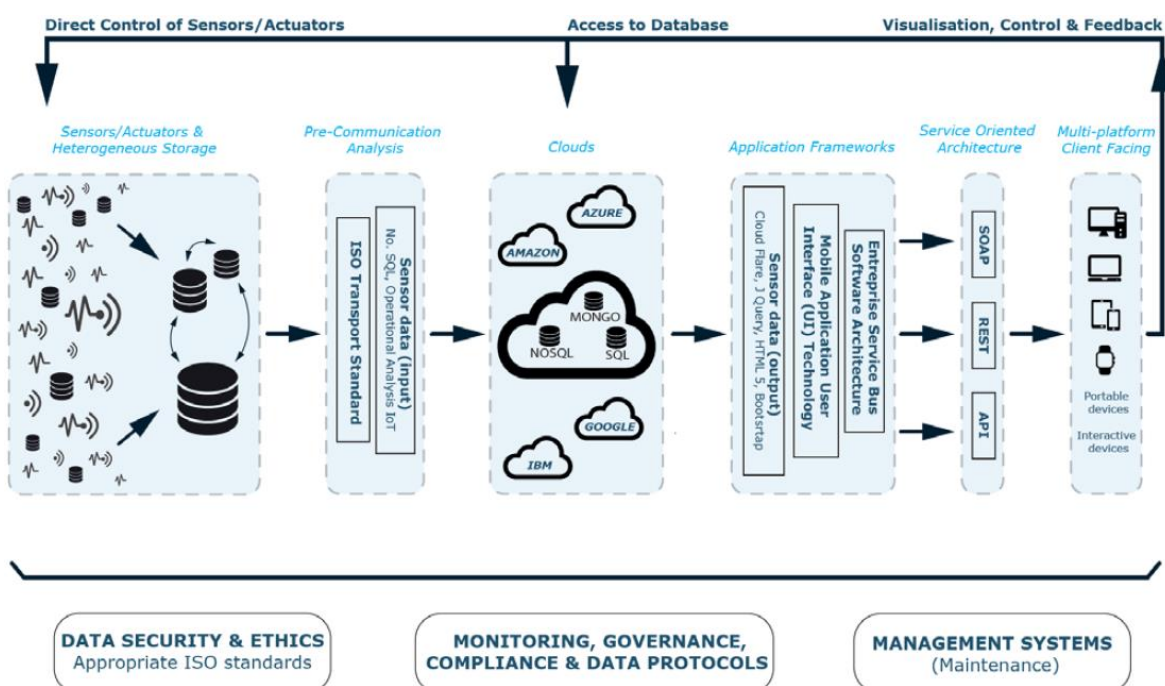


Figura 12 - Arquitetura geral de uma rede de monitorização com recurso a sensores (WMO, 2020).

O desempenho dos sensores varia de acordo com o fabricante, modelo e *firmware*, e não se deve presumir que todos os modelos de sensores dão para monitorizar um poluente específico, mesmo aqueles que usam exatamente os mesmos componentes do sensor, terão um desempenho semelhante (Borrego et al. 2016; Borrego et al. 2018). Normalmente, as avaliações comparam um pequeno número de sistemas de sensores que tendem a mostrar vários graus de precisão ou comparabilidade (avaliações AQ-SPEC, EPA). Os sensores disponíveis comercialmente são frequentemente testados em triplicado (ou seja, três unidades da mesma marca / modelo) tanto no campo (cerca de um mês de medições colocadas) e no laboratório (o tempo de teste da câmara pode variar dependendo do sensor testado/poluente medido/outras variáveis). Há uma consciência crescente da necessidade de testar a variabilidade entre lotes de

sensores idênticos também. Os esforços de avaliação demonstraram problemas de qualidade de dados comuns e exclusivos entre uma variedade de sensores de qualidade do ar, mas poucos fabricantes detalham os problemas que os utilizadores podem encontrar ou oferecem sinalização de dados ou sugerem procedimentos de controle de qualidade. Essas observações destacam a necessidade de indicadores de qualidade de dados comuns e simples.

Os sensores para MQA têm como vantagem, face ao equipamento de monitorização tradicional, a possibilidade de serem usados em várias estações de monitorização compactas e de baixo custo, aumentando a densidade espacial das medições de qualidade do ar. Portanto, em combinação com as medições das estações de referência, estes equipamentos apresentam potencial considerável para aplicações em novas estratégias de controlo de qualidade do ar; mapeamento com maior resolução espacial da poluição do ar em pequenas áreas, validação de modelos de dispersão atmosférica e/ou avaliação da exposição da população (Borrego et al., 2016). O número e o tipo de plataformas de sensores disponíveis comercialmente têm vindo a aumentar rapidamente. Considerando que o preço dos sensores de gás individuais varia de 20 € a 100 €, o custo de um nó de sensor comercial que inclui vários os sensores podem atingir 500 € - 5000 € (Castell et al., 2016). A ampliação da disponibilidade comercial da tecnologia de sensores tem contribuído para a rápida adoção de sensores de baixo custo para a MQA por iniciativas científicas dos cidadãos e autoridades públicas (F. Karagulian et al., 2019).

3.5. Casos de estudo de monitorização com redes de sensores

Vários projetos de investigação exploram a possibilidade de recolher dados de qualidade do ar usando plataformas de estações de qualidade do ar com sensores de baixo custo colocadas em áreas urbanas. Exemplos incluem o OpenSense (www.opensense.ethz.ch) e o Citi-Sense-MOB que usam plataformas móveis para monitorizar a variação da poluição do ar nas cidades, Everyaware (www.everyaware.eu) que ajuda os cidadãos a recolher e partilhar dados de poluição sonora e atmosférica e Citi-Sense (www.citi-sense.eu) que capacita as pessoas a usar plataformas de qualidade do ar de baixo custo em 8 cidades através da Europa. Outro exemplo é o hackAIR (www.hackair.eu) que visa conscientizar os cidadãos sobre a exposição a partículas (PM2.5 e PM10), e teve como casos de estudo comunidades na Noruega, Alemanha, Bélgica e Grécia. Atualmente, a aplicação hackAIR está disponível para Android e iOS, ligada a uma plataforma online em www.hackair.eu, onde os cidadãos europeus podem verificar a qualidade do ar na sua vizinhança com base nos dados de MQA ambiente disponíveis e ver os dados das próprias medições do hackAIR. O *National Institute for Public Health and the Environment* (RIVM) também lançou um portal experimental de dados de sensores com o objetivo de disponibilizar dados de sensores ambientais aos cidadãos e entidades locais da Holanda através de um banco de dados central. Os dados do RIVM são aplicados para o desenvolvimento de algoritmos de calibração em tempo real e para a assimilação de dados dos sensores em mapas de qualidade do ar. Num futuro próximo, o RIVM pretende desenvolver uma rede de monitorização na qual terceiros, incluindo cidadãos, possam participar ativamente (Bartonova et al., 2019).

A nível mundial, a plataforma da *openAQ* dá acesso aos dados de vários projetos com redes de sensores para além dos dados de estações de referência.

Outras redes foram implantadas com propósitos semelhantes às redes mencionadas anteriormente. Estas encontram-se no anexo 6, que resumem as principais redes de sensores existentes a nível mundial.

Para além das redes, existem também bastantes plataformas de partilha de dados de várias redes de sensores. Destas, as mais importantes encontram-se referidas no anexo 7.

As redes de sensores têm alto potencial para complementar as redes de monitorização de referência e auxiliar na promoção da melhoria da qualidade do ar, no entanto é importante a existência de programas que avaliem quantitativamente o desempenho dos sensores de baixo custo em comparação com medições de referência. Estes programas permitem que os investigadores controlem as condições e examinem a resposta dos sensores quando expostos a uma ampla gama de temperaturas, humidade relativa e concentrações de gases ou partículas.

Este tipo de programas de avaliação estão a ser promovidos por diferentes organizações por todo o mundo, resultando em relatórios que tentam descrever a precisão e exatidão dos sensores (Borrego et al. 2016; Borrego et al. 2018; Collier-Oxandale et al. 2020a; Crilley et al. 2018; Crilley et al. 2020; DeWitt et al. 2020; Duvall et al. 2016; Jiao et al. 2016; Karagulian et al.

2019; Kosmopoulos et al. 2020; Tryner et al. 2020; Wang et al. 2020b). Alguns exemplos de programas são:

- The *Joint Research Centre (JRC)*: efetuam várias avaliações em laboratório e de campo de sistemas de sensores (Spinelle et al. 2015b; Spinelle et al. 2016). O JRC colabora também no desenvolvimento de protocolos para avaliar sensores (Schneider et al. 2019; Spinelle et al. 2014; Spinelle et al. 2015a; Spinelle et al. 2017b) e no desenvolvimento de plataforma AirSensEUR (Kotsev et al. 2016).
- *EuNetAir Air Quality Joint Intercomparison Exercise*: avaliaram a performance dos sensores em ambiente urbano comparando os resultados com métodos de referência. Foi usado um laboratório móvel, numa zona tráfego para realizar medições contínuas com analisadores de referência padrão para CO, NOx, O₃, SO₂, PM₁₀, PM_{2,5}, temperatura, humidade, velocidade e direção do vento, radiação solar e precipitação. Aproximadamente 200 sensores foram colocados nesta plataforma (Borrego et al., 2018).
- *US Environmental Protection Agency (USEPA)*: Para além dos usuais testes em laboratório e campo a USEPA testou sensores sob condições específicas, como incêndios florestais (Holder et al. 2020b), na presença de fugas industriais (Thoma et al. 2017) e em ambientes interiores (<https://www.epa.gov/air-research/wildfire-study-advance-science-partnerships-indoor-reductions-smoke-exposures>). Uma ampla gama de projetos de desenvolvimento, avaliação e aplicação de sensores estão publicados no site *Air Sensor Toolbox* (<https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox>). USEPA também tem trabalhado em fornecer protocolos consistentes e padronizados para avaliar e descrever o desempenho dos sensores atmosféricos.
- *The South Coast Air Quality Management District (Los Angeles, USA)*: fornece testes rigorosos e informações imparciais sobre o desempenho de sensores de baixo custo comercialmente disponíveis para medições de qualidade do ar em diferentes condições ambientais. O programa *Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQ-SPEC)* desenvolveu métodos de teste de campo e de laboratório para avaliar o desempenho de diferentes dispositivos sensores. Vários relatórios de testes de campo de diferentes tipos de sensores aparecem no AQ -Site do SPEC (<http://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations/field>).
- AIRLAB (Paris, France): aplica uma abordagem holística à avaliação do sistema de sensores, considerando ergonomia, portabilidade, pertinência à aplicação desejada e custo, bem como desempenho meteorológico (<http://www.airlab.solutions/en/projects/microsensor-challenge>).

Em Portugal, no distrito de Aveiro, em Águeda, foram instaladas 8 estações de qualidade do ar em áreas urbanas. Esta rede envia os dados para uma base numa plataforma intuitiva com uma interface que permite aos utilizadores aceder às leituras em tempo real, consultar históricos ou

efetuar o download dos cerca de 90 parâmetros meteorológicos, de qualidade do ar pressão sonora em ambiente urbano. Lisboa é outro caso de estudo onde será instalada uma rede de sensores de monitorização ambiental, com 80 estações que incluem 658 sensores para acompanhar a qualidade do ar, níveis de ruído e contadores de tráfego. Estes dados são divulgados sob a forma de indicadores e gráficos através de uma plataforma online.

4. Caso de estudo: cidade de Aveiro

No caso de estudo do ambiente no projeto Aveiro STEAM City recorreu-se à instalação de uma rede de sensores ambientais com o objetivo principal de avaliar as condições ambientais relacionadas com a qualidade do ar, ruído e meteorologia. Mais especificamente este caso de estudo tem os seguintes objetivos:

- Avaliar a qualidade do ar, ruído e microclima urbano, com base em dados de monitorização e modelação;
- Avaliar de que forma pode ser planeado o tráfego rodoviário de forma a reduzir a exposição dos cidadãos à poluição atmosférica;
- Criar um mapa ambiental da cidade a ser fornecido aos cidadãos, decisores políticos e investigadores;
- Contribuir para o desenvolvimento de ferramentas inovadoras de divulgação e alerta em relação à qualidade do ar e ruído, junto dos cidadãos e dos decisores.

A rede de monitorização instalada é composta por 9 estações de qualidade do ar, equipadas com sensores de PM10, PM2,5, NO₂, O₃, CO, os principais poluentes atmosféricos medidos, e adicionalmente, CO₂; 9 estações de ruído e 2 estações meteorológicas.

Os dados provenientes da rede são enviados em tempo real para uma plataforma online gerida pela Câmara Municipal de Aveiro que disponibiliza a informação de forma amigável a todos os cidadãos.

4.1. A cidade Aveiro

A cidade de Aveiro é uma cidade costeira do litoral centro de Portugal e localiza-se na periferia da Ria de Aveiro, rodeada por zonas pantanosas e zonas rurais (Pinho & Orgaz, 2000).

Aveiro tem um clima mediterrâneo e, de acordo com a classificação de Köppen, temperado húmido, com um verão seco e suave (Cbs), com uma forte influência marítima (Borrego et al., 2016; IPMA, 2021b).

A temperatura média anual em Aveiro é de cerca de 15°C e os valores médios de temperatura mensais mais elevados ocorrem nos meses de Verão (julho, agosto e setembro) (Figura 13).

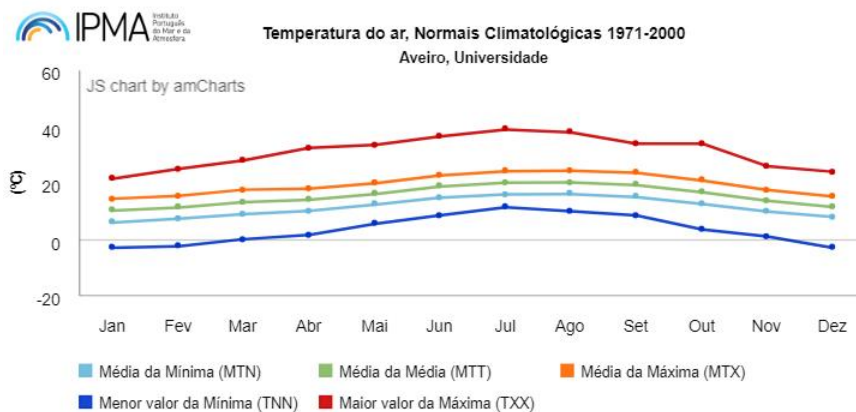


Figura 13 - Normais climatológicas das temperaturas médias, mínimas e máximas entre 1971 e 2000 para Aveiro (IPMA, 2021c).

A precipitação anual nesta estação é de cerca de 1880 mm e é mais abundante nos meses de outono e inverno, sendo que a primavera também apresenta valores significativos de precipitação, embora com variações mais significativas. O verão apresenta pouca precipitação, principalmente no mês de julho.

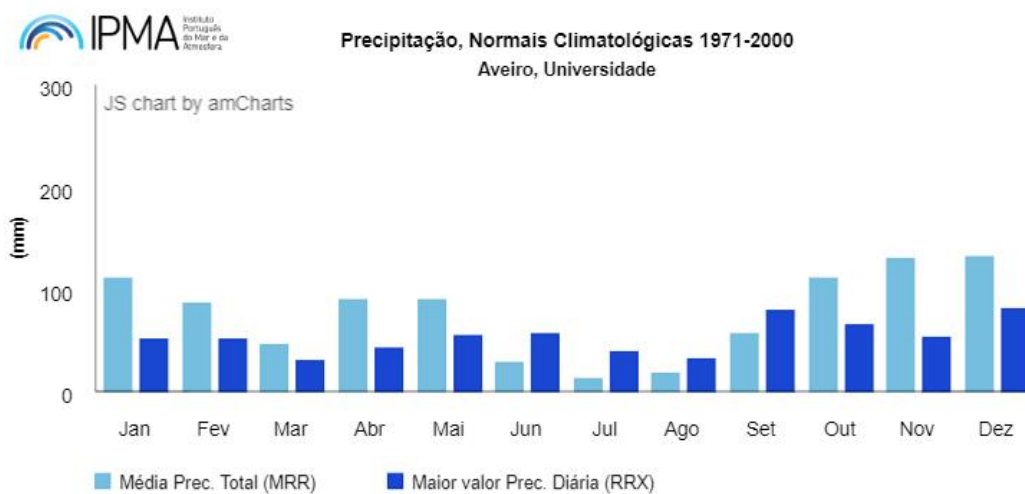


Figura 14 - Variação da precipitação segundo as normais climatológicas de 1971-2000 (IPMA, 2021c).

A direção do vento em Aveiro é predominante do quadrante Norte/Noroeste de onde sopra cerca de 35% do tempo (Figura 15). No Inverno, a direção do vento é mais variada, com ventos de Sul, Norte e Sudeste. Na Primavera e verão a variedade é menor com ventos predominantes de Noroeste. No Outono, a predominância dos ventos de Noroeste vai diminuindo, aumentando, progressivamente, a influência dos ventos de Sudeste e Sul (CMA, 2019c).

O regime do vento é bastante afetado pelas brisas de mar que são mais intensas no verão devido ao desenvolvimento de maiores gradientes de temperatura entre o oceano e o continente, ocorrendo sobretudo durante a tarde. Durante o período noturno, devido ao arrefecimento ser mais rápido em terra, acontece o oposto e o vento sopra do quadrante Este/Sudeste (Evtugina, M.; Nunes, T.; Pio, 2001; Sorte et al., 2018).

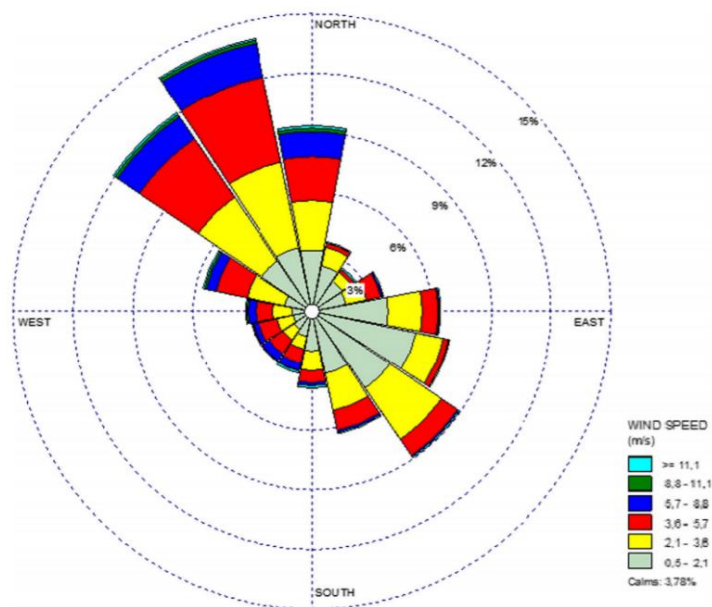


Figura 15 - Rosa dos ventos para a cidade de Aveiro com dados recolhidos entre 2006 - 2013, obtido a partir de medições realizadas a 10 m de altura na torre meteorológica da Universidade de Aveiro (Sorte et al., 2018).

Em Aveiro, a humidade relativa é mais elevada no outono e inverno. As médias anuais de humidade relativa estão compreendidas entre 72% e 83% devido a elevadas taxas de evaporação permanentes na Ria, à humidade trazida pelos ventos amenos que sopram do oceano e humidade trazida pela Corrente do Golfo (CMA, 2019c).

A cidade de Aveiro é sede do município de Aveiro que tem uma área total de 197,5 km² (CMA, 2019b) e 80 880 habitantes (dados preliminares dos Censos de 2021) (INE, 2021). Este é constituído por 10 freguesias (Figura 16) sendo elas: Glória e Vera Cruz (onde se localiza o centro da cidade de Aveiro), Esgueira, Aradas, Santa Joana, São Bernardo, São Jacinto, Cacia, Eixo e Eirol, Oliveirinha e Requeixo e Nossa Senhora de Fátima e Nariz. A cidade é capital de distrito com uma área de 8 km², com tendência crescente no número de habitantes (Borrego et al., 2016; INE, 2021).

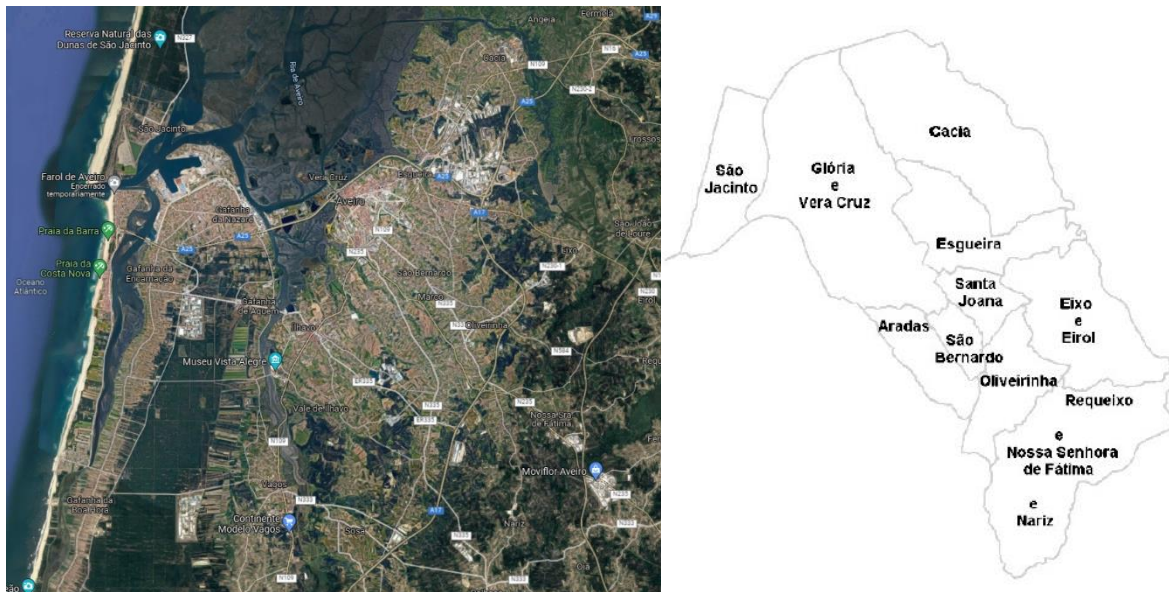


Figura 16 – Imagem de satélite (retirada do *google maps*) e divisão das freguesias do município de Aveiro (CMA, 2019b).

