



# UTILIZAÇÃO DE SENSORES NA GESTÃO DA QUALIDADE DO AR

CASO DE ESTUDO DA CIDADE DE LISBOA

Susana Filipa Maló Miguéis

Licenciada em Ciências da Engenharia do Ambiente

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE,  
PERFIL DE ENGENHARIA DE SISTEMAS AMBIENTAIS

Universidade NOVA de Lisboa  
Dezembro, 2022





# UTILIZAÇÃO DE SENSORES NA GESTÃO DA QUALIDADE DO AR

CASO DE ESTUDO DA CIDADE DE LISBOA

**SUSANA FILIPA MALÓ MIGUÉIS**

Licenciada em Ciências da Engenharia do Ambiente

**Orientador:** Professor Doutor Francisco Manuel Freire Ferreira,  
Professor Associado, FCT-NOVA

**Coorientadores:** Professor Doutor João Moura Pires,  
Professor Associado, FCT-NOVA

## **Júri:**

**Presidente:** Professor Doutor Pedro Manuel da Hora Santos Coelho,  
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

**Arguente:** Mestre Hugo dos Santos Guerra Tente,  
Investigador do CENSE, FCT-NOVA

**Orientador:** Professor Doutor Francisco Manuel Freire Cardoso Ferreira,  
Professor Associado, FCT-NOVA



**UTILIZAÇÃO DE SENSORES NA GESTÃO DA QUALIDADE DO AR - CASO DE ESTUDO DA  
CIDADE DE LISBOA**

Copyright © Susana Filipa Maló Miguéis, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Aos meus pais e à Laura por todo o apoio*



## AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer ao professor Francisco Ferreira por ter aceite orientar-me nesta dissertação. Quero agradecer também por todos os conhecimentos passados não só ao longo desta dissertação, mas também ao longo do curso, bem como pela inspiração para as questões da mobilidade urbana, qualidade do ar e do ruído nas cidades. Ao professor João Moura Pires, quero agradecer por ter sido tão paciente e prestável ao longo dos últimos meses, introduzindo-me numa nova área de estudo e a novas ferramentas. Um agradecimento aos dois, por terem sido verdadeiros orientadores e pela oportunidade de poder trabalhar e aprender mais convosco.

Um agradecimento especial aos meus pais, Pedro e Paula, pela amizade e apoio incondicional. Por me terem facilitado o privilégio de continuar os meus estudos e por terem possibilitado as melhores condições possíveis para poder dedicar-me, não só ao curso, mas também a todas as atividades extracurriculares em que estive envolvida ao longo dos últimos 5 anos. Um grande abraço a toda a minha família, especialmente ao meu irmão Gonçalo, à Marta, aos meus tios, sobrinha, avós, madrinha Paula, ao Simão, à Maria e à Ana.

À Laura e ao Tiago, quero agradecer não só pela amizade, apoio e motivação transmitida, mas também pelos momentos de descontração e risadas, nas pausas das nossas sessões intermináveis de escrita da tese. Quero agradecer também por todo o *feedback*, entreajuda e paciência. A vossa presença foi fulcral para conseguir concluir esta dissertação.

Quero agradecer também a todos os companheiros deste percurso que me inspiraram, ajudaram e permitiram que chegasse a esta reta final: aos meus colegas de curso, da comissão pedagógica, aos meus amigos de família e do secundário, a todas as minhas colegas e ex-colegas de equipa (do futsal e do basquetebol), e a todos os dirigentes associativos com os quais tive a oportunidade de trabalhar e aprender diariamente.

Por fim, deixo um abraço apertado à Couchinho, à Beatriz, ao Graça, à Sara, à Alex, ao Tiago, ao Daniel, ao Patarra e à Filipa. Sem vocês, este percurso teria sido mil vezes mais desafiante, e mil vezes menos incrível e memorável do que foi.



## RESUMO

A Câmara Municipal de Lisboa, no âmbito do projeto de monitorização de parâmetros ambientais com recurso a sensores de baixo custo, instalou oitenta estações na cidade de Lisboa, contratualizados com duas empresas (MONITAR e QART). Com o objetivo de avaliar o desempenho dos sensores relativos à qualidade do ar, comparativamente com os métodos de referência ou equivalentes definidos na legislação, tendo por base dados horários de nove meses, relativos a cinco estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar (Avenida da Liberdade, Entrecampos, Olivais Restelo, e Santa Cruz de Benfica), de cinco parâmetros (CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> e PM<sub>2.5</sub>), foram realizados três estudos: um avaliando indicadores estatísticos (ex.: RMSE, MBE, R<sup>2</sup>), outro de correspondência com o Índice de Qualidade do Ar (IQualAr) e um terceiro de comparação do número de ultrapassagens aos valores-limite para a proteção da saúde humana, definidos no Decreto-Lei nº102/2010, de 23 de setembro. Concluiu-se que os sensores com melhor desempenho foram os de Entrecampos, Olivais e Avenida da Liberdade, e os com menor desempenho, Santa Cruz de Benfica e Restelo. Não foi possível verificar nenhuma relação entre as influências predominantes das estações (tráfego e fundo) e o desempenho dos sensores, nem entre as empresas fornecedoras dos sensores e o respetivo desempenho. Os parâmetros CO e PM<sub>10</sub> apresentaram uma tendência clara para a subestimação e os parâmetros O<sub>3</sub> e NO<sub>2</sub> para a sobrestimação, em relação aos dados de referência. Já o PM<sub>2.5</sub>, apresentou uma ligeira tendência para a sobrestimação. Deste modo, e considerando que somente o parâmetro CO se encontrou muito próximo de estar em cumprimento com os objetivos de qualidade dos dados para avaliação no ar ambiente referidos no Decreto-Lei nº 102/2010, para medições indicativas, verificou-se que, apesar da importância da utilização destas redes de monitorização complementares à monitorização efetuada pela rede oficial de monitorização gerida pela APA, os sensores estudados não reúnem condições para serem utilizados como suporte adicional a decisões de gestão da qualidade do ar e planeamento urbano na cidade de Lisboa.

**Palavras chave:** Sensores de baixo custo, Qualidade do ar, Rede de Monitorização da Qualidade do Ar, Lisboa



## ABSTRACT

Within the project's scope to monitor environmental parameters using low-cost sensors, the Lisbon City Council installed eighty stations in the city of Lisbon under contract with two companies (MONITAR and QART). To evaluate the performance of the sensors related to air quality, in comparison with the reference methods or equivalent defined in the legislation, based on hourly data for nine months, relative to five stations of the Air Quality Monitoring Network (Avenida da Liberdade, Entrecampos, Olivais Restelo, and Santa Cruz de Benfica), of five parameters (CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>), three studies were carried out: one evaluating statistical indicators (e.g.: RMSE, MBE, R<sup>2</sup>), another corresponding to the Air Quality Index (IQualAr) and a third comparing the number of exceedances to the limit values for the protection of human health, defined in Decree-Law no. 102/2010, of 23 September. It was concluded that the sensors with the best performance were those from Entrecampos, Olivais and Avenida da Liberdade, and the ones with the lowest performance were the ones from Santa Cruz de Benfica and Restelo. It was not possible to verify any relationship between the predominant influences of the stations (traffic and background) and the performance of the sensors, nor between the sensor company and the respective performance. Compared to the reference data, the CO and PM<sub>10</sub> parameters showed a clear trend towards underestimation, and the O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> parameters towards overestimation. PM<sub>2.5</sub>, on the other hand, showed a slight tendency towards overestimation. In this way, and considering that only the CO parameter was in compliance with the data quality objectives for evaluation in ambient air referred to in Decree-Law nº 102/2010, for indicative measurements, it was verified that despite the importance of using these monitoring networks complementary to the monitoring carried out by the official monitoring network managed by CCDR, the sensors studied do not meet the conditions to be used as additional support for air quality management decisions and urban planning in the city of Lisbon.

**Keywords:** Low-cost sensors, Air quality, Air Quality Monitoring Network, Lisbon



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Definição dos objetivos e âmbito.....	2
1.3	Estrutura da dissertação.....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>5</b>
2.1	A poluição atmosférica.....	5
2.1.1	Poluentes atmosféricos – características e fontes.....	5
2.2	Qualidade do ar.....	11
2.2.1	Impactos na saúde, ambiente e materiais.....	11
2.2.2	Influência das condições meteorológicas.....	16
2.3	Enquadramento legislativo relativo à proteção da saúde humana.....	18
2.4	Monitorização da qualidade do ar.....	22
2.4.1	Rede de estações de monitorização da qualidade do ar.....	22
2.4.1.1	Índice de Qualidade do Ar (IQualAr).....	28
2.4.2	Sensores de baixo custo.....	32
2.4.2.1	Tipologias e tecnologias disponíveis.....	33
2.4.2.2	Aplicabilidade dos sensores de baixo custo.....	36
2.4.2.3	Boas práticas para o funcionamento adequado dos sensores de qualidade do ar ..	38
2.4.2.4	Redes de monitorização existentes com sensores (casos de estudo).....	38
2.4.2.5	Oportunidades e desafios da utilização de sensores de baixo custo.....	43
<b>3</b>	<b>CASO DE ESTUDO: CIDADE DE LISBOA</b> .....	<b>45</b>
3.1	Caracterização da área de estudo.....	45
3.1.1	Zonamento da RLVT para avaliação e gestão da qualidade do ar.....	46
3.1.2	Geografia e clima.....	47
3.1.3	Demografia e sócio economia.....	51
3.1.4	Diagnóstico da qualidade do ar.....	57