Aveiro situa-se no centro de uma região de bons acessos rodoviários, ferroviários e marítimos, como é possível verificar no Anexo 3. Possui a norte a Região Metropolitana do Porto, distando cerca de 87 km do aeroporto Francisco Sá Carneiro e cerca de 65 km da Cidade de Coimbra. Esta distância reduzida a estas 2 cidades e a existência de boas acessibilidades, possibilita deslocções para os postos de trabalho, serviços administrativos e trocas comerciais.

No eixo ibérico, Aveiro localiza-se no extremo de uma das vias de distribuição mais importantes na ligação Portugal-Espanha, fazendo parte da sub-região atlântica com as infraestruturas portuárias e zonas balneares mais próximas de parte do território de Castela e Leão, principalmente Salamanca. Na Figura 17 é possível observar localização geoestratégica de Aveiro.

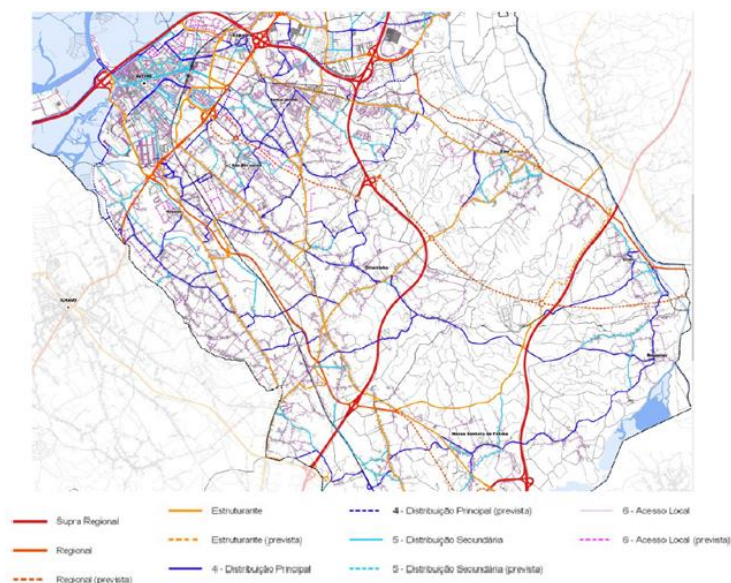


Figura 17 - Extrato da Carta da hierarquia funcional da Rede Rodoviária (Câmara Municipal de Aveiro, 2019a).

A localização geoestratégica de Aveiro no contexto nacional, no centro litoral com a Ria como elemento natural de maior diferenciação, e a presença de infraestruturas que permitem diferentes formas de mobilidade, com destaque para o porto de Aveiro, a linha ferroviária do Norte e as vias de distribuição principais A1, A25 e A17, permitem que seja como plataforma privilegiada na promoção de dinâmicas socioeconómicas a escalas supramunicipais (Câmara Municipal de Aveiro, 2019a).

Relativamente ao centro da cidade de Aveiro, este apresenta na sua maioria espaço edificado habitacional e comercial, delimitado pelas linhas de água e ria. A área urbana é rodeada por terrenos agrícolas e áreas rurais principalmente a Este da linha ferroviária do Norte, zonas para as quais a cidade tem vindo a expandir-se. Adicionalmente, existe uma área industrial significativa a Nordeste do seu centro urbano, nas freguesias de Esgueira e Cacia, onde se encontram grandes empresas, incluindo a *The Navigator Company*.

A cidade de Aveiro está atualmente consolidada com a cidade tradicional e a cidade nova. O seu crescimento segue um padrão radial, com o surgimento de novos centros, induzidos por opções de localização ou valorização de atividades e equipamentos geradores novas áreas urbanas por exemplo em Aradas/Glicínias e Esgueira.

Tirando partido das boas e diversificadas infraestruturas que existem até ao concelho de Aveiro e das oportunidades de emprego e de serviços de educação, realizam-se atualmente milhares de movimentações pendulares diárias para o concelho. Através da análise do anexo 4, o maior número de movimentos pendulares realizados ocorre entre o concelho de Aveiro e Ílhavo (7.153 deslocações pendulares). Seguem-se os concelhos de Albergaria-A-Velha, Oliveira do Bairro, Vagos, Estarreja e Águeda. Em relação aos movimentos pendulares que ocorrem entre os

concelhos de Aveiro, mas fora do distrito, os que ocorrem em maior número são, por ordem decrescente, Vila Nova de Gaia, Porto, Coimbra, Santa Maria da Feira e Oliveira de Azeméis. Relativamente às movimentações pendulares dentro do concelho, como é possível verificar pela figura 18, estas mantiveram-se na mesma ordem de grandeza, cerca de 40.500 deslocações diárias, entre 2001 e 2011. No entanto, o número total de deslocações pendulares para fora do concelho aumentou de 20.500 para mais de 25.000, de 2001 a 2011, representando um aumento de 21%. No conselho de Aveiro, em 2011, a forma de mobilidade mais utilizada era o automóvel (68%), seguido de andar a pé (17%), autocarro (9%) e bicicleta (6%).

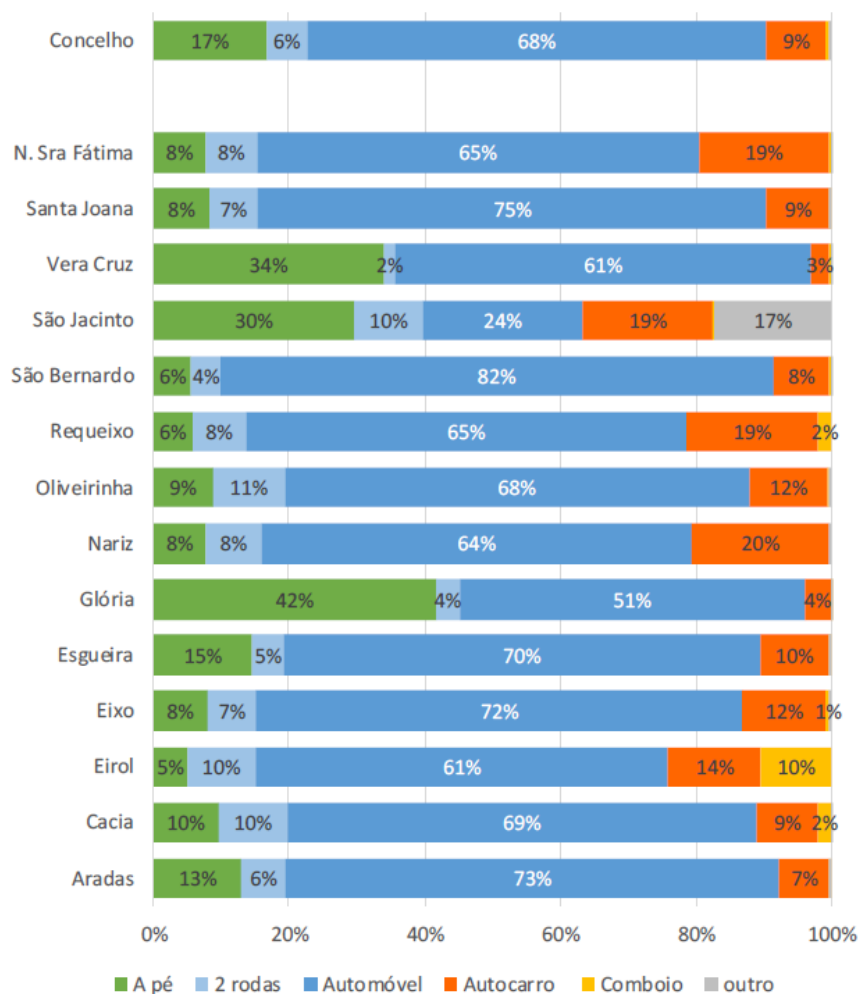


Figura 18 - Modos de transporte usados nas deslocações internas ao concelho (CMA, 2019a).

Comparando os valores entre 2011 e 2001, com exceção do transporte individual que teve um aumento de 15%, passando de 53% para 68% em 2011, os restantes modos, tiveram quedas significativas que demonstraram o insucesso das medidas de mobilidade implementadas para inverter as tendências, havendo uma regressão na mobilidade sustentável que são objetivos no Plano Estratégico de Desenvolvimento Urbano de Aveiro. Atualmente, com a modernização da

frota, compra de 3 autocarros elétricos e adaptação dos percursos espera-se uma melhoria neste âmbito em relação a 2011.

4.2. Rede de sensores do projeto Aveiro STEAM City

No total a rede possui 9 locais de amostragem, todos eles dotados com estações de monitorização de qualidade do ar (QA) e ruído (R) e apenas dois apresentam uma estação meteorológica (Meteo). Estas estações foram distribuídas por locais previamente selecionados de forma a ter em conta a influência das fontes urbanas da cidade de Aveiro.

As estações de monitorização são:

- 01 - Estação de Comboios CP (QA + R) - Estação REFER
- 02 - Centro de Congressos (QA + R) - CC
- 03 - Bombeiros Velhos de Aveiro (QA + R + Meteo) - BOMB
- 04 - Universidade de Aveiro, no Edifício da Antiga Reitoria (QA + R) - UA
- 05 - Casa Morgados da Pedricosa (QA + R) - Morgados
- 06 - Biblioteca Municipal (QA + R + Meteo) - BIB
- 07 - Museu de Arte Nova (QA + R) - Museu
- 08 - CETA (Círculo Experimental de Teatro de Aveiro) (QA + R) - CETA
- 09 - Capela N. S. Alegria (QA + R) - Capela

A Figura 19 apresenta a localização das estações de monitorização com os dois locais que possuem adicionalmente estações meteorológicas a azul e a estação de referência de monitorização da qualidade do ar de Aveiro sinalizada a vermelho.

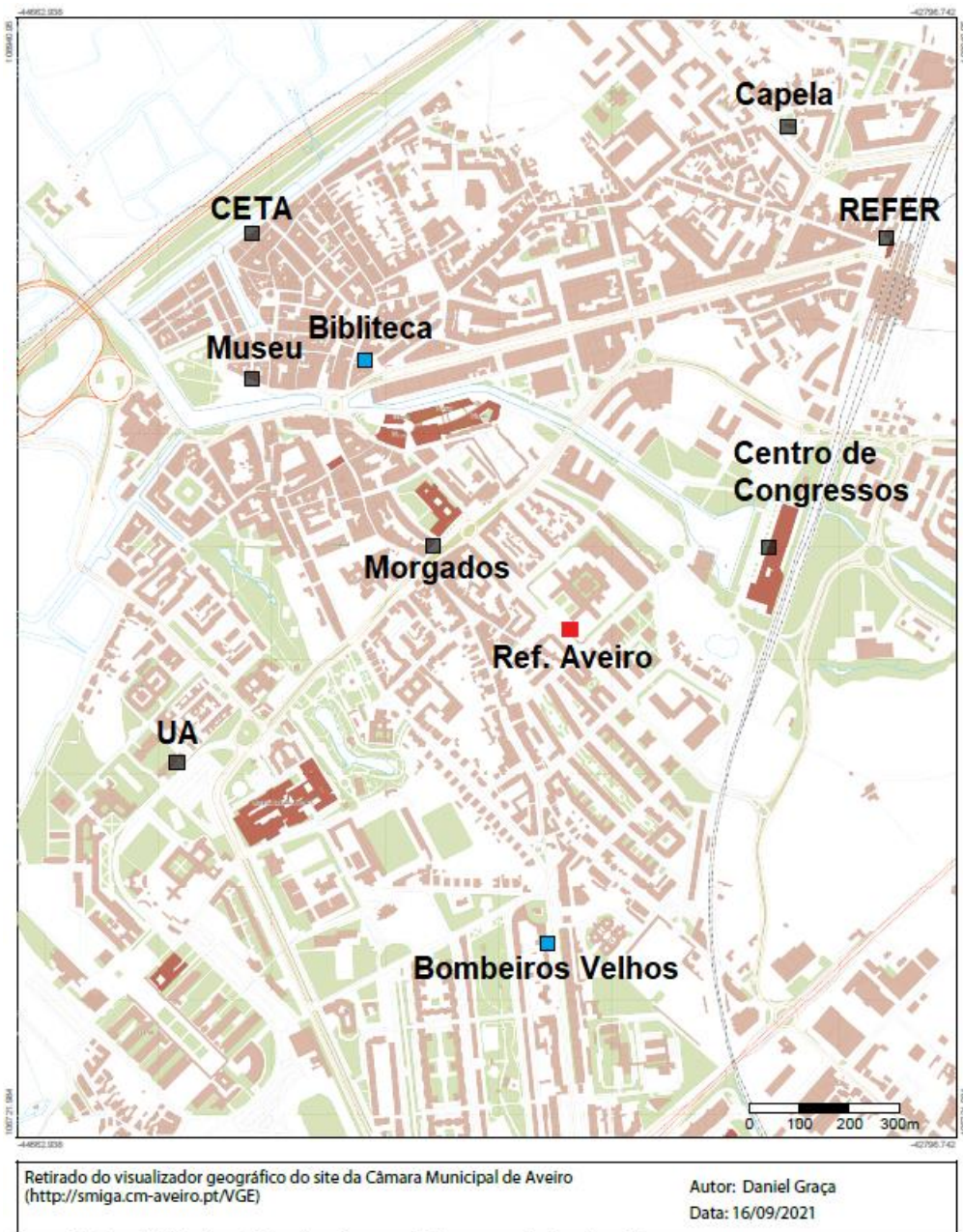


Figura 19 – Mapa com os locais de instalação das estações de monitorização de qualidade do ar, ruído e estações meteorológicas.

As estações de monitorização de qualidade do ar e meteorologia começaram a ser instaladas no início de abril de 2020 e a última foi instalada em novembro de 2020. Na tabela III são apresentadas as datas de instalação de todas as estações de monitorização.

Tabela III - Datas de instalação das estações de qualidade do ar e meteorologia.

Local	Qualidade do ar	Meteorologia
Biblioteca Municipal	05/06/2020	05/06/2020
Museu de Arte Nova	15/05/2020	---
C.E.T.A.	08/04/2020	---
Edifício REFER	27/11/2020	---
Capela N. S. da Alegria	29/05/2020	---
Casa dos Morgados	22/05/2020	---
Centro de Congressos	08/05/2020	---
Bombeiros Velhos	24/04/2020	18/06/2020
Antiga Reitoria UA	03/04/2020	---

As estações de qualidade do ar são constituídas por vários componentes descritos na Figura 20. Todas as estações possuem monitorização constante da temperatura dos sensores, monitorização de caudal de fluxo, climatização interna, outros componentes eletrónicos auxiliares para fazer o processamento e transferência de dados para os servidores e proteção contra elementos externos.

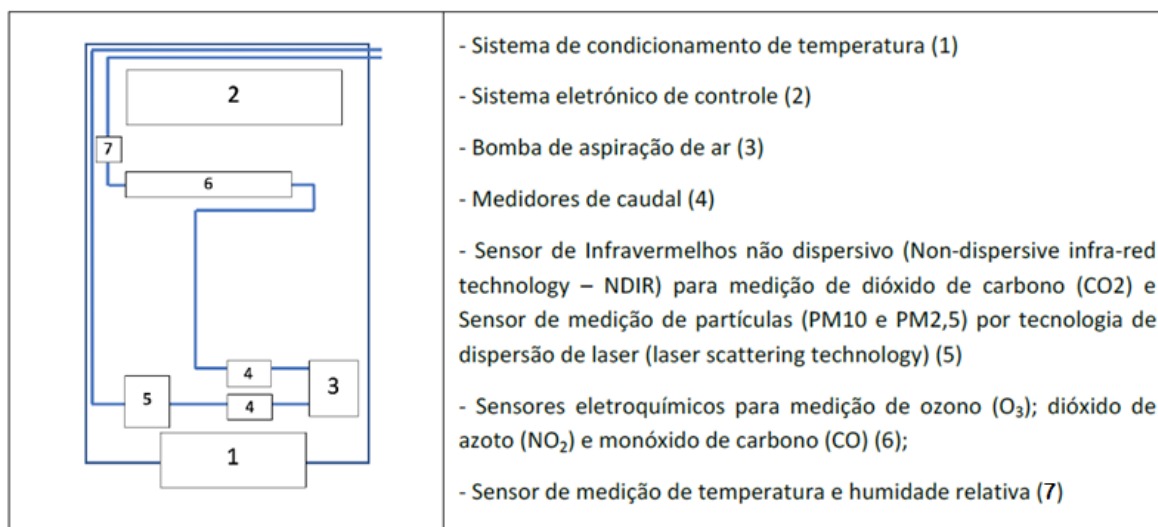


Figura 20 - Esquema da estação de qualidade do ar.

Na Figura 21 apresentam-se, como exemplo, as fotografias das estações de qualidade do ar no Edifício da Antiga Reitoria e Centro de Congressos, e uma estação meteorológica.



Figura 21 - Estações de monitorização da qualidade do ar no Edifício da Antiga Reitoria (esquerda), Centro de Congressos (centro), e uma estação meteorológica (direita).

As características dos sensores de poluentes atmosféricos instalados são apresentadas na Tabela IV.

Tabela IV - Principais características dos sensores implementados na rede.

Poluente	Tecnologia	Gama de concentrações medidas	Resolução temporal das medições (minutos)
PM10	Dispersão de luz	0 - 500 $\mu\text{g.m}^{-3}$	5
PM2,5	Dispersão de luz	0 - 500 $\mu\text{g.m}^{-3}$	5
O ₃	Sensor Eletroquímico	5 - 500 $\mu\text{g.m}^{-3}$	15
NO ₂	Sensor Eletroquímico	5 - 500 $\mu\text{g.m}^{-3}$	15
CO ₂	Sensor de Infravermelhos não dispersivo	350 - 5 000 ppm	5
CO	Sensor Eletroquímico	100 - 15 000 $\mu\text{g.m}^{-3}$	15

Antes de serem instalados nos locais de monitorização, os sensores de gases são calibrados com gases de referência. Para além disso, todos os sensores são sujeitos a condições de medição de ar ambiente exterior e comparados com medições de instrumentos de referência colocados no exterior a uma curta distância, de forma a validar a performance dos sensores.

Relativamente às estações meteorológicas, a sua instalação foi feita num mastro com cerca de 1,5 a 2 metros colocado no topo dos edifícios.

As estações de monitorização meteorológica são constituídas por:

- Sensor de medição de temperatura, humidade relativa do ar e pressão atmosférica;
- Sensor de medição de radiação global;
- Sensor de medição de radiação ultravioleta;
- Pluviómetro;
- Anemómetro e sensor de medição da direção do vento.

As principais características destes parâmetros medidos estão representadas na tabela V. A resolução temporal das medições de todos os parâmetros medidos é de 5 minutos.


Tabela V - Principais características dos parâmetros medidos das estações meteorológicas.

Parâmetro	Tecnologia	Gama de medição
Temperatura do Ar	Sensor capacitivo	- 40°C - 125°C
Humidade relativa	Sensor capacitivo	0% - 100%
Pressão	Sensor Eletroquímico	300 - 1100 hPa
Velocidade do Vento	Anemómetro	0,5 - 80 m/s
Direção do Vento	Cata-vento	0° - 360°
Pluviómetro	Copo de Chuva	0 a 999.8 mm/dia
Índice Ultravioleta	Fotodiodo	Índice de 0 a 16
Radiação solar	Fotodiodo	0 - 1800 W/m ²

Para comunicação dos dados recolhidos, as estações de monitorização instaladas utilizam a tecnologia *Ethernet* e *LoRa* de forma modular, e suportam outros possíveis módulos de comunicação tecnologias *WiFi*, *NB-IoT*, *3G/4G* ou outros.

Uma vez instaladas as estações de monitorização de qualidade do ar e de meteorologia, estas podem sofrer ajustes de zero e correções da sensibilidade dos sensores através de meios de comunicação sem fios.

Nos locais de monitorização previamente selecionados foi importante fazer um levantamento das características envolventes. Desta forma foi possível identificar possíveis fontes emissoras de poluentes nas proximidades de cada estação de monitorização assim como características do terreno que possam influenciar as medições de poluentes em cada uma das estações. Para preencher as fichas de caracterização foram obtidos dados a partir de imagens de satélite e informações online. De forma a compilar as informações obtidas foi concebida uma ficha de caracterização para cada um dos locais de monitorização, onde foram registados vários parâmetros qualitativos como: observações sobre as utilizações das áreas envolventes, atividades económicas, serviços e existência de obras na área de monitorização; e quantitativos como: número de paragens de autocarro, contagens de veículos em vários horários, número de apartamentos, chaminés de residências, estradas e respetivas vias, faixas e semáforos das estradas principais, de forma a ser possível identificar fontes de poluição pontuais, em linha e em área.



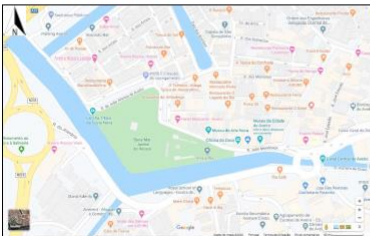
URBAN INNOVATIVE ACTIONS
AVEIRO STEAM CITY – Work Package 8 / A8.3 AIO Use Case: Environment

Assunto: Visita técnica e recolha de informação dos locais de amostragem

1 - Presenças: _____ 2 - Data: _____

3 - Nº e localização: _____ 4 - Coordenadas: _____

5 - Mapa e caracterização do local _____ 6 - Intervalo das fotos: _____



7 – Caracterização do espaço envolvente

Espaço envolvente		Perguntas			Observações	
Estradas (*Nºs atribuídos na legenda do mapa)	Raio de 250m	Nº de faixas implicadas*	Características Pavimentos não asfaltados?	Sim	Não	
	Raio de 150m		Rotundas?	Sim	Não	
		Passadeiras?	Sim	Não		
	Paragens de autocarros?	Sim	Não			
Parques de estacionamento (num raio de 250m)						
Zonas habitacionais (num raio de 100m)	Nº de casas/apartamentos?					
	Nº de chaminés residenciais?					