3.1.4.1	Índice de qualidade do ar .....	58
3.1.4.2	Dióxido de azoto (NO <sub>2</sub> ) .....	59
3.1.4.3	Partículas em suspensão (PM <sub>10</sub> ) .....	61
3.1.4.4	Partículas finas (PM <sub>2.5</sub> ) .....	64
3.1.4.5	Ozono (O <sub>3</sub> ) .....	65
3.1.4.6	Síntese .....	68
3.1.5	Instrumentos de melhoria da qualidade do ar .....	68
3.1.5.1	Planos de Melhoria da qualidade do ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo .....	68
3.1.5.2	Implementação da ZER em Lisboa .....	71
3.1.5.3	Aumento da cobertura espacial de monitorização em tempo real .....	72
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>75</b>
4.1	Dados utilizados .....	75
4.2	Redução do âmbito .....	78
4.3	Pré-Processamento dos dados .....	79
4.3.1	Análise preliminar dos dados .....	81
4.4	Estudo da qualidade dos dados .....	81
4.4.1	Análises estatísticas .....	82
4.4.2	Índice QualAr .....	85
4.4.3	Ultrapassagens dos valores de referência .....	87
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>89</b>
5.1	Análise preliminar dos dados .....	89
5.2	Estudo de qualidade dos dados .....	92
5.2.1	Parâmetro CO .....	92
5.2.1	Parâmetro NO <sub>2</sub> .....	94
5.2.2	Parâmetro PM <sub>10</sub> .....	97
5.2.3	Parâmetro PM <sub>2.5</sub> .....	98
5.2.4	Parâmetro O <sub>3</sub> .....	99
5.3	Análises estatísticas .....	101
5.3.1	Parâmetro CO .....	101

5.3.2	Parâmetro NO <sub>2</sub> .....	102
5.3.3	Parâmetro PM <sub>10</sub> .....	104
5.3.4	Parâmetro PM <sub>2.5</sub> .....	106
5.3.5	Parâmetro O <sub>3</sub> .....	107
5.3.6	Síntese .....	109
5.4	Índice QualAr .....	111
5.4.1	Parâmetro PM <sub>10</sub> .....	113
5.4.2	Parâmetro PM <sub>2.5</sub> .....	113
5.4.3	Parâmetro O <sub>3</sub> .....	114
5.4.4	Síntese .....	114
5.5	Ultrapassagens valores de referência .....	115
5.5.1	Parâmetro NO <sub>2</sub> .....	115
5.5.2	Síntese .....	117
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>121</b>
6.1	Principais conclusões.....	121
6.2	Recomendações para melhorar a rede de sensores de Lisboa.....	124
6.3	Limitações do estudo .....	126
6.4	Desenvolvimentos futuros .....	126



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Representação gráfica da química da atmosfera.....	11
Figura 2.2- Esquema representativo do enquadramento legislativo no âmbito da gestão da qualidade do ar ambiente na UE e em Portugal. ....	20
Figura 2.3- Condições de verificação para o cálculo do índice QualAr .....	29
Figura 2.4- Exemplo de visualização do mapa global do índice QualAr, por estações, no dia 05/07/2022. ....	30
Figura 2.5- Exemplo de visualização do mapa do índice QualAr por estações, para o NO <sub>2</sub> , no dia 05/07/2022.....	30
Figura 2.6- Exemplo de visualização do mapa do índice QualAr, por zona/aglomeração, no dia 05/07/2022.....	31
Figura 2.7- Sensor da rede Breathe London.....	39
Figura 2.8-Localização dos sensores da rede de monitorização do projeto piloto em Bombaim. ....	42
Figura 2.9- Localização dos sensores da rede de monitorização da qualidade do ar de Watts. ES e HS designam escola primária e escola secundária. Os sensores da <i>Clarity</i> estão representados a verde e os da <i>Aeroqual</i> estão representados a roxo. ....	43
Figura 3.1- Delimitação das unidades de avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente da RLVT(a)aglomeração. ....	47
Figura 3.2- Localização das estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo (CCDR LVT) em funcionamento em 2020.....	47
Figura 3.3- Hipsometria da AML.....	48
Figura 3.4-Unidades morfoclimáticas da AML. ....	48
Figura 3.5- Normais climatológicas da temperatura do ar, para a estação de Lisboa Geofísica 1981-2010.....	49
Figura 3.6- Normais climatológicas da precipitação anual, para a estação de Lisboa Geofísica, 1981-2010.....	49
Figura 3.7-Normais climatológicas da intensidade média do vento à superfície, na AML, no período 1971-2000. ....	50
Figura 3.8- Domínios climáticos de Portugal Continental. ....	51
Figura 3.9-Evolução da população residente (nº) AML e Lisboa, 1991 a 2021. ....	52
Figura 3.10-População por Grandes Grupos de Idades (%),2021, Lisboa, AML e Continente. ....	53
Figura 3.11- Setores da atividade económica em Portugal, AML e Lisboa, segundos os Censos de 2011. ....	53

Figura 3.12- População residente na AML por lugar em 2011.....	54
Figura 3.13-Deslocações casa-trabalho ou casa-estudo, em 2011. ....	56
Figura 3.14- Modo de transporte predominante na AML e em Lisboa, em 2011.....	57
Figura 3.15- Distribuição do Índice de Qualidade do Ar pelo número de dias em cada ano, em Lisboa, entre 2001 e 2021. ....	59
Figura 3.16- Evolução da percentagem do número de dias com IQualAr Médio, Mau/Fraco e Muito Bom/Bom. ....	59
Figura 3.17- Evolução da concentração média anual de NO <sub>2</sub> , nas estações de Lisboa, entre 2001 e 2020. ....	60
Figura 3.18- Nº de ultrapassagens ao valor do limite horário (200 µg/m <sup>3</sup> ), por estação de Lisboa e média das excedências.....	61
Figura 3.19- Evolução da concentração média anual de PM <sub>10</sub> , para as estações localizadas em Lisboa .....	63
Figura 3.20- Nº de excedências ao valor limite diário de PM <sub>10</sub> nas estações de Lisboa .....	64
Figura 3.21- Evolução da concentração média anual de PM <sub>2,5</sub> , para as estações localizadas em Lisboa. ....	65
Figura 3.22- Evolução das concentrações médias anuais ozono troposférico, nas estações de Lisboa. ....	65
Figura 3.23- Ultrapassagem ao limiar de informação ao público, nas estações de Lisboa (Beato, Olivais, Entrecampos e Restelo). N.º de médias horárias > 180 µg/m <sup>3</sup> . ....	67
Figura 3.24- Excedências ao Objetivo de longo Prazo (OLP). ....	67
Figura 3.25- Excedências ao valor alvo (n.º de máximos diários das médias de 8h > 120 µg/m <sup>3</sup> média de 3 anos).....	68
Figura 3.26- Sensores da rede de monitorização complementar de qualidade do ar de Lisboa. ....	73
Figura 4.1- Resumo da metodologia adotada para o presente estudo .....	75
Figura 4.2- Localização das estações da rede de monitorização em estudo .....	76
Figura 4.3-Resumo esquemático do processamento dos dados.....	80
Figura 4.4- Representação do layout de uma matriz confusão. ....	86
Figura 5.1- Percentagem dos valores impossibilitados de serem registados ou que se encontravam indisponíveis (-99) e de <i>Nulls</i> , nos dados dos sensores e das estações por localização e poluente.....	91
Figura 5.2- Contagem dos <i>outliers</i> identificados nos dados dos sensores por localização e poluente	91
Figura 5.3- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro CO .....	93
Figura 5.4- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro NO <sub>2</sub> , na Avenida da Liberdade.....	94
Figura 5.5- Histograma relativo ao parâmetro NO <sub>2</sub> das Me, na Avenida da Liberdade.....	95
Figura 5.6- Histograma relativo ao parâmetro NO <sub>2</sub> das Ms, na Avenida da Liberdade .....	95
Figura 5.7- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro NO <sub>2</sub> .....	96
Figura 5.8- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM <sub>10</sub> .....	97