Legenda:

Comércio (num raio de 250m)	
Cafés / restauração (num raio de 250m)	
Lazer/turismo	
Divertimento noturno (num raio de 150m)	
Instituições de ensino (num raio de 250m)	

8 – Contagem de tráfego rodoviário (nºs atribuídos na legenda do mapa)

Nome da rua:			Nome da rua:			Nome da rua:		
Intervalo de contagem	Tempo inicial	Tempo final	Intervalo de contagem	Tempo inicial	Tempo final	Intervalo de contagem	Tempo inicial	Tempo final
Sentido: _____			Sentido: _____			Sentido: _____		
1 - LP: _____	1 - LP: _____	1 - LP: _____	1 - LP: _____	1 - LP: _____	1 - LP: _____	1 - LP: _____	1 - LP: _____	1 - LP: _____
2 - LM: _____	2 - LM: _____	2 - LM: _____	2 - LM: _____	2 - LM: _____	2 - LM: _____	2 - LM: _____	2 - LM: _____	2 - LM: _____
3 - PP: _____	3 - PP: _____	3 - PP: _____	3 - PP: _____	3 - PP: _____	3 - PP: _____	3 - PP: _____	3 - PP: _____	3 - PP: _____
4 - PM: _____	4 - PM: _____	4 - PM: _____	4 - PM: _____	4 - PM: _____	4 - PM: _____	4 - PM: _____	4 - PM: _____	4 - PM: _____
5 - M: _____	5 - M: _____	5 - M: _____	5 - M: _____	5 - M: _____	5 - M: _____	5 - M: _____	5 - M: _____	5 - M: _____
Distância à estação: _____			Distância à estação: _____			Distância à estação: _____		

Observações:

Nº de veículos dentro de paragens LP
 Nº de veículos dentro de paragens LM
 Nº de veículos dentro de paragens PP
 Nº de veículos dentro de paragens PM
 Nº de veículos dentro de paragens M

Figura 22 – Ficha de caracterização dos locais monitorizados.

4.3. Emissões atmosféricas

Na Figura 23 estão representadas as emissões inventariadas pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA) para o concelho de Aveiro referente aos anos 2015, 2017 e 2019 (APA, 2021c). De acordo com os dados inventariados no concelho de Aveiro há uma tendência crescente na quantidade de emissões para PM10, PM2,5, NO₂ e Compostos Orgânicos Voláteis Não Metálicos (COVNM). A tendência é apenas decrescente para o CO devido a reduções nas emissões dos transportes e apesar do aumento das emissões na indústria e eletricidade. Os setores com mais impacto nas emissões são os da indústria e eletricidade, seguindo-se o setor dos transportes, o setor residencial e serviços, o setor dos resíduos e por último, o setor da agricultura. Em 2017, ocorreram vários incêndios florestais no concelho de Aveiro, aumentando a contribuição para as emissões deste setor de forma significativa, principalmente nas emissões de CO e COVNM.

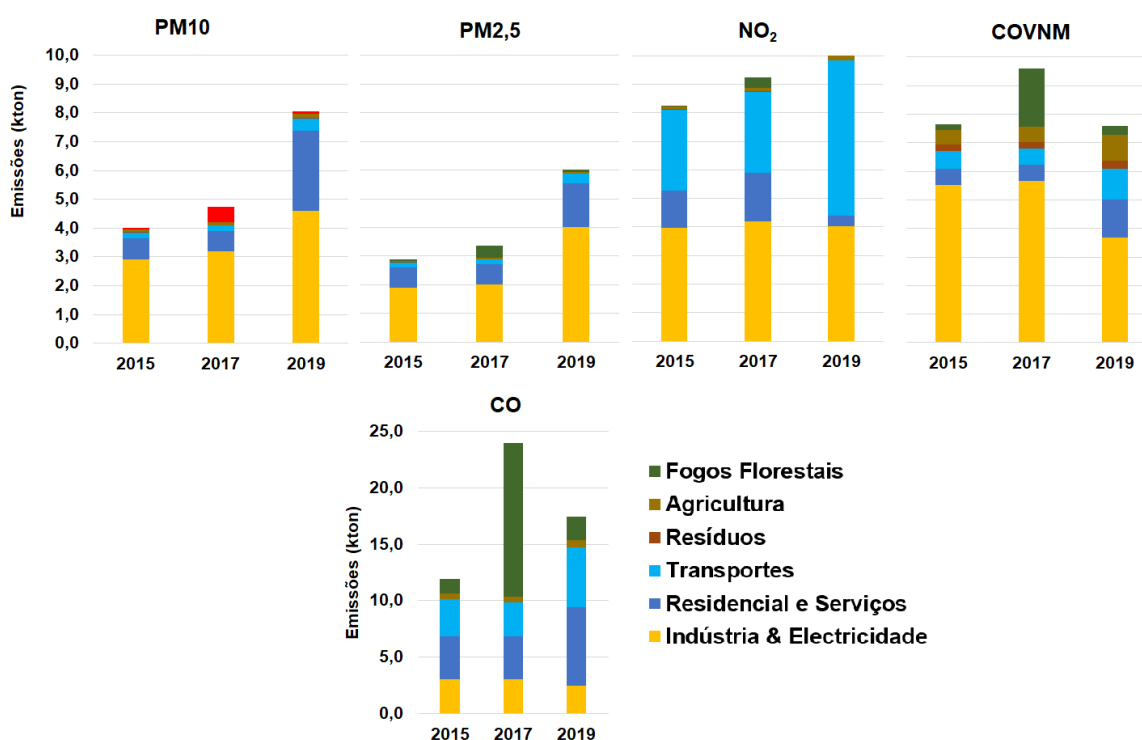


Figura 23 - Emissões atmosféricas no concelho de Aveiro em 2015, 2017 e 2019, por setor de atividade.

4.4. Estação da rede convencional

De forma a avaliar a qualidade do ar, a região de Aveiro, considerando os 11 municípios da CIRA (Comunidade Intermunicipal da Região de Aveiro), tem 3 estações de monitorização da qualidade do ar convencionais da rede nacional que são operadas pela CCDR centro, sendo elas: Aveiro (tráfego), Ílhavo (suburbana de fundo), Estarreja (suburbana de fundo).

A estação de qualidade do ar de referência de Aveiro está localizada na Escola Secundária José Estevão em frente à movimentada Avenida 25 de Abril (ver Figura 19), e pertence à zona de monitorização Aveiro/Ílhavo. É uma estação urbana de tráfego que se encontra em operação desde 2003 e os poluentes medidos por esta estação são PM10, NO₂, NO, NO_x e CO.

Esta zona apresentou em 2020, na maior parte dos dias, qualidade do ar boa (198 dias) e muito boa (88 dias), como é possível verificar pela Figura 24. O impacto das medidas de confinamento adotadas em 2020, devido à pandemia da COVID-19, levou a uma consequente melhoria generalizada da qualidade do ar, resultando num ano atípico.

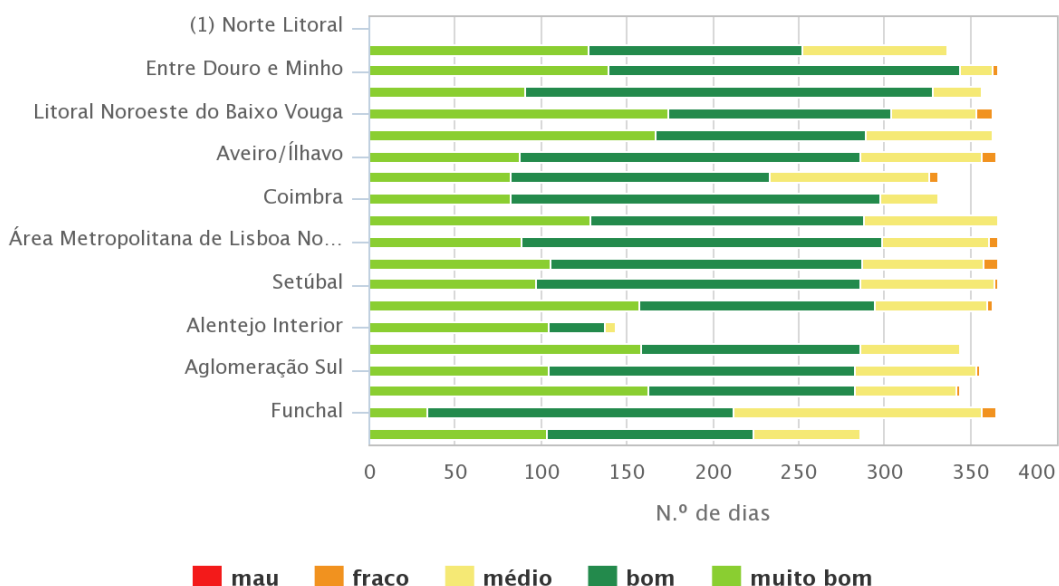


Figura 24 - Índices de qualidade do ar para 2020 para as várias zonas. Na zona Norte Litoral não se obteve informação suficiente para fazer o cálculo do IQA.) (APA, 2021e).

5. Tratamento e análise de dados

5.1. Metodologia

O diagrama da Figura 25 apresenta um resumo da abordagem adotada na análise dos dados da rede de sensores de qualidade do ar da cidade de Aveiro. Esta metodologia foi aplicada para um período de 9 meses, de 1 de junho a 31 de março.

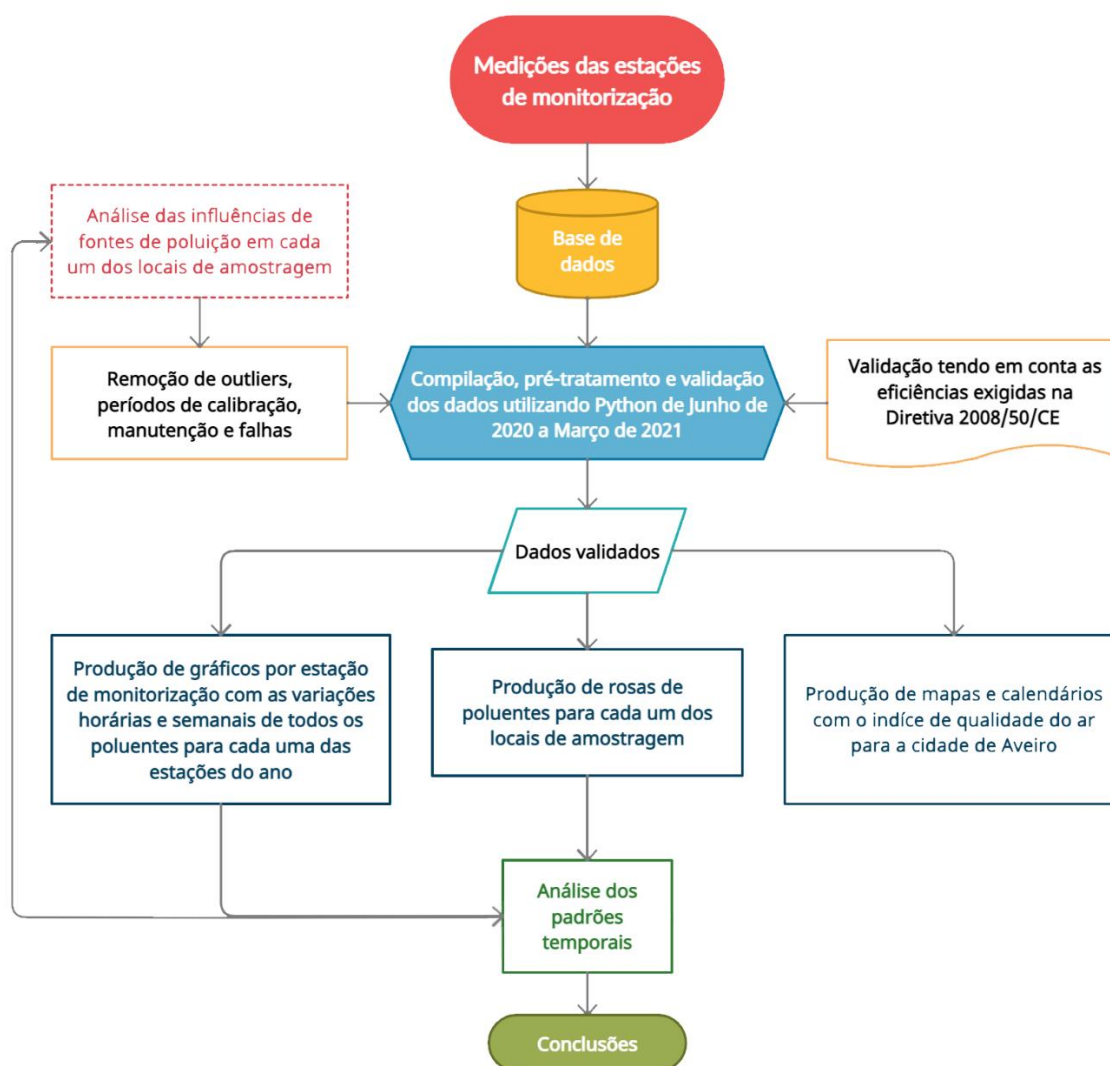


Figura 25 – Diagrama da metodologia usada para análise dos dados

Dada a elevada quantidade de informação, o primeiro passo passou por desenvolver um programa [parade](#) download automático dos dados do servidor da rede de sensores, inclui-se o pré-tratamento e compilação da informação numa compreensiva base de dados. Este processo foi realizado no *Visual Studio Code* recorrendo à linguagem de programação *Python*.

O pré-tratamento consistiu em transformar os dados numa base horária, para facilitar o futuro tratamento e análise dos mesmos. Considerando os intervalos horários com 75% de eficiência, de acordo com as eficiências mínimas exigidas na Diretiva 2008/50/CE, calculou-se médias horárias para os poluentes atmosféricos (PM10, PM2,5, NO₂, CO e O₃), velocidade e direção do vento, pressão atmosférica, humidade relativa, temperatura e radiação. Para a precipitação foram calculados os valores acumulados em cada hora.

O pré-tratamento de dados passou também por, através da análise das séries temporais, retirar *outliers* que coincidiram com períodos de calibração e/ou manutenção dos equipamentos e com problemas técnicos nas estações de monitorização. Esta análise e remoção de dados teve em conta os dados fornecidos pelas fichas de campo que permitiram perceber de que forma as particularidades de cada estação justificam certos padrões distintos relativamente a outras estações. Para além disso também os parâmetros meteorológicos e eventos de poluição atmosférica que ocorreram foram tidos em conta nesta análise e decisão de remoção de dados.

Por último, o script organizou os dados validados numa tabela, apresentando as concentrações em base horária dos vários parâmetros para o intervalo temporal de 1 de abril de 2020 a 31 de abril de 2021, tendo-se adicionado por último as concentrações dos poluentes da estação de referência de Aveiro, Ílhavo e Estarreja.

A partir dos dados compilados e validados, para cada local de monitorização e poluente analisado foram produzidos gráficos de variações horárias e semanais, para cada estação do ano, rosas de poluentes, mapas e calendários com o IQA.

O IQA indica o estado da qualidade do ar a curto prazo, sendo determinado diariamente. O cálculo é efetuado tendo por base as médias aritméticas diárias para PM10 e PM2,5 e máximos horários para NO₂ e O₃. O valor do IQA é traduzido para uma escala de cores dividida em cinco classes, de "Muito Bom" a "Mau", sendo representada pelo poluente que obteve a pior classificação. Os intervalos de classificação do índice (Figura 26) têm por base o conhecimento dos efeitos dos poluentes na saúde humana e os valores recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS).

Foram elaborados gráficos com os IQA (apresentados na secção 5.5) para cada local de monitorização que apresentam a frequência dos índices de qualidade do ar (de acordo com as normas da APA) para todo o período de dados considerado na análise, recorrendo a programação em *Python*.

Classificação	PM10	PM2.5	NO2	O3
Muito Bom	0-20	0-10	0-40	0-80
Bom	21-35	11-20	41-100	81-100
Médio	36-50	21-25	101-200	101-180
Fraco	51-100	26-50	201-400	181-240
Mau	101-1200	51-800	401-1000	241-600

Figura 26 - Intervalos de classificação da qualidade do ar para cada poluente (APA, 2021d).

Esta análise extensiva dos dados obtidos nos vários pontos de monitorização permite avaliar o estado da qualidade do ar na cidade de Aveiro, identificar fontes de poluição e discutir potenciais medidas de melhoria.

5.2. Eficiências das estações de monitorização

Apesar das manutenções e calibrações regulares, durante este período ocorreram vários problemas que afetaram a eficiência de recolha de dados das estações de monitorização, tais como:

- Problemas no bom funcionamento dos sensores devido a interferências de extremos de temperatura e humidade (condensação no interior da estação e/ou nas tomadas de amostragem);
- Desvios nas concentrações medidas pelos sensores e necessidade de ajustes no zero;
- Comprometimento de componentes internos das estações de monitorização (colmatagem dos filtros, rotura de porta filtros e problemas na regulação térmica da estação);
- Falhas de comunicação com sistemas de armazenamento de dados;
- Falhas de energia decorrentes problemas na rede elétrica e descargas elétricas;

Após o tratamento e validação dos dados, tendo em conta os problemas nas estações de monitorização e os requisitos da Diretiva Quadro, as eficiências globais para cada sensor de qualidade do ar, no período analisado, encontram-se na tabela VI.

Tabela VI - Eficiências (%) dos dados relativos a cada estação de monitorização por poluente para o intervalo temporal considerado na análise.

Locais de monitorização	Eficiências (%)				
	PM10	PM2,5	NO ₂	O ₃	CO
Biblioteca Municipal	85	85	77	77	81
Museu de Arte Nova	99	99	94	92	98
C.E.T.A	99	99	96	83	99
Edifício REFER	100	100	100	96	100
Capela N. S. Alegria	91	91	47	44	89

Casa dos Morgados	86	86	82	86	81
Centro de Congressos	99	99	95	96	99
Bombeiros Velhos	88	88	86	87	90
Antiga Reitoria UA	95	95	85	94	93
Estação de urbana de tráfego - Aveiro	98	-	98	-	90

Das estações instaladas praticamente todas tiveram eficiências superiores a 75% para cada poluente, com a exceção da Capela cuja eficiência para o NO₂ e O₃ foi de apenas 47% e 44%, respetivamente, devido a problemas sucessivos na estação de monitorização.

No tratamento de dados, foram verificados se os intervalos de dados apresentavam eficiências mínimas de 75% para cada estação do ano, de forma a não serem utilizados intervalos temporais não representativos da estação do ano.

Para analisar a dispersão dos poluentes atmosféricos é essencial analisar e cruzar as variáveis meteorológicas de forma a compreender de que forma a dispersão dos poluentes é influenciada pelas dinâmicas meteorológicas.

Na tabela VII são apresentadas as eficiências para os vários parâmetros das estações meteorológicas não se aplicando eficiências de recolha para estes parâmetros.

Tabela VII - Eficiências (%) de dados de todos os parâmetros meteorológicos de cada estação de monitorização para o intervalo temporal considerado na análise.

Locais de monitorização	Eficiências (%)						
	VV	DV	T	P	HR	Patm	Radiação
Biblioteca Municipal	98	98	98	98	98	98	98
Bombeiros Velhos	67	67	70	70	70	70	70

Relativamente às eficiências das estações meteorológicas é possível verificar que a estação dos Bombeiros Velhos apresentou eficiências baixas na recolha de dados válidos, principalmente devido à falha de transmissão de dados que ocorreu no início de 2021.

5.3. Análise dos dados meteorológicos

A velocidade e direção do vento são das variáveis mais importantes no que diz respeito à dispersão dos poluentes atmosféricos.

Na colocação das estações procurou-se proceder à sua instalação em locais elevados em relação aos edifícios circundantes e com menor perturbação possível no escoamento atmosférico de forma a ser representativa de uma parte da cidade. Na Biblioteca Municipal a estação foi colocada no topo do telhado num mastro de 2 metros e sem edifícios muito mais elevados nas proximidades. No entanto, apesar dos esforços para reduzir possíveis perturbações, a estação dos Bombeiros Velhos foi instalada a cerca de 10 metros de uma torre de treinos e a cerca de 50 metros de um bloco de prédios de 4 andares (cerca de 2 andares acima da estação), ambos a

Oeste da estação. Verificando-se estes fatores e analisando a Figura 27, conclui-se que estes alteram o livre escoamento atmosférico no local de medição, provocando uma redução na contribuição de ventos de Oeste quando comparada com a estação meteorológica da Biblioteca Municipal. Devido a este fator e à perturbação do escoamento do vento que ocorre especificamente na área do Quartel dos Bombeiros Velhos foram apenas utilizados os dados da estação meteorológica dos Bombeiros Velhos para uma análise de dispersão neste local de monitorização.

Através da análise da Figura 27 é possível verificar que as duas estações apresentam padrões um pouco diferentes, com o vento predominante das direções Noroeste (NW) e Sudeste (SE).

As velocidades médias do vento variam entre os 0,2 e 36 m/s para a Biblioteca Municipal e entre 0,2 e 34,1 m/s para os Bombeiros Velhos.

Normalmente, devido à proximidade ao Oceano Atlântico ocorrem as chamadas brisas marinhas e terrestres, que se observam nas rosas dos ventos. Os ventos entre N e NW foram registados com maior frequência (entre 35% e 48%) no período de verão devido à habitual intensificação do regime das brisas marítimas durante esta época, vulgarmente chamada de nortada.

Como se verifica na Figura 27, durante o período noturno o regime de ventos muda e registam-se ventos predominantemente oriundos de Sul e Sudoeste sendo este o período de velocidades do vento mais baixas. Normalmente, no período da manhã inicia-se um regime de transição dos ventos, começando por ocorrer uma progressiva rotação dos ventos dos quadrantes Este e Sul para o quadrante Noroeste (Sorte et al., 2018).

Na Figura 27 é possível analisar as variações na direção e velocidade do vento para as diferentes estações do ano e horários diurnos e noturnos.

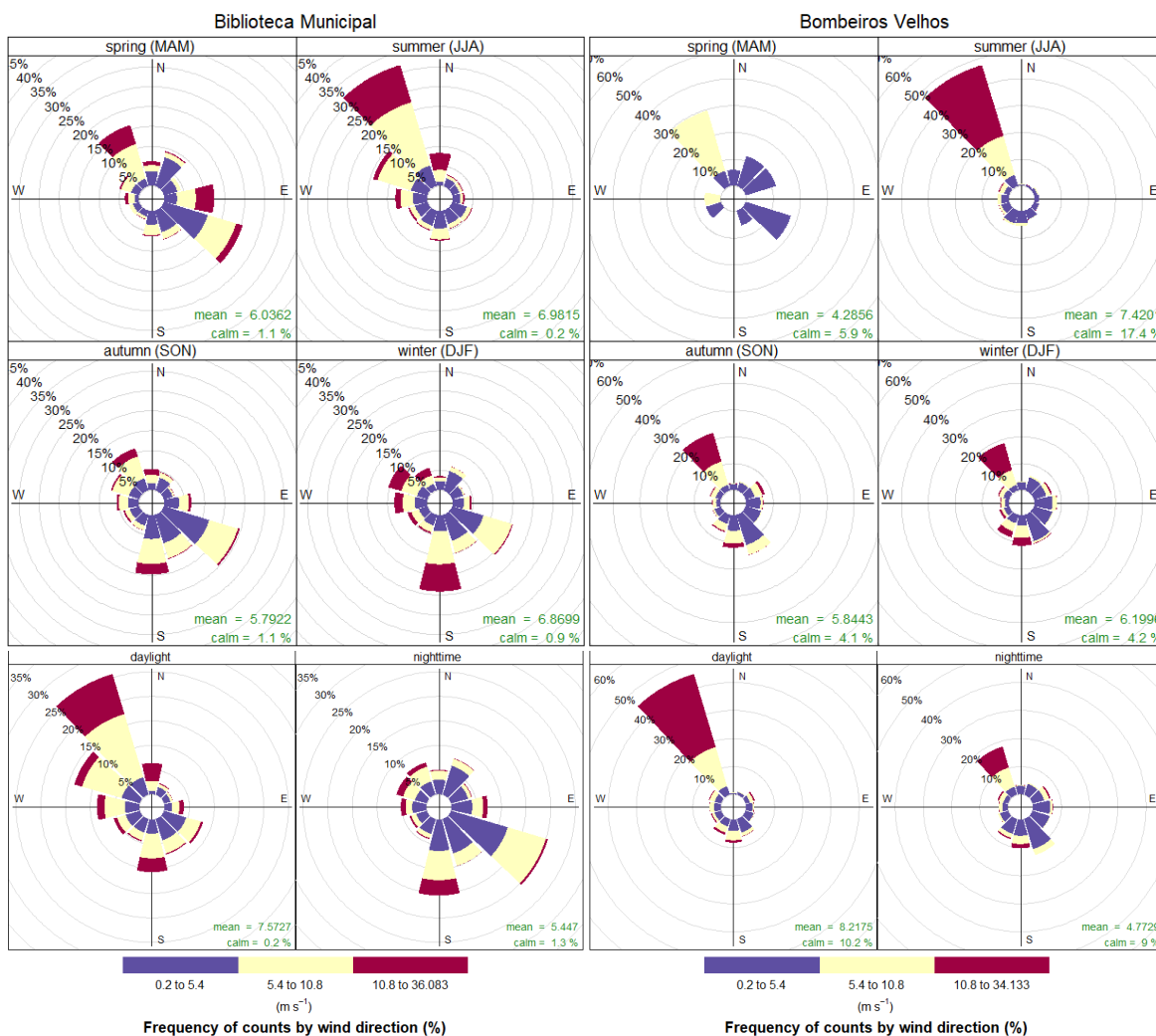


Figura 27 - Rosas dos ventos das estações meteorológicas da Biblioteca Municipal e dos Bombeiros Velhos por estações do ano e horário diurno e noturno.

A temperatura e precipitação são igualmente parâmetros determinantes na dispersão de poluentes atmosféricos. Na Figura 28 é possível observar as variações destes dois parâmetros nas duas estações meteorológicas ao longo do intervalo temporal considerado.

Através da análise da Figura 28 é visível que a precipitação e temperatura exibem um padrão semelhante nas duas estações e seguem as tendências esperadas com temperaturas mais elevadas no verão e mais baixas no inverno. A temperatura média nos Bombeiros Velhos (16,9 °C) foi ligeiramente mais alta em relação à Biblioteca Municipal (16,2 °C), provavelmente devido à proximidade ao telhado de betão do edifício.

Relativamente à precipitação esta apresenta também os padrões típicos com um maior número de dias de precipitação, no outono e inverno, quando são mais frequentes passagens de frentes frias. Analisando o apêndice 1, é possível verificar que é nestas estações do ano que tendem a ocorrer maiores oscilações na pressão atmosférica associadas a depressões que provocam precipitação prolongada.

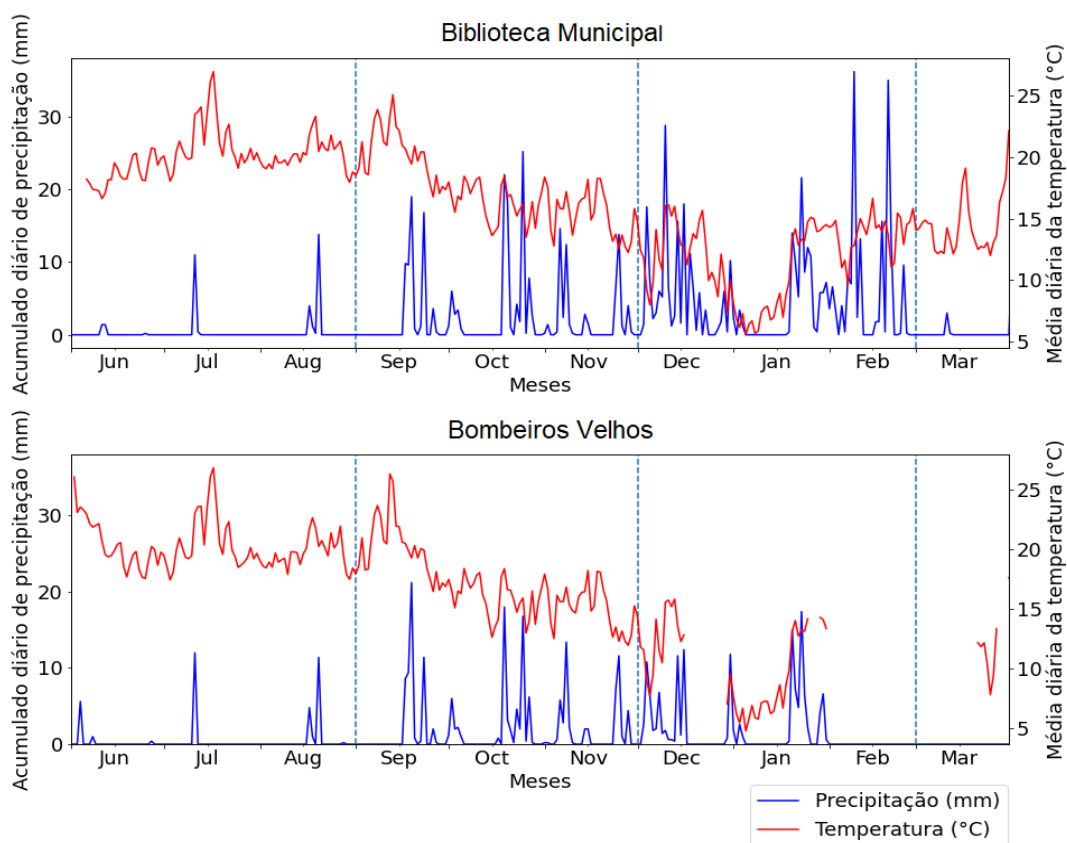


Figura 28 – Variação dos acumulados diários de precipitação e da média diária de temperatura nas estações meteorológicas da Biblioteca Municipal e dos Bombeiros, respetivamente.

5.4. Análise da qualidade do ar

Relativamente aos dados das estações de monitorização da qualidade do ar, serão primeiro analisadas as séries temporais gerais, seguidamente foram analisados os padrões sazonais, diários e semanais para os principais poluentes atmosféricos medidos. No entanto é importante ter em conta que com o período de dados analisado não é possível fazer uma análise representativa da primavera de 2021 (apenas de março), sendo apenas possível uma análise representativa para o verão, outono de 2020 e inverno de 2020/2021.

Relativamente ao período de análise é de referir que coincide com o período de pandemia COVID-19 e Portugal passou por diferentes estados de emergência, calamidade e desconfinamento que podem ter impactado a qualidade do ar na cidade. No entanto dada a ausência de dados históricos nos locais de medição, e a variabilidade meteorológica da região, não é possível tirar conclusões sobre o impacto da pandemia nos dados analisados.

Por fim foram analisados, de forma pormenorizada, os episódios críticos de poluição atmosférica que ocorreram ao longo do período de análise.

5.4.1. Evolução das concentrações de poluentes

Inicialmente é feita a análise das concentrações médias diárias de toda a série temporal de dados de todas as estações de monitorização de qualidade do ar e médias horárias da temperatura e precipitação acumulada horária do projeto STEAM City, assim como as estações de referência mais próximas, através das figuras 29 a 32. Deste modo é possível identificar e explicar algumas causas para períodos em que ocorreram falhas e eventos de poluição comuns ou particulares de cada estação.

É possível verificar nas Figuras 29 a 32 que os períodos com maiores falhas de dados se concentram nos períodos de outono e inverno e principalmente nos sensores eletroquímicos dos poluentes O_3 , NO_2 e CO . Um motivo para esta situação pode relacionar-se com as temperaturas mais baixas, maior quantidade de precipitação e humidade relativa nestas épocas, que provocam em alguns casos condensação nas tomadas de ar e problemas na climatização da estação. As estações mais problemáticas foram: a Capela com falhas significativas no mês de julho e durante o outono e inverno; os Bombeiros Velhos; Morgados; e CETA, apenas no O_3 , com problemas no inverno; e Biblioteca durante o mês de agosto e outono.

Na Figura 29 e 30 é possível verificar que existem dois grandes períodos com elevadas concentrações de PM_{10} , $PM_{2,5}$ e CO comuns a todas as estações de monitorização da rede STEAM City. Um deles ocorreu em setembro, mais precisamente no dia 8 de setembro de 2020, estando relacionado com o incêndio de Albergaria-A-Velha. O outro período ocorreu principalmente na primeira metade de janeiro, relacionado com um episódio de frio e combustão residencial para aquecimento. Estes dois eventos serão analisados de forma mais pormenorizada no subcapítulo 5.4.3.

Na Figura 30, verificam-se vários picos elevados de CO na capela da N. Sr^a. da Alegria. Apesar de não existirem dados válidos de CO no intervalo temporal em que estes picos ocorrem, estes provavelmente relacionam-se com emissões pontuais de veículos motorizados perto do local de monitorização, provavelmente de uma oficina de automóveis. No entanto, este caso será também melhor analisado no subcapítulo 5.4.2. na análise de padrões.

Relativamente ao NO_2 , observando a Figura 31 é possível verificar que existem picos bastante elevados principalmente na estação de monitorização dos Bombeiros Velhos estando estes picos relacionados com a atividade regular dos veículos no quartel no início das manhãs (explicado no próximo subcapítulo).

Analisando as séries temporais do O_3 na Figura 32, verifica-se que é no verão (julho) e início do outono (setembro) que as concentrações são mais elevadas, principalmente nos períodos com maior radiação solar, temperatura mais elevada e com ausência de precipitação, como esperado.

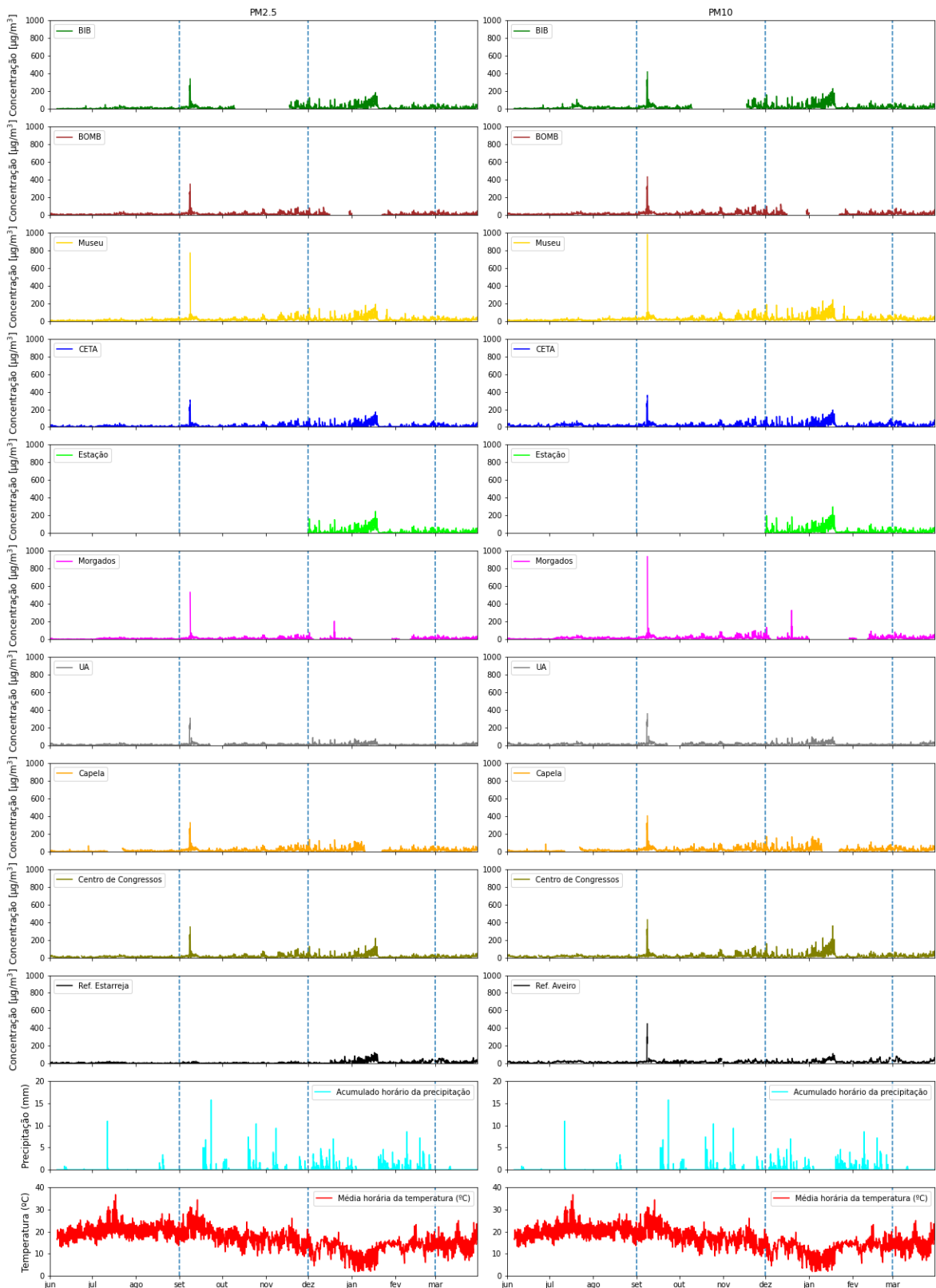


Figura 29 - Variação das concentrações médias horárias de PM10 e PM2,5, em cada estação STEAM City e de referência mais próxima; temperatura média horária e acumulados horários de precipitação da estação meteorológica da Biblioteca Municipal, para o período analisado.

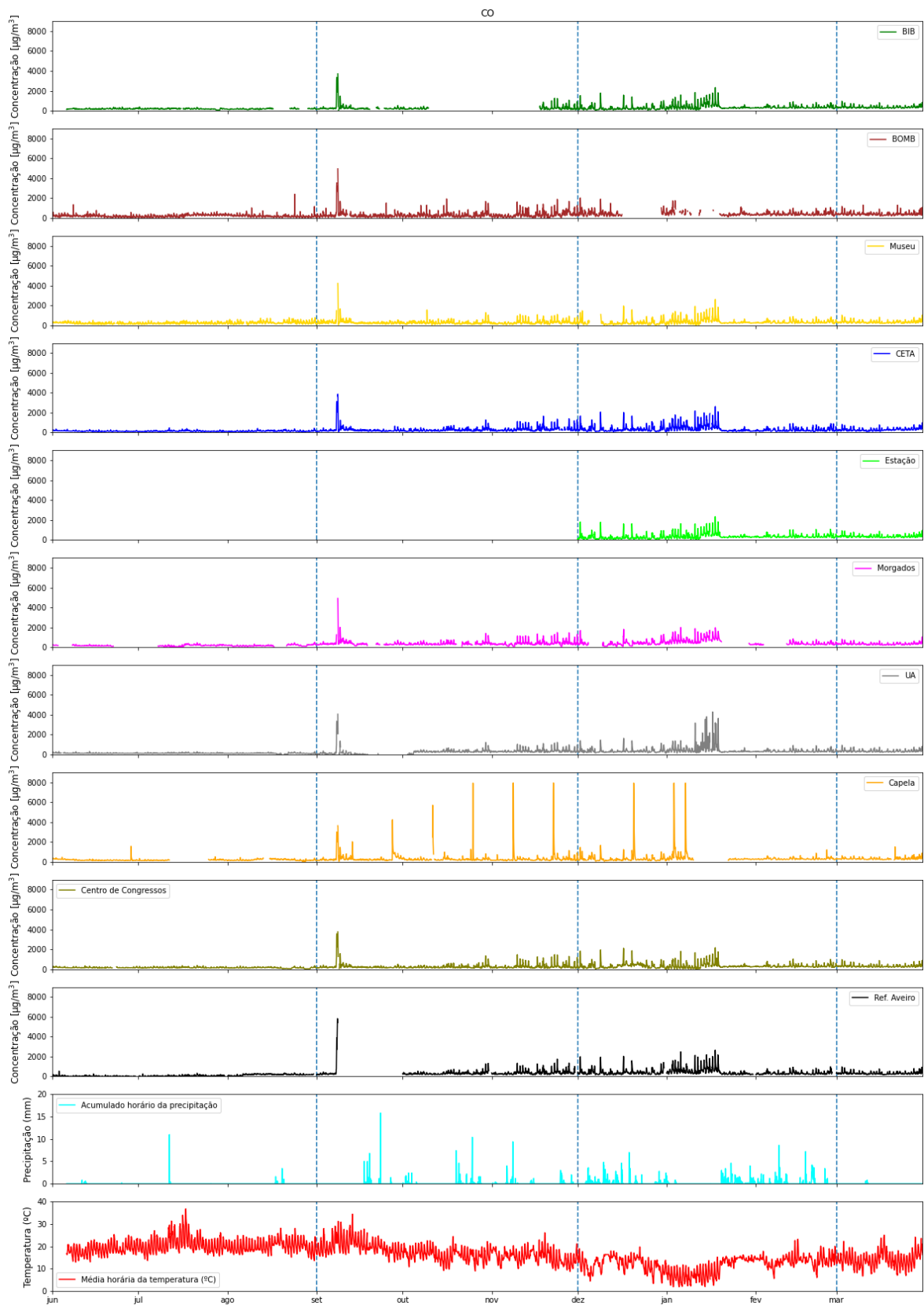


Figura 30 - Variação das concentrações médias horárias de CO em cada estação STEAM City e de referência mais próxima; temperatura média horária e acumulados horários de precipitação da estação meteorológica da Biblioteca Municipal, para o período analisado.