Figura 5.9- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM <sub>2.5</sub> .....	98
Figura 5.10-Gráficos de caixas relativos ao parâmetro O <sub>3</sub> .....	100
Figura 5.11- Medições dos sensores (Ms) vs. Medições das estações (Me) de referência para CO... 102	
Figura 5.12- Medições dos sensores (Ms) vs. Medições das estações (Me) de referência para NO <sub>2</sub> . 104	
Figura 5.13- Medições dos sensores (Ms) vs. Medições das estações (Me) de referência para PM <sub>10</sub> 106	
Figura 5.14- Medições dos sensores (Ms) vs. Medições das estações (Me) de referência para PM <sub>2.5</sub> .....	107
Figura 5.15- Medições dos sensores (Ms) vs. Medições das estações (Me) de referência para O <sub>3</sub> ... 108	
Figura 5.16- Resumo dos indicadores estatísticos (R <sup>2</sup> , FOEX e NMSE) para os parâmetros com tendência para sobrestimar (NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> e PM <sub>2.5</sub> ) .....	110
Figura 5.17- Resumo dos indicadores estatísticos (R <sup>2</sup> , FOEX e NMSE) para os parâmetros com tendência para subestimar (CO e PM <sub>10</sub> ).....	110
Figura 5.18-Matriz confusão do parâmetro NO <sub>2</sub> , na Avenida da Liberdade .....	112
Figura 5.19- Série temporal do parâmetro NO <sub>2</sub> , na Avenida da Liberdade e estudo das ultrapassagens do valor limite (200 µg/m <sup>3</sup> ), para um período de referência de uma hora .....	116
Figura 6.1- Área abrangida pela 1ª fase da ZER e sinalização, respetiva. ....	3
Figura 6.2- Área abrangida pela 2ª fase da ZER. ....	5
Figura 6.3- Sinalização adotada na 2ª fase da ZER.....	5
Figura 6.4- Sinalização adotada na 3ª fase da ZER.....	6
Figura 6.5- Mapa das áreas de intervenção do projeto ZER ABC.....	7
Figura 6.6- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro CO, na Avenida da Liberdade .....	11
Figura 6.7- Histogramas relativos ao parâmetro CO, na Avenida da Liberdade. ....	11
Figura 6.8- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro CO, em Entrecampos .....	11
Figura 6.9- Histogramas relativos ao parâmetro CO, em Entrecampos.....	11
Figura 6.10- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro CO, nos Olivais .....	12
Figura 6.11- Histogramas relativos ao parâmetro CO, em Olivais. ....	12
Figura 6.12- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro CO, em Santa Cruz de Benfica .....	12
Figura 6.13- Histogramas relativos ao parâmetro CO, em Santa Cruz de Benfica. ....	12
Figura 6.14- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro NO <sub>2</sub> , em Entrecampos .....	13
Figura 6.15- Histogramas relativos ao parâmetro NO <sub>2</sub> , em Entrecampos.....	13
Figura 6.16- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro NO <sub>2</sub> , nos Olivais .....	13
Figura 6.17- Histogramas relativos ao parâmetro NO <sub>2</sub> , nos Olivais.....	13
Figura 6.18- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro NO <sub>2</sub> , em Santa Cruz de Benfica.....	14
Figura 6.19- Histogramas relativos ao parâmetro NO <sub>2</sub> , em Santa Cruz de Benfica. ....	14
Figura 6.20- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro NO <sub>2</sub> , no Restelo.....	14
Figura 6.21- Histogramas relativos ao parâmetro NO <sub>2</sub> , nos Restelo.....	14
Figura 6.22- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM <sub>10</sub> , na Avenida da Liberdade .....	15