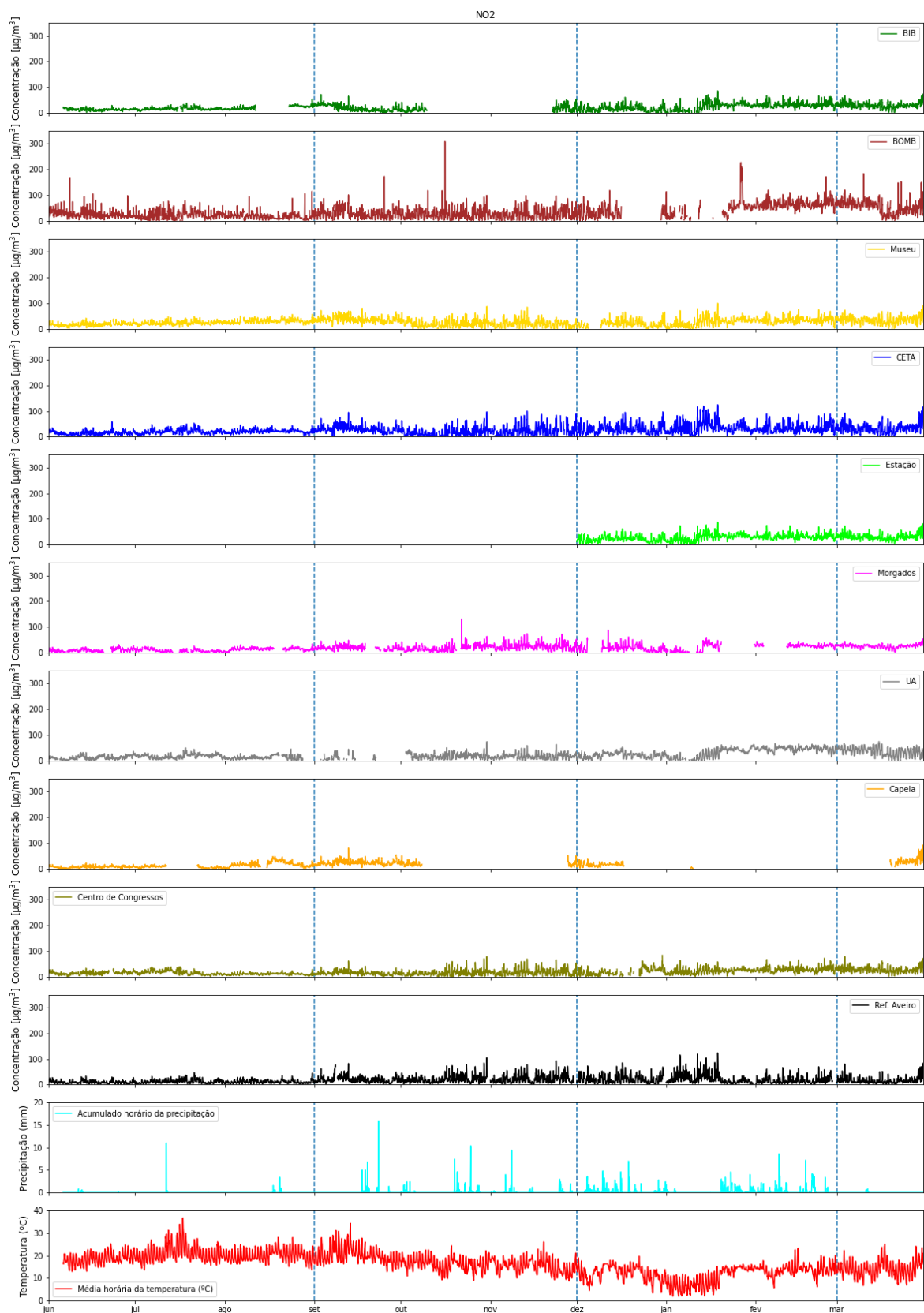


Figura 31 - Variação das concentrações médias horárias de NO₂ em cada estação STEAM City e de referência mais próxima; temperatura média horária e acumulados horários de precipitação da estação meteorológica da Biblioteca Municipal, para o período analisado.

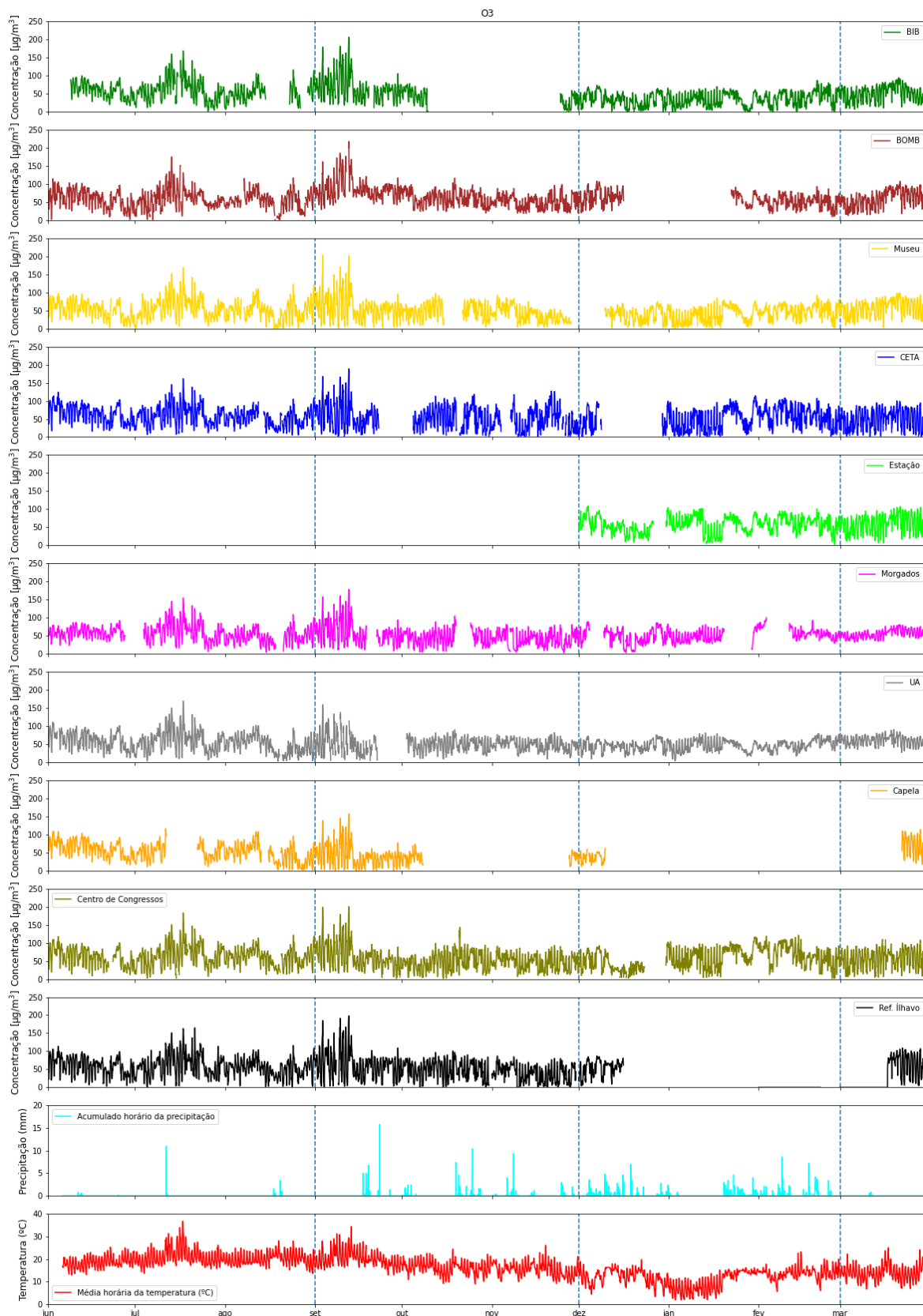


Figura 32 - Variação das concentrações médias horárias de O₃ em cada estação STEAM City e de referência mais próxima; temperatura média horária e acumulados horários de precipitação da estação meteorológica da Biblioteca Municipal, para o período analisado.

Na Figura 33 é possível observar a média (ponto vermelho), mediana, quartis e *outliers* das concentrações de cada poluente e para o período em análise, em todas as estações de monitorização STEAM City e estações de monitorização de referência de Aveiro, e Ílhavo.

De um modo geral verifica-se relativamente às PM10 que a estação de referência de Aveiro tem menos variabilidade e apresenta uma média mais elevada em relação a quase todas as outras estações de monitorização. Apenas para a Estação (Edifício REFER) apresenta uma média mais elevada relativamente à estação de referência por ter iniciado a medição no início do inverno, período a partir do qual as concentrações de partículas são mais elevadas. No entanto, verifica-se que as estações de monitorização da estação nos Morgados, Bombeiros Velhos e UA apresentam as médias de PM10 e PM2,5 mais baixas. Em relação aos Bombeiros Velhos e Morgados isto acontece devido a falhas nestas estações, principalmente durante o mês de janeiro, mês no qual as concentrações de PM10 e PM2,5 foram mais elevadas.

Relativamente ao NO₂ é nos Bombeiros Velhos que se verificam as concentrações médias mais elevadas. Esta média elevada deve-se à influência diária da atividade dos veículos no quartel e do tráfego rodoviário na rua Dr. Mário Sacramento. De seguida, o Edifício REFER, CETA, Museu de Arte Nova e Edifício da Antiga reitoria da UA são as estações com as concentrações médias de NO₂ mais elevadas, por estarem em locais de forte influência rodoviária.

Analisando o CO verifica-se que as concentrações médias são da mesma ordem de grandeza. As estações de monitorização do CETA e da Biblioteca tiveram valores mínimos mais elevados e uma dispersão mais reduzida tendo em conta a amplitude entre mínimos e máximos.

Em relação ao O₃ verificam-se variações nas médias de cerca de 10 µg.m⁻³, com as estações dos Bombeiros, Centro de Congressos e CETA a terem as médias mais elevadas.

No entanto é importante reforçar que os gráficos são afetados pelas eficiências das estações de monitorização, que no caso da Capela da N. Sra. da Alegria são reduzidas tendo em conta o período geral analisado.

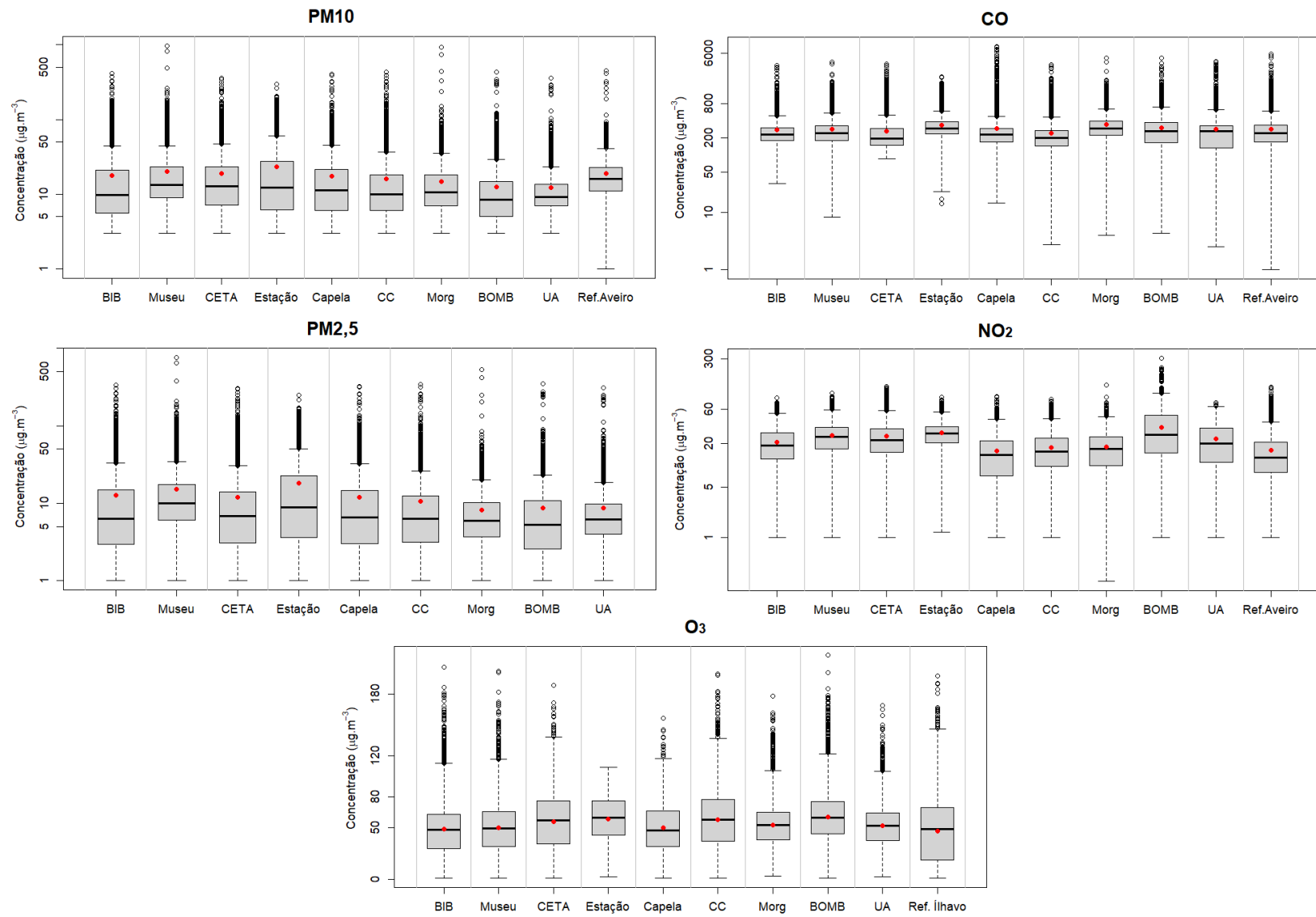


Figura 33 – Diagramas de extremos e quartis das concentrações médias dos diferentes poluentes para cada estação de monitorização.

5.4.2. Análise dos padrões temporais e espaciais

Neste subcapítulo são apresentados e analisados os gráficos das variações horárias, semanais e sazonais das concentrações de poluentes, de forma a caracterizar os padrões temporais típicos de cada local. Em consonância com as análises temporais são analisadas situações concretas, utilizando gráficos (rosas de poluição e gráficos polares) que permitem cruzar a velocidade e direção do vento com concentrações de determinados poluentes de forma a detetar possíveis fontes emissoras. Desta forma é possível concluir acerca das principais fontes de poluição que influenciam cada local de amostragem.

Analisando as variações horárias, semanais e sazonais de PM10 e PM2.5 (Figura 34) é possível verificar que as concentrações das estações seguem padrões semelhantes. As concentrações de partículas são significativamente mais elevadas no período noturno principalmente no inverno, mas também na primavera e outono. No inverno este aumento é provocado pelas emissões provenientes da combustão residencial para aquecimento doméstico e potenciado pela elevada estabilidade da atmosfera e temperaturas mais baixas durante o período noturno, condições que ocorreram de forma mais acentuada em janeiro. Nos meses do outono e em março pode também haver alguma contribuição deste tipo de fontes devido à existência de temperaturas relativamente baixas durante algumas noites. Durante o período da tarde é visível uma redução generalizada nas concentrações devido a uma maior instabilidade da atmosfera neste período, induzida pelo aquecimento diurno e pelo aumento da intensidade da brisa marítima, provocando uma maior dispersão das partículas na atmosfera.

Adicionalmente, deteta-se um pico de concentrações de manhã e às terças-feiras, no Outono e em todas as estações que se deve ao incêndio de 8 de setembro de 2020.

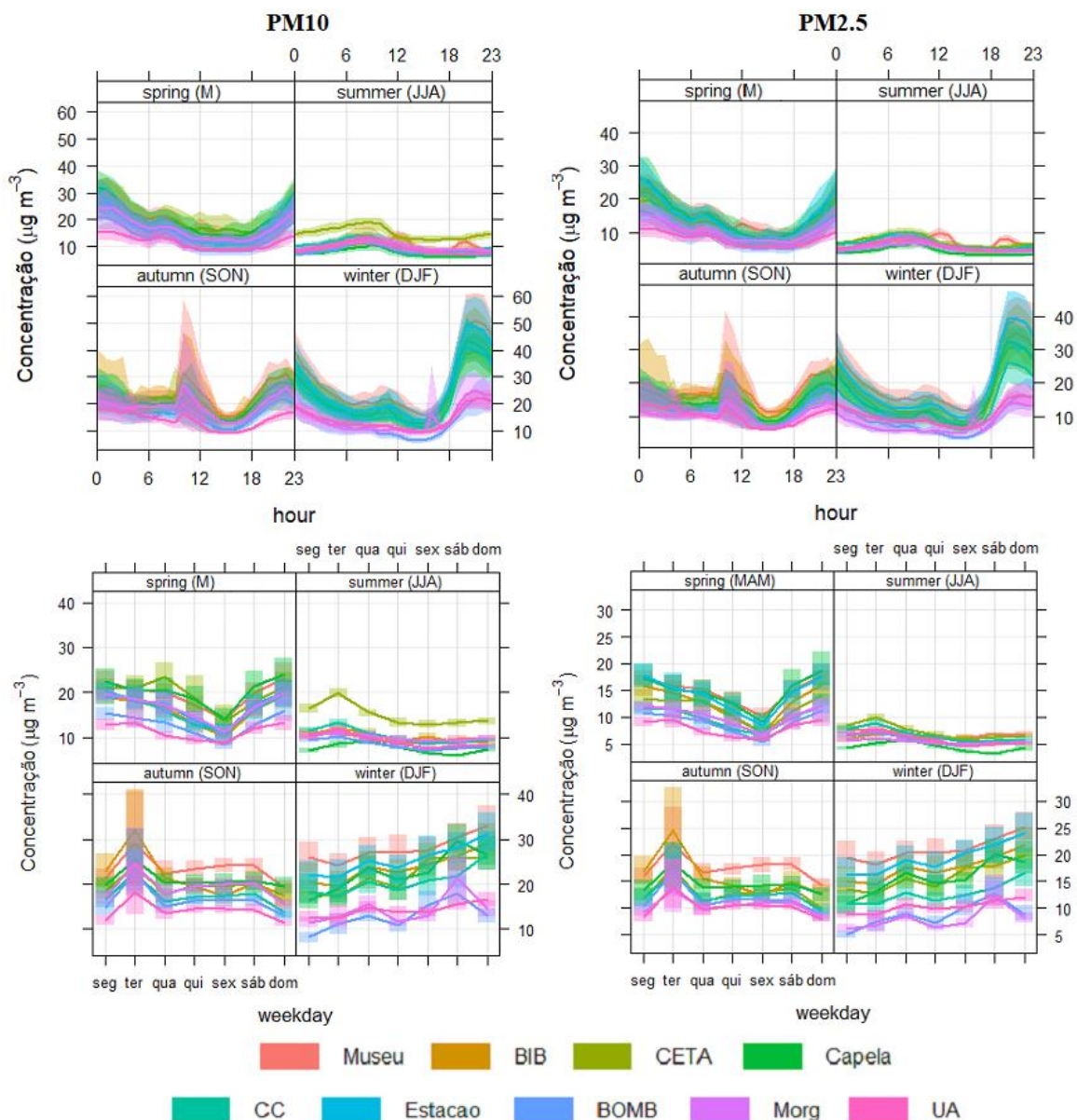


Figura 34 - Variação horária (em cima) e semanal (em baixo) das partículas (PM10 e PM2.5) para todas as estações de monitorização, nas diferentes estações do ano.

Na Figura 35 é possível verificar que os valores de CO são mais elevados principalmente à noite nos meses mais frios, devido à combustão residencial. No outono e primavera, os valores de CO também atingem valores mais elevados, principalmente no início da noite devido à maior estabilidade da atmosfera que diminui a dispersão de poluentes.

Verifica-se igualmente a existência de dois picos específicos de CO na parte da manhã entre as 8h e as 9h e ao fim da tarde, entre as 19h a as 20h. Estes picos devem-se muito provavelmente às emissões do tráfego rodoviário pendular entre empregos e as residências familiares que ocorrem sobretudo nestes horários. No verão estes picos são menos pronunciados devido à maior instabilidade na atmosfera que promove uma dispersão dos poluentes. Neste caso,

as estações do Museu de Arte Nova e Bombeiros Velhos são uma exceção, apresentando picos mais pronunciados do que o resto das estações. Este padrão é também significativamente visível nas concentrações de NO_2 (Figura 37).

Nas variações das concentrações CO ao longo da semana verifica-se que as concentrações são mais elevadas aos fins de semana, especialmente no inverno (com a exceção da estação da Capela), ao contrário do que se verifica no outono. Este comportamento é também visível nas concentrações de PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$ (Figura 34) e explica-se com a permanência de um maior número de habitantes nas suas residências ao fim de semana e a necessidade de aquecerem as residências recorrendo a processos de combustão, por um tempo prolongado. A estação da Capela é a exceção pois apresenta concentrações mais elevadas em relação às outras aos domingos, no outono e inverno. Este comportamento apenas se verifica de forma expressiva no CO e pode ser explicado pela laboração de uma oficina nas proximidades.

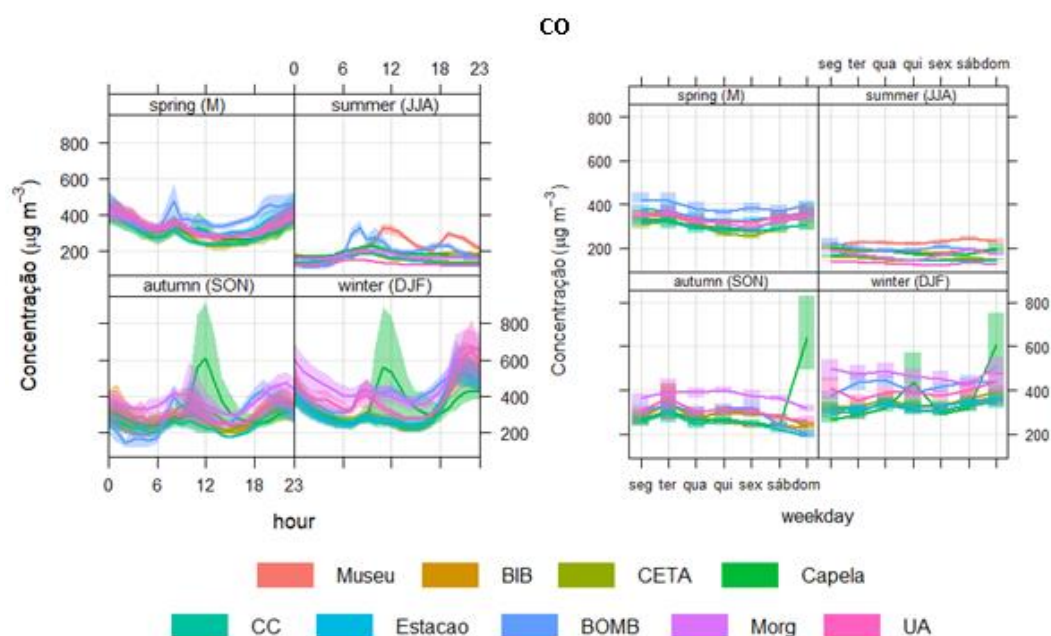


Figura 35 - Variação horária (à esquerda) e semanal (à direita) do CO para todas as estações de monitorização, nas diferentes estações do ano, nas diferentes estações do ano.