Figura 6.23- Histogramas relativos ao parâmetro PM <sub>10</sub> , na Avenida da Liberdade.....	15
Figura 6.24- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM <sub>10</sub> , em Entrecampos.....	15
Figura 6.25- Histogramas relativos ao parâmetro PM <sub>10</sub> , em Entrecampos. ....	15
Figura 6.26- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM <sub>10</sub> , nos Olivais.....	16
Figura 6.27- Histogramas relativos ao parâmetro PM <sub>10</sub> , nos Olivais. ....	16
Figura 6.28- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM <sub>10</sub> , em Santa Cruz de Benfica .....	16
Figura 6.29- Histogramas relativos ao parâmetro PM <sub>10</sub> , em Santa Cruz de Benfica.....	16
Figura 6.30- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM <sub>2,5</sub> , em Entrecampos .....	17
Figura 6.31- Histogramas relativos ao parâmetro PM <sub>2,5</sub> , em Entrecampos.....	17
Figura 6.32- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM <sub>2,5</sub> , nos Olivais .....	17
Figura 6.33- Histogramas relativos ao parâmetro PM <sub>2,5</sub> , nos Olivais.....	17
Figura 6.34- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro O <sub>3</sub> , em Entrecampos.....	18
Figura 6.35- Histogramas relativos ao parâmetro O <sub>3</sub> , em Entrecampos.....	18
Figura 6.36- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro O <sub>3</sub> , no Restelo .....	18
Figura 6.37- Histogramas relativos ao parâmetro O <sub>3</sub> , no Restelo.....	18
Figura 6.38- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro O <sub>3</sub> , nos Olivais.....	19
Figura 6.39- Histogramas relativos ao parâmetro O <sub>3</sub> , nos Olivais.....	19
Figura 6.40-Matriz confusão do parâmetro NO <sub>2</sub> , em Entrecampos .....	20
Figura 6.41-Matriz confusão do parâmetro NO <sub>2</sub> , nos Olivais.....	20
Figura 6.42-Matriz confusão do parâmetro NO <sub>2</sub> , em Santa Cruz de Benfica.....	21
Figura 6.43-Matriz confusão do parâmetro NO <sub>2</sub> , no Restelo.....	21
Figura 6.44-Matriz confusão do parâmetro PM <sub>10</sub> , na Avenida da Liberdade .....	22
Figura 6.45-Matriz confusão do parâmetro PM <sub>10</sub> , em Entrecampos.....	22
Figura 6.46-Matriz confusão do parâmetro PM <sub>10</sub> , nos Olivais .....	23
Figura 6.47-Matriz confusão do parâmetro PM <sub>10</sub> , em Santa Cruz de Benfica .....	23
Figura 6.48-Matriz confusão do parâmetro PM <sub>2,5</sub> , em Entrecampos .....	24
Figura 6.49-Matriz confusão do parâmetro PM <sub>2,5</sub> , em Olivais.....	24
Figura 6.50-Matriz confusão do parâmetro O <sub>3</sub> , em Entrecampos .....	25
Figura 6.51-Matriz confusão do parâmetro O <sub>3</sub> , no Restelo .....	25
Figura 6.52-Matriz confusão do parâmetro O <sub>3</sub> , nos Olivais .....	26
Figura 6.53- Série temporal do parâmetro CO, em Entrecampos e estudo das ultrapassagens do valor limite (10 mg/m <sup>3</sup> ), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas.....	27
Figura 6.54- Série temporal do parâmetro CO, na Avenida da Liberdade e estudo das ultrapassagens do valor limite (10 mg/m <sup>3</sup> ), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas ....	28
Figura 6.55- Série temporal do parâmetro CO, nos Olivais e estudo das ultrapassagens do valor limite (10 mg/m <sup>3</sup> ), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas .....	29

Figura 6.56-Série temporal do parâmetro CO, em Santa Cruz de Benfica e estudo das ultrapassagens do valor limite (10 mg/m <sup>3</sup> ), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas ...	30
Figura 6.57- Série temporal do parâmetro NO <sub>2</sub> , em Entrecampos e estudo das ultrapassagens do valor limite (200 µg/m <sup>3</sup> ), para um período de referência de uma hora .....	31
Figura 6.58- Série temporal do parâmetro NO <sub>2</sub> , nos Olivais e estudo das ultrapassagens do valor limite (200 µg/m <sup>3</sup> ), para um período de referência de uma hora.....	32
Figura 6.59- Série temporal do parâmetro NO <sub>2</sub> , em Santa Cruz de Benfica e estudo das ultrapassagens do valor limite (200 µg/m <sup>3</sup> ), para um período de referência de uma hora .....	33
Figura 6.60- Série temporal do parâmetro NO <sub>2</sub> , no Restelo e estudo das ultrapassagens do valor limite (200 µg/m <sup>3</sup> ) para um período de referência de uma hora .....	34
Figura 6.61- Série temporal do parâmetro PM <sub>10</sub> , em Entrecampos e estudo das ultrapassagens do valor limite (50 µg/m <sup>3</sup> ) para um período de referência de um dia.....	35
Figura 6.62- Série temporal do parâmetro PM <sub>10</sub> , na Avenida da Liberdade e estudo das ultrapassagens do valor limite (50 µg/m <sup>3</sup> ) para um período de referência de um dia.....	36
Figura 6.63- Série temporal do parâmetro PM <sub>10</sub> , nos Olivais e estudo das ultrapassagens do valor limite (50 µg/m <sup>3</sup> ) para um período de referência de um dia .....	38
Figura 6.64- Série temporal do parâmetro PM <sub>10</sub> , em Santa Cruz de Benfica e estudo das ultrapassagens do valor limite (50 µg/m <sup>3</sup> ) para um período de referência de um dia.....	39
Figura 6.65- Série temporal do parâmetro PM <sub>2,5</sub> , em Entrecampos e estudo das ultrapassagens do valor limite (25 µg/m <sup>3</sup> ) para um período de referência de um dia .....	40
Figura 6.66- Série temporal do parâmetro PM <sub>2,5</sub> , nos Olivais e estudo das ultrapassagens do valor limite (25 µg/m <sup>3</sup> ) para um período de referência de um dia .....	41
Figura 6.67- Série temporal do parâmetro O <sub>3</sub> , em Entrecampos e estudo das ultrapassagens do valor alvo (120 µg/m <sup>3</sup> ) para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas .....	42
Figura 6.68- Série temporal do parâmetro O <sub>3</sub> , no Restelo e estudo das ultrapassagens do limiar de informação (180 µg/m <sup>3</sup> ), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas .....	44
Figura 6.69- Série temporal do parâmetro O <sub>3</sub> , no Restelo e estudo das ultrapassagens do valor alvo (120 µg/m <sup>3</sup> ), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas .....	44
Figura 6.70- Série temporal do parâmetro O <sub>3</sub> , nos Olivais e estudo das ultrapassagens do valor alvo (120 µg/m <sup>3</sup> ), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas .....	45