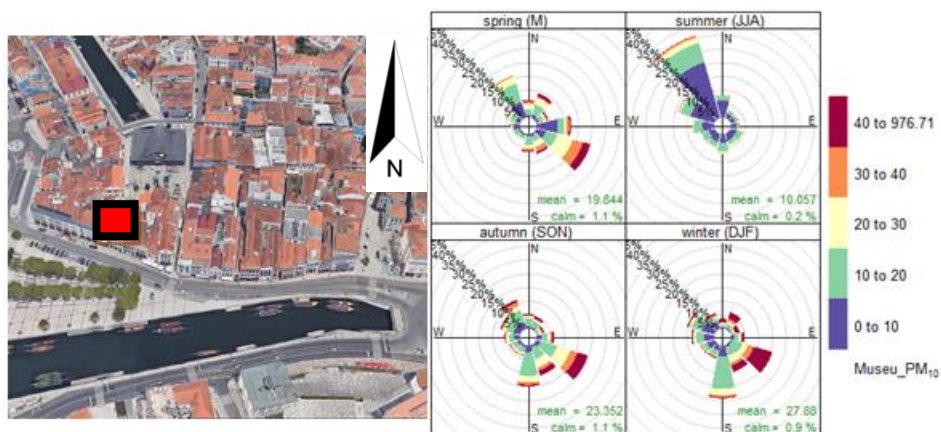


Figura 36 - Rosas de poluentes, por estações do ano, para PM10 na estação de monitorização do Museu de Arte Nova

De uma forma geral, durante o verão, as concentrações de PM10 e CO são de forma geral mais baixas (na ausência de incêndios), aumentando no inverno, outono e primavera.

Relativamente ao NO₂, um dos principais poluentes decorrentes do tráfego rodoviário, é possível verificar pela Figura 37 que a estação dos Bombeiros Velhos apresenta um desvio de concentrações positivo de cerca de 20 µg/m³ em relação às outras estações durante o inverno e primavera. No entanto esta estação apresenta padrões semelhantes às outras estações e provavelmente seria corrigido com um ajuste do zero. Relativamente aos padrões diários, esta estação é a que possui os picos diários mais elevados na primavera e inverno (no início da manhã e ao final da tarde) que se devem principalmente (ver Figura 38) a uma rotina diária que está relacionada com o ligar de todos os veículos estacionados como forma de verificação da sua operacionalidade no quartel, que ocorre todas as manhãs. Adicionalmente o elevado tráfego rodoviário que se verifica na Rua Dr. Mário Sacramento adjacente a este local contribui também para picos de concentração mais pronunciados durante a manhã e tarde em intervalos de tráfego intenso.

Numa análise semanal, verifica-se que, de uma forma geral, as concentrações de NO₂ são menores aos fins de semana porque há menos tráfego rodoviário para os empregos e as pessoas estão mais tempo em casa. No verão as concentrações de NO₂ mantêm-se praticamente iguais ao longo da semana.

As estações do Museu, Bombeiros e CETA apresentam os valores mais elevados por estarem sob maior influência do tráfego rodoviário.

O verão foi a época do ano com menores incertezas nas concentrações devido a ser um período com pouca precipitação e humidade, e com a atmosfera mais instável e, consequentemente, com menos poluentes que possam interferir com a medição.

A estação da Capela apresentou problemas com o sensor de ozono e, como tal, as concentrações tiveram desvios e não podem ser consideradas para análise.

A estação de monitorização dos Bombeiros Velhos apresenta concentrações noturnas mais elevadas em relação às restantes estações em cerca de $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ durante o período noturno no outono. Esta discrepância deve-se à consistência de concentrações noturnas elevadas durante este período, tendo sido um posterior ajuste do zero no sensor de O_3 de forma a corrigir o problema.

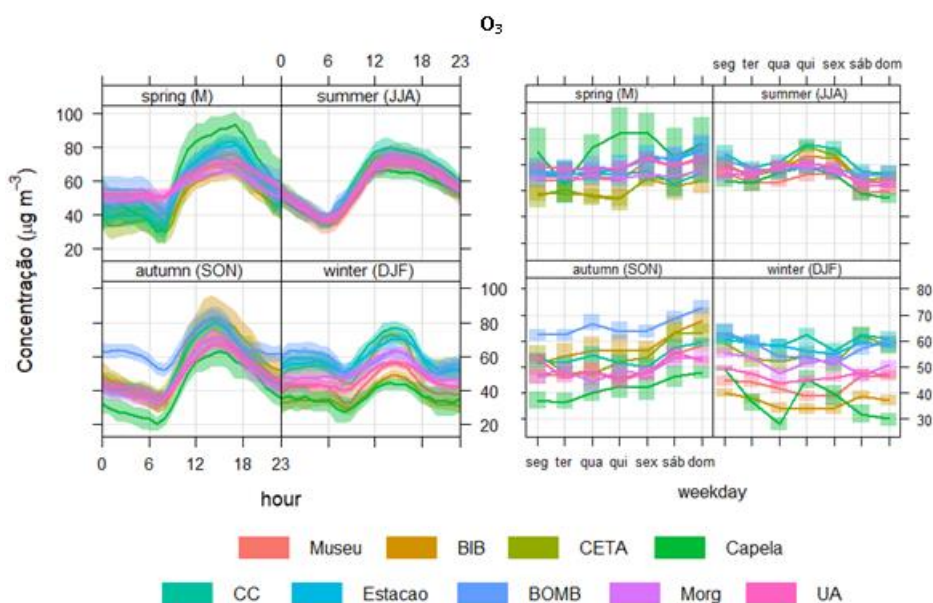


Figura 39 - Variação horária (à esquerda) e semanal (à direita) das concentrações de O_3 para todas as estações de monitorização nas diferentes estações do ano.

5.4.3. Análise de episódios de poluição atmosférica

Durante o período de medições ocorreram alguns eventos de poluição atmosférica provenientes de fontes antrópicas e naturais.

O evento de poluição atmosférica mais crítico foi o incêndio rural que deflagrou no dia 8 de setembro no concelho de Albergaria-A-Velha, localizada a cerca de 15 km a Este/Nordeste da cidade de Aveiro. Devido a condições de elevada estabilidade da atmosfera e vento de Este durante a manhã, produziu uma coluna de fumo bem definida (Figura 40) que afetou a qualidade do ar da cidade de Aveiro.

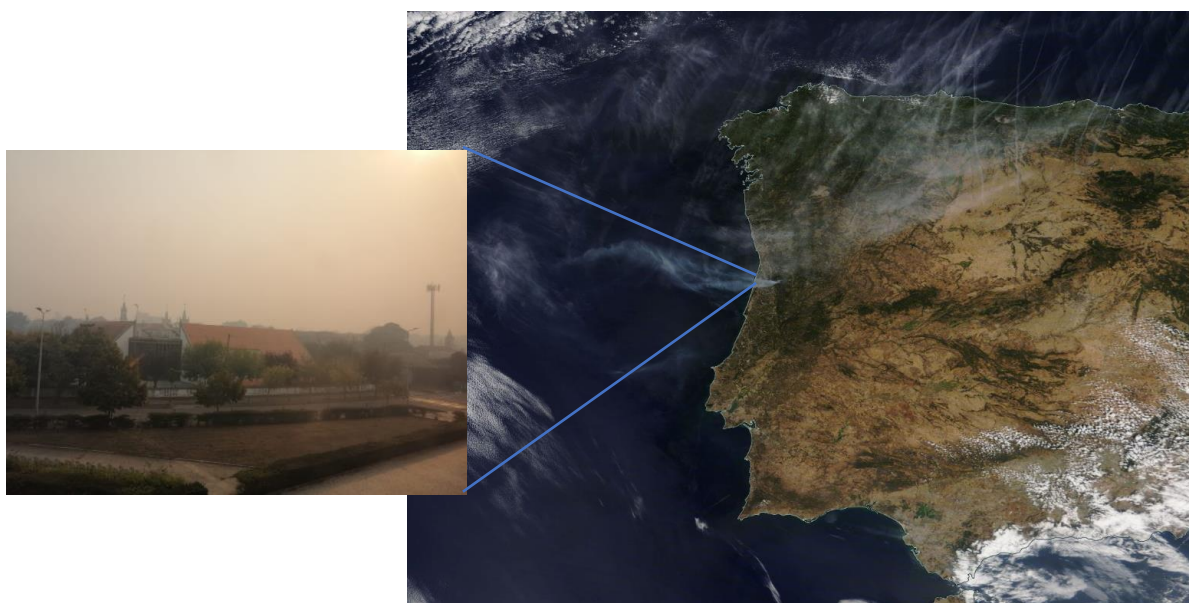


Figura 40 - Coluna de fumo visível na Imagem de satélite (direita) e fotografia na Universidade de Aveiro, na manhã do dia 8 de setembro de 2020 (esquerda).

Todas as estações de monitorização atingiram o pico de partículas (PM₁₀) à mesma hora e como é possível verificar pela Figura 42, para a estação do Museu de Arte Nova, como exemplo, as concentrações chegaram aos 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ num curto espaço de tempo. Apenas duas estações chegaram a este valor de concentrações que ultrapassa a gama de medição para estes sensores de partículas que foram a estação da Casa dos Morgados e do Museu de Arte Nova. As restantes não ultrapassaram concentrações de cerca de 500 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, que corresponde à concentração máxima da gama de medição dos sensores de partículas equipados nas estações.

Observando a Figura 41, tendo a estação de monitorização do Museu de Arte como exemplo, é possível verificar que foi atingido um pico de concentração de PM₁₀ neste dia, representando uma excedência ao valor limite legal diário de 50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ultrapassando-o em cerca de 4 vezes.

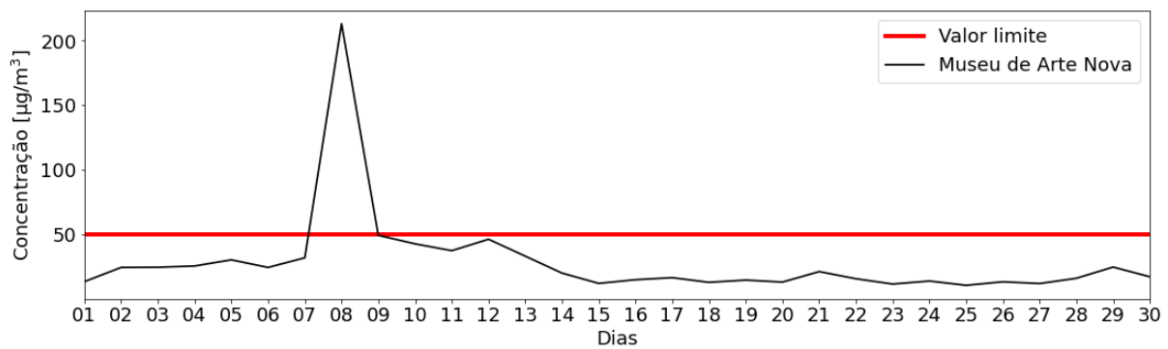
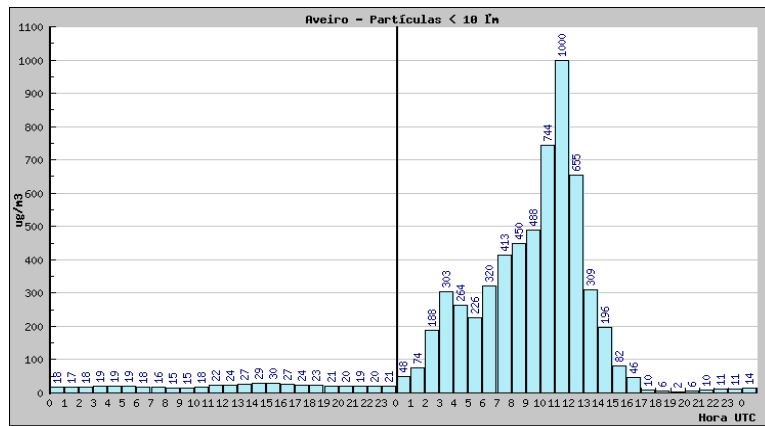


Figura 41 - Variação das médias diárias das concentrações de PM10 em setembro de 2020 para a estação de monitorização no Museu de Arte Nova.

Comparando a concentração de PM10 entre a estação de monitorização do Museu de Arte Nova e a estação de referência de Aveiro é possível verificar, através da Figura 42, que a variação ocorre seguindo um padrão e concentrações similares, indicando que a estação de monitorização respondeu com elevada sensibilidade a esta variação brusca na concentração de PM10 na atmosfera.

(a)



(b)

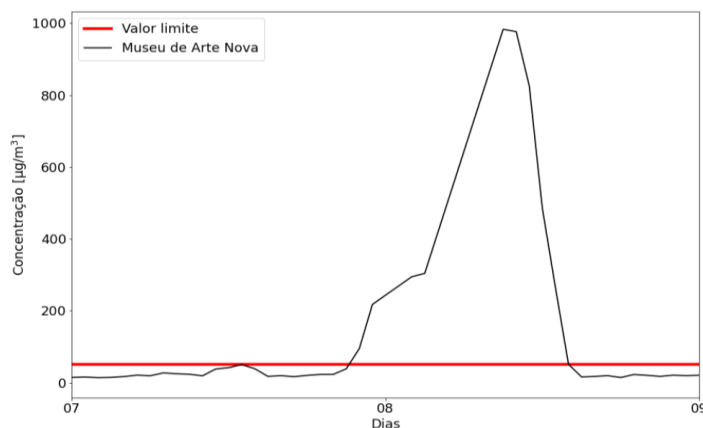


Figura 42 – (a) Gráfico da média horária das concentrações de PM10 entre 7 e 8 de setembro de 2020 medidos na estação de monitorização no Museu de Arte Nova. (b) Gráfico da média horária das concentrações de PM10 entre 7 e 8 de setembro de 2020 medidos na estação de referência de Aveiro.

Um outro episódio de poluição atmosférica comum ocorre no inverno devido à combustão residencial para aquecimento. Grande parte do aquecimento doméstico é ainda feito recorrendo principalmente à combustão de madeira, que produz principalmente PM10, PM2,5 e CO.

Normalmente estes episódios acontecem durante noites frias, com elevada estabilidade atmosférica e principalmente quando ocorrem inversões térmicas na baixa atmosfera, as condições ideais para diminuir a diluição de poluentes na atmosfera. Este episódio de poluição ocorreu principalmente na primeira metade do mês de janeiro, associada a uma “situação de bloqueio da corrente de oeste e, conseqüente, fluxo meridional com o transporte de uma massa de ar polar para a Península Ibérica” (IPMA, 2021a, p. 3). Neste mês foram atingidas concentrações de partículas PM10 que em 9 dias, excederam o máximo diário legislado de $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ para este poluente, visível na Figura 43.

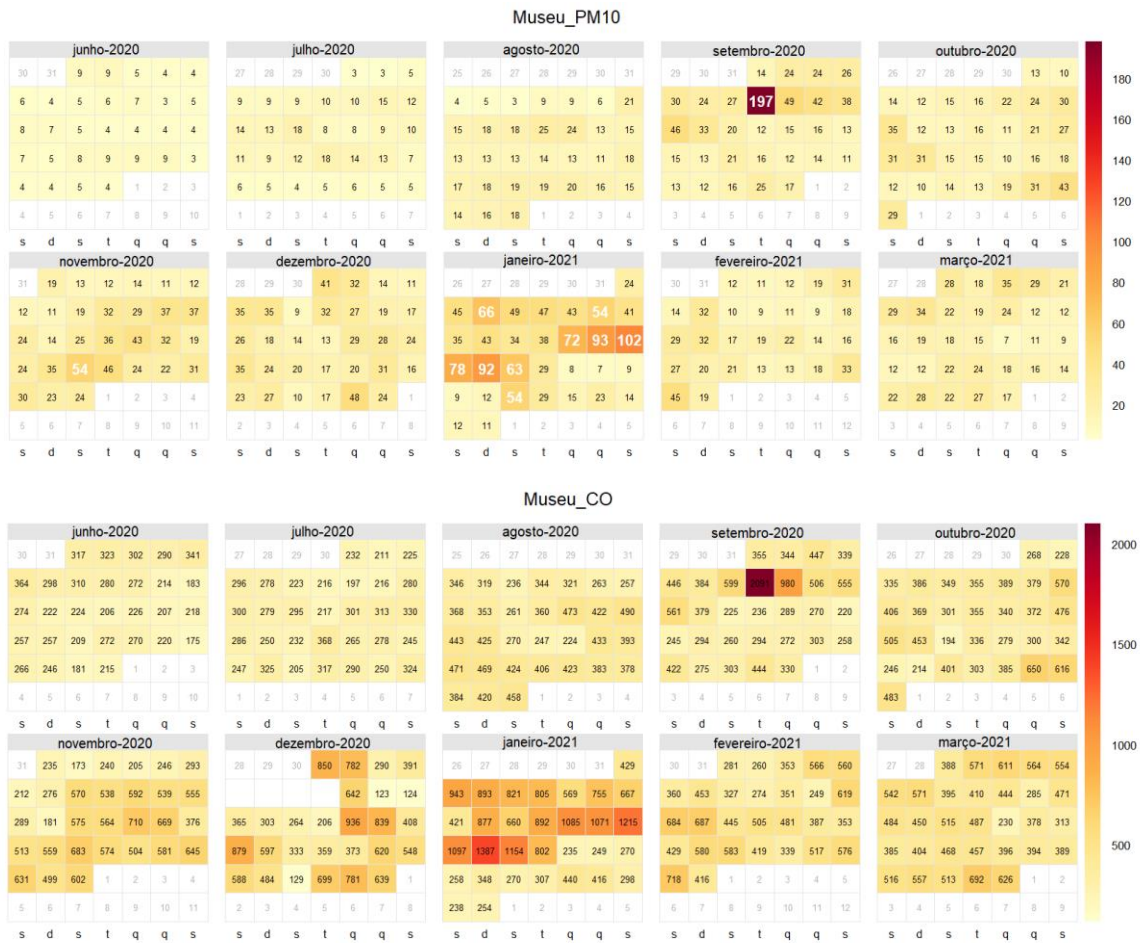


Figura 43 - Calendários com a médias diárias de PM10 (em cima) e o máximo diário das médias de 8h de CO (em baixo), para cada dia na estação de monitorização do Museu de Arte Nova.

Em adição à combustão residencial para aquecimento, também se verificaram queimadas de sobrantes agrícolas, principalmente de manhã e ao início do dia na periferia da cidade no final do outono e inverno. Esta situação contribuiu também para um aumento adicional da concentração média de PM10, PM2.5 e CO em vários dias, principalmente nos dias mais frios.

Igualmente importante foi um evento de poluição por partículas oriundo do Norte de África. Durante os dias 30 e 31 de março de 2021, devido a ventos de leste, ocorreu um grande transporte em altitude de poeiras do deserto do Saara que acabaram por afetar a qualidade do ar em toda a Península Ibérica como é possível verificar na Figura 44.

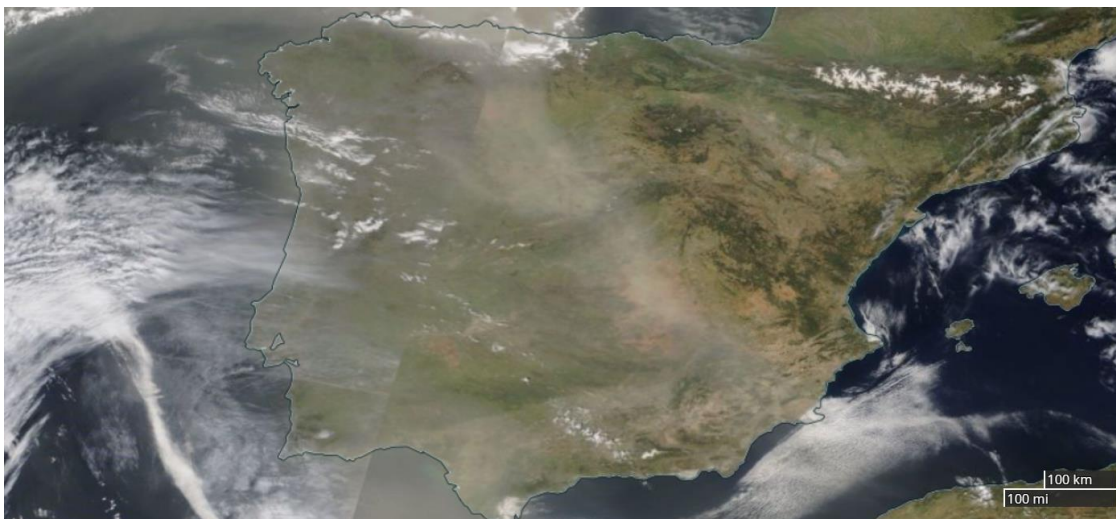


Figura 44 - Imagem de satélite das poeiras saarianas sob a Península Ibérica no dia 30 de março de 2021

Durante este evento as estações de monitorização do projeto não monitorizaram a subida na concentração de partículas, visível nas estações de monitorização de referência. Neste evento particular, as partículas possuem uma cor clara e o tipo de sensor ótico utilizado pelas estações de monitorização não consegue detetar partículas com esta coloração mais clara.

5.5. Índices de qualidade do ar

De forma resumida, na Figura 45 são apresentados os índices de qualidade do ar para cada estação de monitorização, calculados de acordo com a metodologia apresentada na secção 5.1. Na Figura 45 é possível verificar que a qualidade do ar em Aveiro é em geral boa na maior parte do período de análise. No entanto existem períodos consideráveis em que a qualidade do ar é média e em curtos períodos de tempo onde apresentou qualidade fraca e má. As classificações de qualidade do ar “fraca” e “má” devem-se principalmente às concentrações elevadas de partículas (PM10 e PM2,5) decorrentes dos dois episódios de poluição referidos anteriormente, o incêndio de Albergaria-A-Velha em setembro e a combustão residencial no inverno. É de salientar que as falhas de dados das estações de monitorização que ocorrem em períodos podem significar menos frequência de IQA piores e, portanto, este fator deve ser tido em consideração.

As estações de monitorização que apresentaram pior qualidade do ar foram a dos Bombeiros Velhos, Centro de Congressos, CETA, Museu de Arte Nova e Edifício REFER. A estação dos Bombeiros Velhos teve pior qualidade do ar por estar perto de uma avenida movimentada e sob influência do parque de estacionamento do quartel, assim como o Centro de Congressos que embora a estrada adjacente não seja tão movimentada tem bastantes parques de estacionamento nas proximidades, inclusive um de terra batida que podem potenciar concentrações de partículas mais elevadas. O CETA obteve pior qualidade do ar provavelmente por ter parques de estacionamento em frente e a influência da A25 a alguns metros. O Museu de

Arte Nova está numa área central, bastante perto de áreas de restauração e imediatamente em frente a uma estrada movimentada, fatores que provavelmente fazem deste ponto um dos piores em qualidade do ar. O edifício REFER, também apresenta frequentemente IQA médios, fracos e maus principalmente por estar numa área com elevado tráfego rodoviário.

A estação de monitorização da Casa dos Morgados foi a estação com melhor qualidade do ar, contrariamente ao que seria de esperar por se situar perto de uma zona de intenso tráfego rodoviário e no centro da cidade. No entanto esta estação apresentou uma falha de dados durante o mês de janeiro, no qual foram atingidas concentrações elevadas de PM10 que foram responsáveis por índices médios, fracos e maus em todas as outras estações. Também as estações da Biblioteca Municipal e da Antiga reitoria da Universidade de Aveiro tiveram melhor qualidade do ar. A estação da Biblioteca obteve um IQA melhor provavelmente por estar distante da Avenida Dr. Lourenço Peixinho e por terem ocorrido obras durante o período de análise que desviaram o trânsito desta avenida. A estação da Antiga Reitoria da Universidade de Aveiro obteve também melhor IQA por estar colocada a uma altura mais elevada e, portanto, mais distante da influência das estradas e parque de estacionamento adjacente.

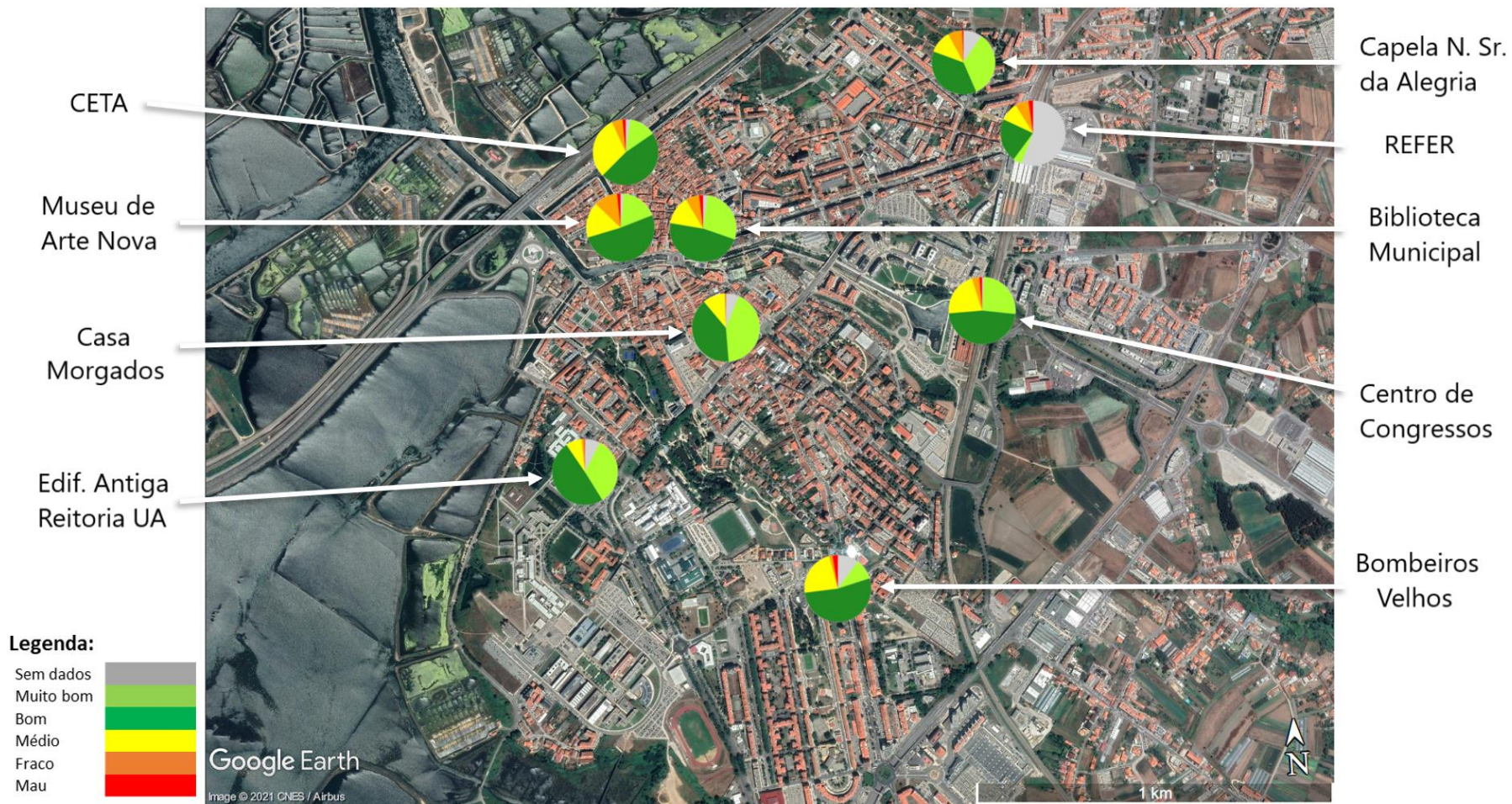


Figura 45 - Distribuição da frequência dos índices de qualidade do ar na cidade de Aveiro para o período geral entre junho de 2020 e março de 2021.

6. Conclusões

Os avanços científicos e na indústria tecnológica possibilitam a construção de sensores e componentes cada vez mais baratos e com maior qualidade, fazendo destes uma ferramenta bastante importante no futuro da monitorização da qualidade do ar. Verifica-se também que as redes de monitorização de qualidade do ar com sensores são uma ferramenta versátil e útil para monitorizar a qualidade do ar em áreas urbanas.

Neste âmbito o projeto Aveiro STEAM City, criou uma rede composta por 9 estações de monitorização com sensores de qualidade do ar e 2 estações meteorológicas, distribuídas por locais selecionados dentro da malha urbana da cidade de Aveiro. Esta rede fornece os dados à população através de plataformas online e permite detetar e mapear *hotspots* ajudando decisores políticos a tomar as medidas necessárias.

Nesta rede de monitorização foram encontradas algumas dificuldades como a necessidade de manutenção regular, uma climatização dos sistemas de monitorização, assim como um seguimento dos dados medidos e suas tendências de forma regular para obter dados confiáveis e sem falhas. É também importante realçar que o período de análise atravessou uma época de pandemia que reduziu muito provavelmente o tráfego no centro da cidade, principalmente nos meses outono e inverno quando ocorreu a 2ª e 3ª vaga da pandemia.

Constatou-se que a qualidade do ar em Aveiro é, de um modo geral, boa apesar de apresentar alguns períodos de qualidade média, fraca e má.

Os padrões temporais indicam que existem fortes influências do tráfego rodoviário pendular, da combustão residencial para aquecimento no inverno, e mais particularmente em alguns locais por fontes pontuais como restaurantes associados ao turismo (Museu de Arte Nova). Foram também identificados episódios críticos de poluição onde foram atingidas concentrações de poluentes (principalmente PM10 e PM2,5) elevadas para a saúde humana em todas as estações nomeadamente no dia 8 de setembro de 2020 com o incêndio de Albergaria-a-Velha e no mês de janeiro devido às temperaturas baixas e à combustão residencial.

Conclui-se que esta rede de monitorização da qualidade do ar forneceu dados valiosos que permitiram alargar a monitorização na cidade de Aveiro para além da estação de referência possibilitando assim analisar os padrões temporais específicos de cada local de monitorização, encontrar *hotspots* de poluição atmosférica e mapear a qualidade do ar da cidade de Aveiro. Estas informações são preciosas no apoio à tomada de decisão relacionada com o planeamento urbano e gestão dos transportes na cidade, de forma a implementar medidas de melhoria da qualidade do ar. Para além disso permite alertar a população para o risco de exposição em determinadas áreas e intervalos temporais.

Bibliografia

- Aleixandre, M., National, S., Gerboles, M., & Commission, E. (2012). *Review of Small Commercial Sensors for Indicative Monitoring of Ambient Review of Small Commercial Sensors for Indicative Monitoring of Ambient Gas*. September. <https://doi.org/10.3303/CET1230029>
- APA. (2021a). *Emissões de substâncias acidificantes e eutrofizantes*. <https://rea.apambiente.pt/content/emissoes-de-substancias-acidificantes-e-eutrofizantes?language=pt-pt>
- APA. (2021b). *Emissões de substâncias precursoras de ozono troposférico*. [https://rea.apambiente.pt/content/emissoes-de-substancias-precursoras-do-ozono-troposférico?language=pt-pt](https://rea.apambiente.pt/content/emissoes-de-substancias-precursoras-do-ozono-troposferico?language=pt-pt)
- APA. (2021c). *Emissões por Concelho em 2015, 2017 e 2019*. <https://apambiente.pt/clima/distribuicao-espacial-de-emissoes-nacionais-2015-2017-e-2019>
- APA. (2021d). *Método de cálculo dos índices de qualidade do ar*. <https://qualar.apambiente.pt/node/metodo-calculo-indices>
- APA. (2021e). *Portal do Estado do Ambiente de Portugal - Ar e Ruído, índice de qualidade do ar*. <https://rea.apambiente.pt/content/indice-de-qualidade-do-ar>
- APA. (2021f). *Redes de medição para avaliação da qualidade do ar*. <https://apambiente.pt/index.php/ar-e-ruído/redes-de-medicao>
- APA. (2021g). *Técnicas de avaliação da qualidade do ar*. <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/tecnicas-de-avaliacao>
- Arroyo, P., Lozano, J., Suárez, J. I., Herrero, J. L., & Carmona, P. (2016). Wireless sensor network for air quality monitoring and control. *Chemical Engineering Transactions*, 54, 217–222. <https://doi.org/10.3303/CET1654037>
- Bartonova, A., Castell, N., Colette, A., Schneider, P., Viana, M., Voogt, M., Weijers, E., Wesseling, J., Blokhuis, C., Malherbe, L., Spinelle, L., & Gonzalez-ortiz, A. (2019). *Eionet Report - ETC/ACM 2018/21 - Low Cost Sensors* (Issue April).
- Borrego, C., Costa, A. M., Ginja, J., Amorim, M., Coutinho, M., Karatzas, K., Sioumis, T., Katsifarakis, N., Konstantinidis, K., De Vito, S., Esposito, E., Smith, P., André, N., Gérard, P., Francis, L. A., Castell, N., Schneider, P., Viana, M., Minguillón, M. C., ... Penza, M. (2016). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment*, 147(2), 246–263. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.050>
- Borrego, C., Ginja, J., Coutinho, M., Ribeiro, C., Karatzas, K., Sioumis, T., Katsifarakis, N., Konstantinidis, K., De Vito, S., Esposito, E., Salvato, M., Smith, P., André, N., Gérard, P., Francis, L. A., Castell, N., Schneider, P., Viana, M., Minguillón, M. C., ... Penza, M. (2018). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir Joint Exercise – Part II. *Atmospheric Environment*, 193(December 2017), 127–142.

- <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.028>
- Câmara Municipal de Aveiro. (2019a). Estudos de caracterização Infraestruturas e transportes. In *Revisão Plano Diretor Municipal Aveiro*.
- Câmara Municipal de Aveiro. (2019b). *Revisão do Plano Diretor Municipal de Aveiro* (Issue Novembro).
- Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., & Bartonova, A. (2016). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- CMA. (2019a). *PDM*.
- CMA. (2019b). *PDM de Aveiro - Caraterização da demografia e habitação*.
- CMA. (2019c). *Revisão do PDM de Aveiro*.
- Concas, F., Mineraud, J., Lagerspetz, E., Varjonen, S., Liu, X., Puolamäki, K., Nurmi, P., & Tarkoma, S. (2021). Low-Cost Outdoor Air Quality Monitoring and Sensor Calibration: A Survey and Critical Analysis. *ACM Transactions on Sensor Networks*, January. <https://doi.org/10.1145/3446005>
- Costa, S., Ferreira, J., Silveira, C., Costa, C., Lopes, D., Relvas, H., Borrego, C., Roebeling, P., Miranda, A. I., & Paulo Teixeira, J. (2014). Integrating health on air quality assessment - Review report on health risks of two major european outdoor air pollutants: PM and NO2. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B: Critical Reviews*, 17(6), 307–340. <https://doi.org/10.1080/10937404.2014.946164>
- Cretescu, I., Lutic, D., & Manea, L. R. (2017). Electrochemical Sensors for Monitoring of Indoor and Outdoor Air Pollution. *Electrochemical Sensors Technology*, September. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68512>
- EEA. (2020a). *Air pollution: from emissions to exposure*. <https://www.eea.europa.eu/media/infographics/air-pollution-from-emissions-to-exposure/view>
- EEA. (2020b). *Air quality in Europe - 2020 report* (Issue No 09/2020). <https://doi.org/10.2800/786656>
- EEA. (2020c). *The European environment — state and outlook 2020, Knowledge for transition to a sustainable Europe*. <https://doi.org/10.2800/96749>
- EEA (European Environment Agency). (2017). *Air quality in Europe — 2017 report* (Issue 13). <https://doi.org/10.2800/850018>
- European Commission. (2018). Measuring air pollution with low-cost sensors. *Measuring Air Pollution With Low-Cost Sensors*, 2(13), 20.
- Evtyugina, M.; Nunes, T.; Pio, C. (2001). *Distribuição dos poluentes fotoquímicos e os seus precursores na atmosfera costeira portuguesa. 1*.
- Gama, C., Relvas, H., Lopes, M., & Monteiro, A. (2021). The impact of COVID-19 on air quality levels in Portugal: A way to assess traffic contribution. *Environmental Research*, 193(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110515>

- INE, I. P. (2021). *Censos de 2021 - Resultados preliminares*. Lisboa-Portugal: Instituto Nacional de Estatística, IP. https://censos.ine.pt/scripts/db_censos_2021.html
- IPMA. (2021a). *Boletim climático de Portugal continental - Janeiro de 2021*. https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20210210/MwKzpgL DLlbyFvCHNjar/cli_20210101_20210331_pcl_mm_co_pt.pdf
- IPMA. (2021b). *Instituto Português do Mar e da Atmosfera - Normais climatológicas*. <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>
- IPMA. (2021c). *Instituto Português do Mar e da Atmosfera - Normais Climatológicas - 1971-2000*. <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1971-2000/#102>
- Karagulian, F., Gerboles, M., Barbieri, M., Kotsev, A., Lagler, F., & Borowiak, A. (2019). Review of sensors for air quality monitoring. In *JRC Technical Reports*. <https://doi.org/10.2760/568261>
- Karagulian, Federico, Barbieri, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Redon, N., Crunaire, S., & Borowiak, A. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/atmos10090506>
- Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., & Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75, 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>
- Lung, C., Jones, R., Zellweger, C., Karppinen, A., Penza, M., Dye, T., Hüglin, C., Ning, Z., Leigh, R., Hagan, D. H., Laurent, O., & Carmichael, G. (2018). Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications. In *Wmo* (Issue May). http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/Draft_low_cost_sensors.pdf
- Maynard, R., Krzyzanowski, M., Vilahur, N., Héroux, M.-E., & Europa, W. R. für. (2017). Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future. *WHO Regional Office for Europe*, 39. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2017/evolution-of-who-air-quality-guidelines-past,-present-and-future-2017>
- Mihăiță, A. S., Dupont, L., Chery, O., Camargo, M., & Cai, C. (2019). Evaluating air quality by combining stationary, smart mobile pollution monitoring and data-driven modelling. *Journal of Cleaner Production*, 221(March), 398–418. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.179>
- Decreto-Lei n.º 43/2015, de 27 de março, Diário da República 524 (2015).
- Miranda, A., Silveira, C., Ferreira, J., Monteiro, A., Lopes, D., Relvas, H., Borrego, C., & Roebeling, P. (2015). Current air quality plans in Europe designed to support air quality management policies. *Atmospheric Pollution Research*, 6(3), 434–443. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.048>
- Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Gao, J., Hagler, G. S. W., Jayaratne, R., Kumar, P., Lau, A. K. H., Louie, P. K. K., Mazaheri, M., Ning, Z., Motta, N., ... Williams, R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure

- assessment: How far have they gone? *Environment International*, 116(February), 286–299.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>
- Morris, A. S., & Langari, R. (2016). Sensor Technologies. In *Measurement and Instrumentation*.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800884-3.00013-7>
- Moyer, C. A., Francis, M. A., Company, C. B., Callaghan, C. B., & Group, W. (2005). *Clean Air Act Handbook*. Clark Boardman Company. <https://books.google.pt/books?id=cfhCAQAIAAJ>
- Our World in Data. (2021). *Future population Growth*. <https://ourworldindata.org/future-population-growth>
- Pinho, O. S., & Orgaz, M. D. M. (2000). The urban heat island in a small city in coastal Portugal. *International Journal of Biometeorology*, 44(4), 198–203.
<https://doi.org/10.1007/s004840000063>
- Rivai, M. (2014). *The Implementation of Preconcentrator in Electronic Nose System to Identify Low Concentration of Vapors Using Neural Network Method*. July 2017.
- Schneider, P., Castell, N., Vogt, M., Dauge, F. R., Lahoz, W. A., & Bartonova, A. (2017). Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information. *Environment International*, 106(June), 234–247.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.005>
- Shiva Nagendra, S. M., Schlink, U., Müller, A., & Khare, M. (Eds.). (2021). *Urban Air Quality Monitoring, Modelling and Human Exposure Assessment*. Springer Singapore.
<https://doi.org/10.1007/978-981-15-5511-4>
- Silveira, C., Roebeling, P., Lopes, M., Ferreira, J., Costa, S., Teixeira, P., Borrego, C., & Miranda, A. I. (2016). Assessment of health benefits related to air quality improvement strategies in urban areas: An Impact Pathway Approach. 183, 694–702.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.079>
- Singh, D., Dahiya, M., Kumar, R., & Nanda, C. (2021). Sensors and systems for air quality assessment monitoring and management: A review. *Journal of Environmental Management*, 289(November 2020), 112510. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112510>
- Sorte, S., Rodrigues, V., Ascenso, A., Freitas, S., Valente, J., Monteiro, A., & Borrego, C. (2018). Numerical and physical assessment of control measures to mitigate fugitive dust emissions from harbor activities. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 11(5), 493–504.
<https://doi.org/10.1007/s11869-018-0563-7>
- Thompson, J. E. (2016a). Crowd-sourced air quality studies: A review of the literature & portable sensors. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 11, 23–34.
<https://doi.org/10.1016/j.teac.2016.06.001>
- Thompson, J. E. (2016b). Crowd-sourced air quality studies: A review of the literature & portable sensors. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 11(June 2016), 23–34.
<https://doi.org/10.1016/j.teac.2016.06.001>
- Trading Economics. (2021). *Portugal - Urban Population (% Of Total)*.
<https://tradingeconomics.com/portugal/urban-population-percent-of-total-wb-data.html>

Diretiva 2008/50/CE, (2008).

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, P. D. (2019). World population prospects 2019. In *Department of Economic and Social Affairs. World Population Prospects 2019*.

Web of Science. (2021). *Analyze results of publications selected from Web of Science Core Collection*. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/29bde6d2-4bd9-4acd-812b-21732af36391-0d802d71>

WHO. (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*.

WHO. (2019). Noncommunicable Diseases and Air Pollution. *WHO European High-Level Conference on Noncommunicable Diseases Time to Deliver: Meeting NCD Targets to Achieve Sustainable Development Goals in Europe, April, 12*. <http://www.euro.who.int/pubrequest>

WHO. (2021a). *Ambient (outdoor) air pollution*. [https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

WHO. (2021b). *WHO global air quality guidelines*.

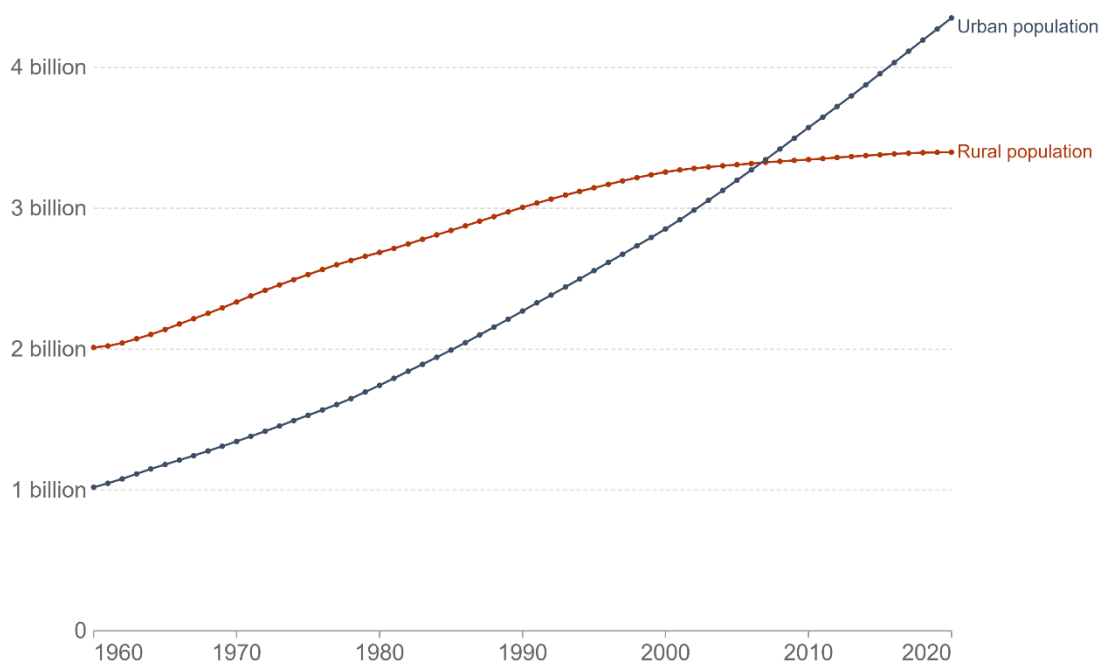
WMO. (2020). *An Update on Low-Cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition*.