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Tipos de poluente, fontes de emissão e características dos poluentes atmosféricos principais .....	7
Tabela 2.2-Resumo dos impactes na saúde, ambiente e materiais, pelos respetivos poluentes atmosféricos.....	16
Tabela 2.3- Valores dos requisitos legais para os poluentes que serão estudados ao longo desta dissertação, regulamentados pelo Decreto-Lei nº 102/2010, com o objetivo da proteção humana...	21
Tabela 2.4- Objetivos de qualidade dos dados para a avaliação no ar ambiente dos poluentes NO <sub>2</sub> , CO, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> e O <sub>3</sub> , com base no Decreto-Lei nº 102/2010 de 23 de setembro, para as medições fixas, indicativas e estimativas objetivas.....	23
Tabela 2.5- Tipo de estação quanto à influência e ambiente. ....	24
Tabela 2.6- Métodos de referência aplicáveis aos poluentes monitorizados na presente dissertação, princípios, gamas de medição e referências bibliográficas.....	27
Tabela 2.7- Classes do índice QualAr.....	31
Tabela 2.8- Descrição dos potenciais usos para os sensores de baixo custo (Williams et al., 2014)....	36
Tabela 2.9- Exemplos de objetivos de desempenho sugeridos para sensores para cinco tipos de aplicações em comparação com requisitos de monitorização regulamentar .....	37
Tabela 2.10- Síntese das oportunidades e desafios da utilização de sensores de baixo custo. ....	44
Tabela 3.1. Características das zonas e aglomerações da região de Lisboa e Vale do Tejo definidas em 2013.....	46
Tabela 4.1- ID da estação, localização, influência, ambiente, altitude e poluentes monitorizados .....	77
Tabela 4.2-Localização dos sensores, parâmetros medidos, empresa que instalou os sensores e tipo de estação .....	77
Tabela 4.3- Parâmetros atmosféricos medidos, tipo de sensor e gama de medição dos micro sensores .....	78
Tabela 4.4- Parâmetros atmosféricos medidos pelas estações, método de medição e gama de medição .....	78
Tabela 4.5- Localização das estações em estudo e poluentes avaliados em cada estação .....	79
Tabela 4.6- Definição dos <i>outliers</i> : <i>out of range</i> e variação excessiva.....	81
Tabela 5.1- Eficiência da recolha dos dados dos sensores e das estações, por localização e poluente	90
Tabela 5.2- Resumo dos valores relativos aos gráficos de caixas, para o parâmetro CO. Todos os valores encontram-se com a unidade mg/m <sup>3</sup> , com exceção do N .....	94
Tabela 5.3- Resumo dos gráficos de caixas relativo ao parâmetro NO <sub>2</sub> .....	96
Tabela 5.4- Resumo dos gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM <sub>10</sub> .....	98