Yi, W., Lo, K., Mak, T., Leung, K., Leung, Y., & Meng, M. (2015). A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems. *Sensors*, 15(12), 31392–31427. <https://doi.org/10.3390/s151229859>

Anexos

Number of people living in urban and rural areas, World, 1960 to 2020

Our World
in Data

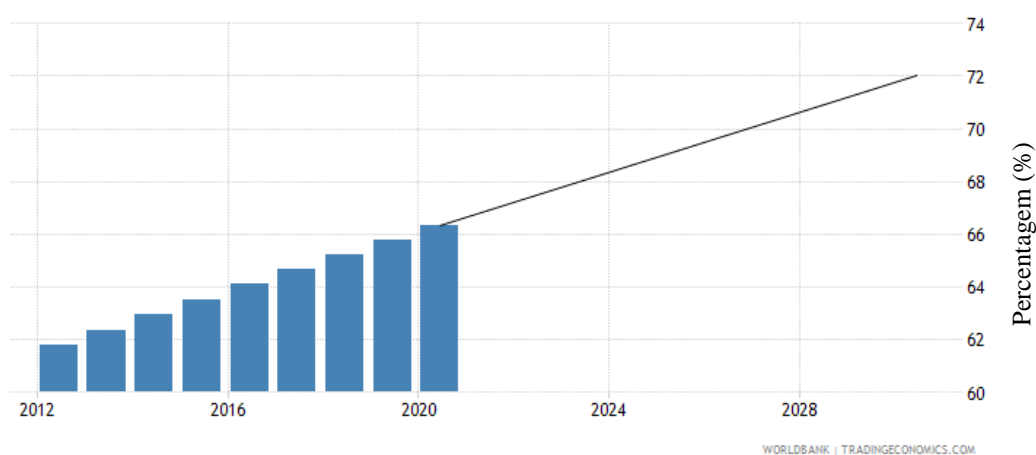


Source: World Bank based on data from the UN Population Division

OurWorldInData.org/urbanization • CC BY

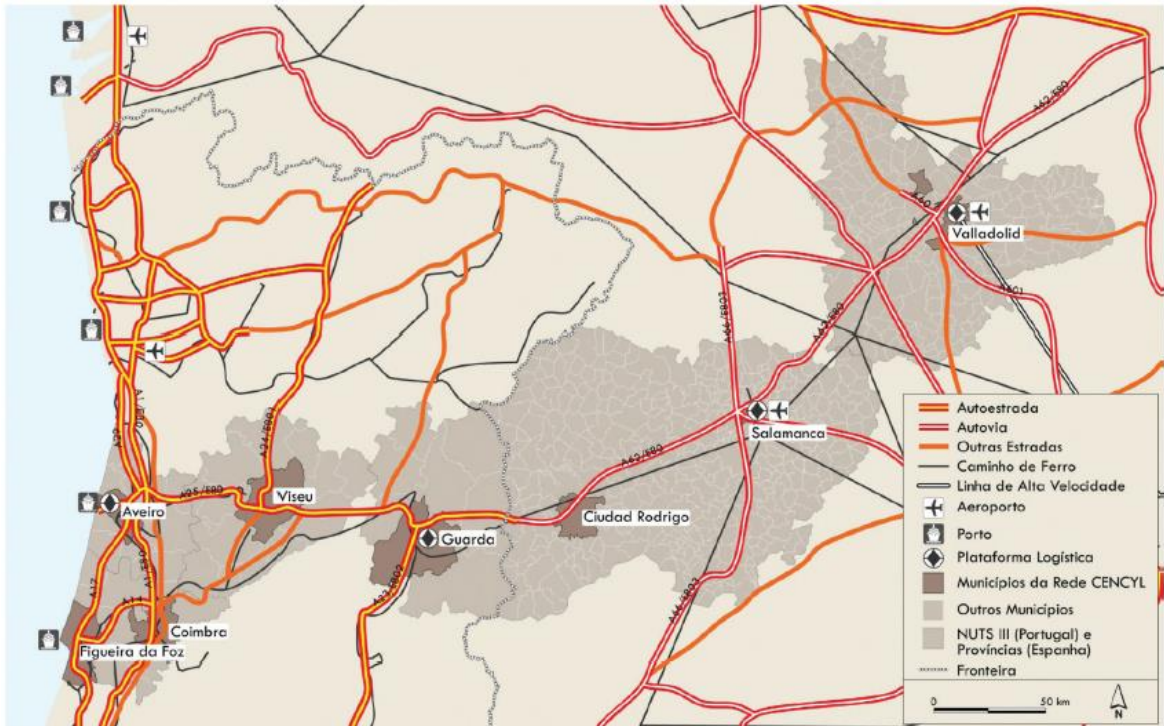
Note: Urban populations are defined based on the definition of urban areas by national statistical offices.

Anexo 1 - Número de pessoas que vive em zonas urbanas e rurais a nível mundial entre 1960 e 2020 (Our World in Data, 2021).

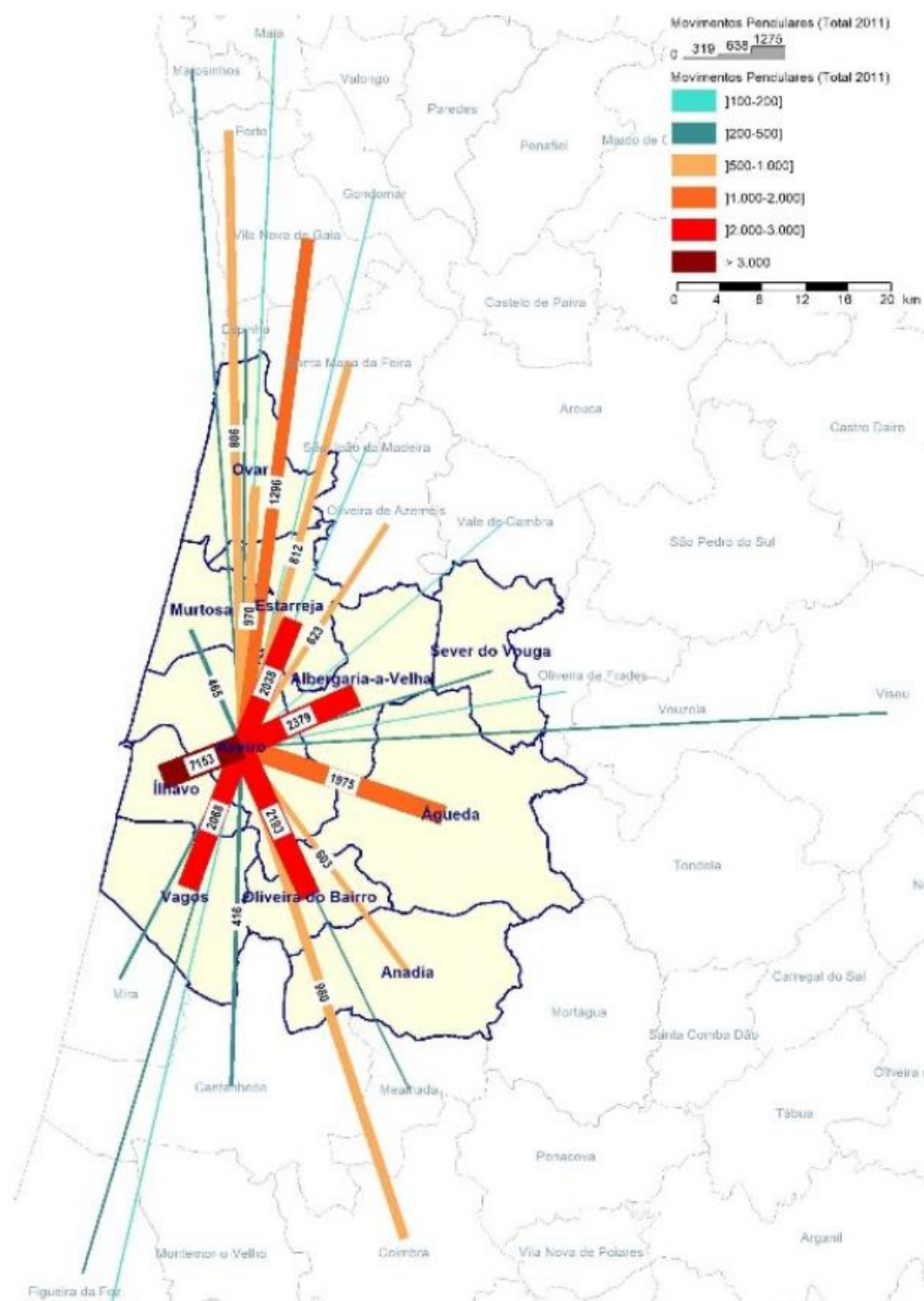


WORLD BANK | TRADINGECONOMICS.COM

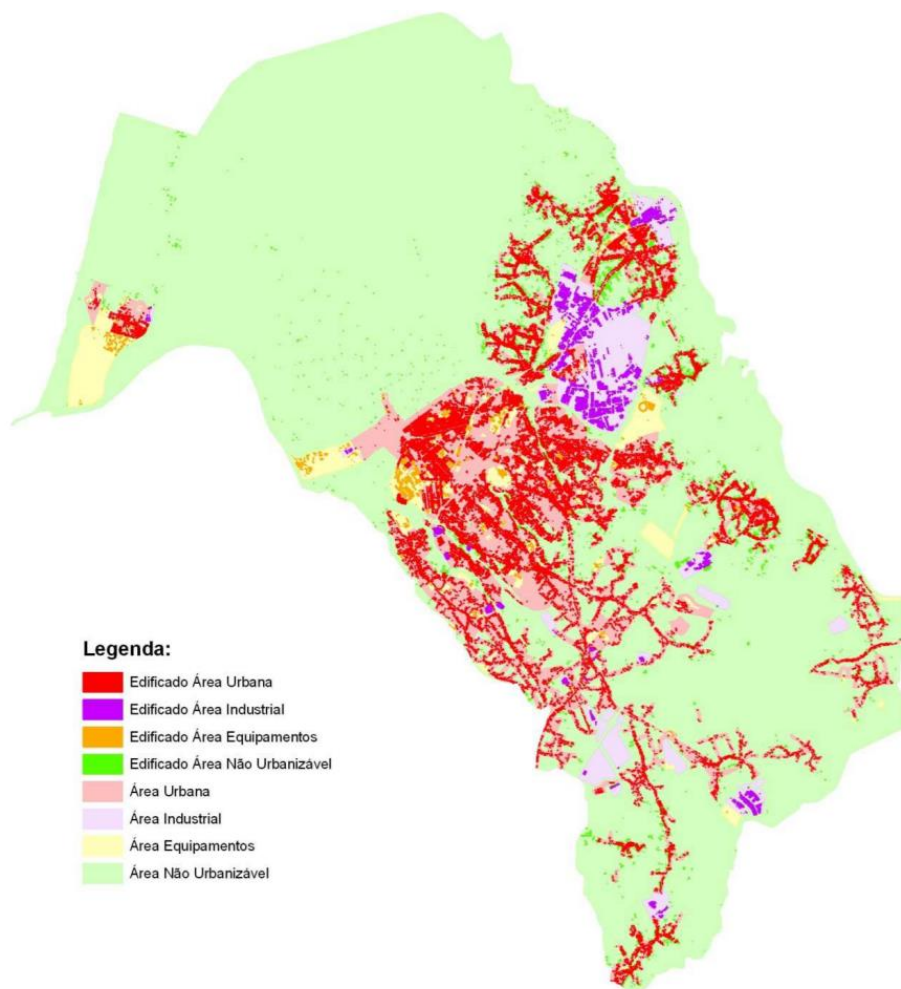
Anexo 2 - Percentagem da população que vive em áreas urbanas em Portugal de acordo com a coleção de indicadores de desenvolvimento do Banco Mundial, compilada a partir de fontes oficialmente reconhecidas (Trading Economics, 2021).



Anexo 3 - Rede de Acessibilidades importantes para Aveiro (Câmara Municipal de Aveiro, 2019a).



Anexo 4 - Movimentos pendulares de ou para Aveiro com dados dos sensores de 2011. (Câmara Municipal de Aveiro, 2019a)



Anexo 5 - Concretização urbanística em Aveiro por classe de espaço em 2012 (Câmara Municipal de Aveiro, 2019b).

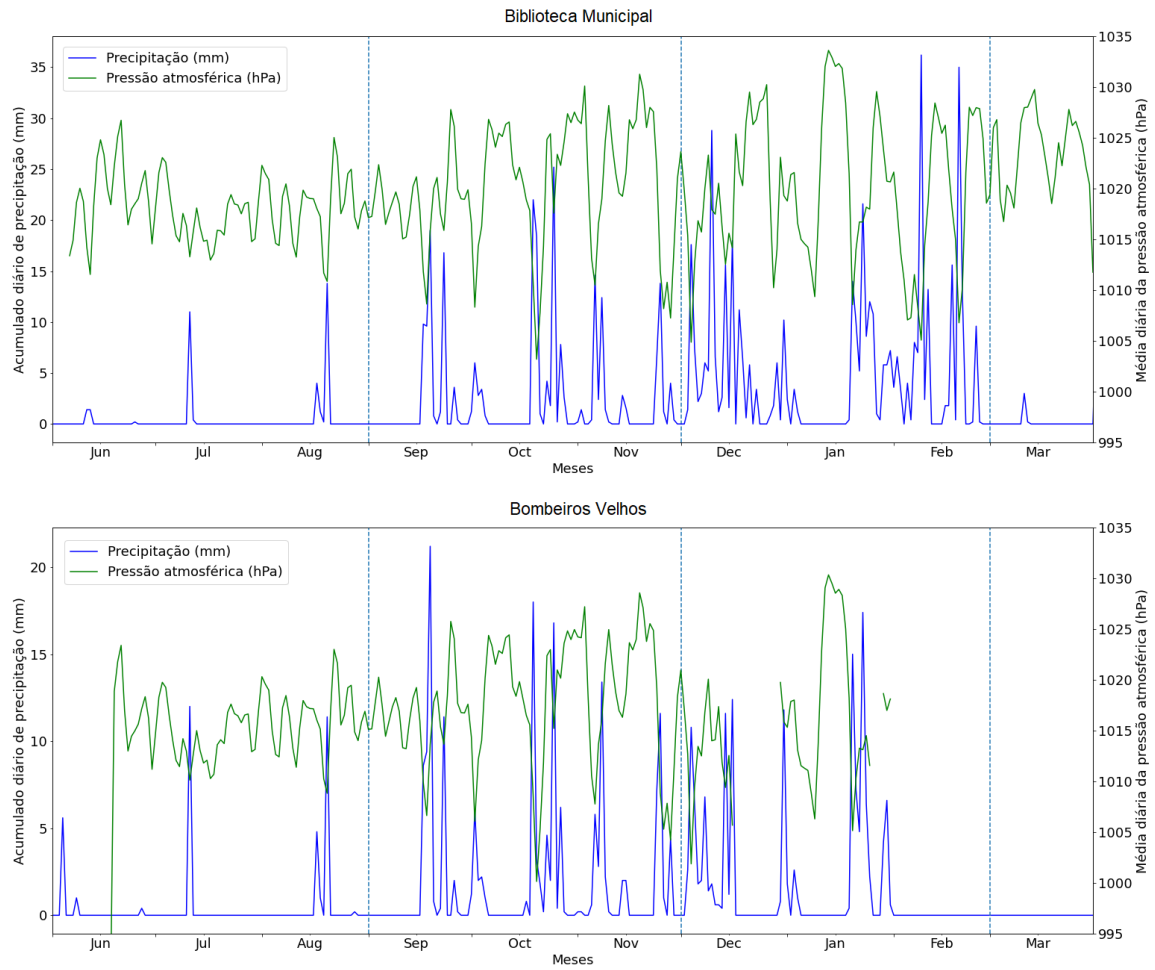
Anexo 6 - Sumário das grandes redes de sensores existentes (Morawska et al., 2018).

Project name	Project period	Type of project	Applied outcomes	Operating network	Data access	Location
Government-funded projects						
ARC- LP16	2016–2020	Network development	Low cost sensor/monitor networks in several cities	In progress		Australia
EuNetAir	2012–2016	Network on New Sensing Technologies	Development and evaluation of new sensors/monitors	n.a.	n.a.	Europe
EveryAware	2011–2014	Enhance Environmental Awareness	Games, and temporary personal monitoring campaign	n.a.	n.a.	Europe
CamMobSense	-2010	Small scale deployment of sensor/monitor		n.a.	n.a.	UK
Citi-Sense	2012–2016	Developing technological platforms for distributed monitoring	Multi-country sensor/monitor testing/monitoring network	Commercial products still in development including AQMesh	Data accessible through the Citizens Observatory Toolbox (COT)	Europe
Citi-Sense-MOB	2013–2015	establish mobile air quality measurements	exhaustive evaluation of low-cost platforms	n.a.	n.a.	Norway
OpenSense	2010–2013 2014–2017	investigating community-based sensing using wireless sensor/monitor network	Air pollution map based on mobile sensing platform. Phone-app for route planning	Currently available	Data accessible online over the project's Global Sensor Network (GNS) at http://data.opensense.ethz.ch/	Switzerland
Community Observation Networks for Air (CONA)	2015 ~	Establishing low-cost sensor/monitor network	Monitors developed, network building	In progress	n.a. (provided report for participants)	New Zealand
PiMi Airbox	2013–2016	Indoor Air-quality Monitoring and Large Sensory Data Mining	Monitors developed, network testing	n.a.	n.a.	China
Smart Santander	2010–2013	applications and services for a smart city	Network of internet-based device including air quality	Still available but not very active	Data stored in a repository and can be accessed once authenticated and authorised by using a web service interface	Europe
U.S. EPA CAIRSENSE	2013–2016	Evaluate long-term performance of sensors/monitors and network	Sensors/Monitors tested	n.a.	n.a.	US
U.S. EPA Village Green	2013–2014 2015–2016 2017 ~	Building autonomous monitoring systems	Units built and installed in limited number of sites	Online data for limited sites	Data accessible online	US
U.S. EPA grants Air Pollution Monitoring for Communities	2016–2019	Development and application of low-cost sensor/monitor network	Sensor/Monitor testing facility established	In progress	Data not accessible to the public yet project still ongoing	US
Commercial/crowd funded projects						
AirVisual	2015 ~	Global network of air quality monitors	Map of fixed sites and app developed for all users	Network and monitors available	Data accessible by a free AirVisual app and website	Global (US-based)
Air Quality Egg	2012 ~	community-led air quality sensing network	Map and data function developed for all users	Network and monitors available	Data accessible through an air quality egg, phone app and a website	Global (US-based)
AirCasting (AirBeam monitor)	2012~	a platform for recording, mapping, and sharing health and environmental data using your smartphone	Map of data from AirBeam monitors and app developed for all users	Network and monitors available	Data accessible through an air beam, phone app and a website	US
SMARTCITIZEN	n.a.	a platform to generate participatory processes of people in the cities	Map of data from Smart Citizen monitors and app developed for all users	Network and monitors available	Data accessible through an Smart Citizen kit, phone app and a website	Europe
Purple Air	2015 ~	An air quality monitoring network built on a new generation of "Internet of Things" sensors/monitors	PurpleAir Map displays the points using the U.S. EPA Air Quality Index (AQI) scale	Network and monitors available	Must be a registered user to access data	Global (US-based)

Anexo 7 - Plataforma online para partilha de dados sobre redes de sensores.

Category	Tool	Description	Website
Government	EPA's Air Sensor Toolbox	Resources to support communities and citizens selecting and using low-cost sensors	epa.gov/air-sensor-toolbox
	AirNow	Aggregated national data from regulatory grade monitoring stations and information on potential health impacts	airnow.gov
	EJSCREEN	Environmental justice screening and mapping tool	epa.gov/ejscreen
	RETIGO	EPA software for mapping collected air quality data	epa.gov/retigo
	C-FERST	Community-focused exposure and risk screening tool	epa.gov/c-ferst
	AQ-SPEC	Sensor evaluation program	aqmd.gov/aq-spec
Non-Profit and Academic	US EIA Energy Mapping System	Mapping tool to explore energy use and development across the United States	eia.gov/state/maps.php
	CalEnviroScreen	California specific environmental justice screening tool	oehha.ca.gov/calenviroscreen
	IVAN Monitoring System	Community-based monitoring system for environmental concerns	ivan-imperial.org/air
	FrackTracker	App for logging reports and observations around oil and gas activity	fracktracker.org
	Institute for Health and Metrics Evaluation	Resource for exploring health data and statistics	healthdata.org
	EDF Air Sensor Workgroup Data Standards	Guidelines for sensor data formatting	edf.org/health/data-standards-date-and-timestamp-guidelines
	AQ-IQ Air Quality and Sensor Curriculum	K-12 curriculum supporting the use of low-cost sensors by students	teachengineering.org/curricularunits/view/cub_airquality_unit
	OpenAQ	Aggregated global data from regulatory grade monitoring stations	openaq.org
	SensorThingsAPI	Open source API for connecting IoT sensing devices, data, and applications over the web	opengeospatial.org/standards/sensorthings
	Commercial	Envirosuite	Software for environmental management and planning
Breezometer		Commercial API for displaying air quality indicators	breezometer.com

Apêndices



Apêndice 1 - Variação das concentrações de poluentes medidos em base horária entre junho de 2020 e março de 2021 para a estação de monitorização da Universidade de Aveiro.