Tabela 5.5- Resumo dos gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM <sub>2.5</sub> .....	99
Tabela 5.6- Resumo dos gráficos de caixas relativos ao parâmetro O <sub>3</sub> .....	100
Tabela 5.7- Indicadores estatísticos comparando os dados das Ms com os dados das Me, para o CO. .....	101
Tabela 5.8- Indicadores estatísticos comparando os dados das Ms com os dados das Me, para o NO <sub>2</sub> .....	103
Tabela 5.9- Indicadores estatísticos comparando os dados das Ms com os dados das Me, para o PM <sub>10</sub> .....	105
Tabela 5.10- Indicadores estatísticos comparando os dados das Ms com os dados das Me, para o PM <sub>2.5</sub> .....	107
Tabela 5.11- Indicadores estatísticos comparando os dados das Ms com os dados das Me, para o O <sub>3</sub> .....	108
Tabela 5.12- Indicadores estatísticos comparando os dados das Ms com os dados das Me, para todos os parâmetros em estudo, em todas as localizações.....	111
Tabela 5.13- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro NO <sub>2</sub> , na Avenida da Liberdade.....	112
Tabela 5.14- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro NO <sub>2</sub> , em todas as localizações.....	112
Tabela 5.15- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM <sub>10</sub> , em todas as localizações .....	113
Tabela 5.16- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM <sub>2.5</sub> , em todas as localizações .....	114
Tabela 5.17- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro O <sub>3</sub> , em todas as localizações.....	114
Tabela 5.18- Resumo da exatidão para cada localização e parâmetro em estudo.....	114
Tabela 5.19- Média horária, máximo horário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro NO <sub>2</sub> , na Avenida da Liberdade .....	116
Tabela 5.20-Resumo das ultrapassagens dos valores de referência horário e diário (Valor limite e valor alvo). Para o parâmetro O <sub>3</sub> , não foram contabilizadas as 4 ocorrências verificadas para as Ms, no que toca à excedência dos limiares de informação .....	117
Tabela 5.21- Resumo dos indicadores de objetivos de qualidade dos dados para a avaliação no ar ambiente, de todos os parâmetros e sensores das várias estações. ....	119
Tabela 6.1-Contagem dos valores impossibilitados de serem registados ou que se encontravam indisponíveis (-99), em absoluto e relativo .....	1
Tabela 6.2-Contagem dos valores sem registo ( <i>nulls</i> ), em absoluto e relativo, antes do tratamento dos dados .....	2
Tabela 6.3-Contagem dos outliers identificados, em absoluto e relativo e por tipologia .....	2

Tabela 6.4- Métricas usadas para comparar dados de sensores. A inicial M, indica os dados dos sensores e o RM indica as medições de referência.....	9
Tabela 6.5- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro NO <sub>2</sub> , em Entrecampos.....	20
Tabela 6.6- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro NO <sub>2</sub> , nos Olivais .....	20
Tabela 6.7- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro NO <sub>2</sub> , em Santa Cruz de Benfica .....	21
Tabela 6.8- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro NO <sub>2</sub> , no Restelo .....	21
Tabela 6.9- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM <sub>10</sub> , na Avenida da Liberdade.....	22
Tabela 6.10- Resumo dos indicadores da performance da classificação para o parâmetro PM <sub>10</sub> , em Entrecampos.....	22
Tabela 6.11- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM <sub>10</sub> nos Olivais .....	23
Tabela 6.12- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM <sub>10</sub> em Santa Cruz de Benfica.....	23
Tabela 6.13- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM <sub>2.5</sub> , em Entrecampos.....	24
Tabela 6.14- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM <sub>2.5</sub> , nos Olivais .....	24
Tabela 6.15- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro O <sub>3</sub> , em Entrecampos.....	25
Tabela 6.16- Resumo dos indicadores da performance da classificação parâmetro O <sub>3</sub> , no Restelo ....	25
Tabela 6.17- Resumo dos indicadores da performance da classificação parâmetro O <sub>3</sub> , nos Olivais....	26
Tabela 6.18- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição do parâmetro CO, em Entrecampos.....	27
Tabela 6.19- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição do parâmetro CO, na Avenida da Liberdade .....	28
Tabela 6.20- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição do parâmetro CO, nos Olivais.....	29
Tabela 6.21- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro CO, em Santa Cruz de Benfica .....	30
Tabela 6.22- Média horária, máximo horário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro NO <sub>2</sub> , em Entrecampos.....	31

Tabela 6.23- Média horária, máximo horário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro NO <sub>2</sub> , nos Olivais .....	32
Tabela 6.24- Média horária, máximo horário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro NO <sub>2</sub> , em Santa Cruz de Benfica .....	33
Tabela 6.25- Média horária, máximo horário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro NO <sub>2</sub> , no Restelo .....	34
Tabela 6.26- Média, máximo horário, máximo diário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro PM <sub>10</sub> , em Entrecampos .....	35
Tabela 6.27- Média horária, média diária, máximo horário, máximo diário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro PM <sub>10</sub> , na Avenida da Liberdade .....	36
Tabela 6.28- Média horária, média diária, máximo horário, máximo diário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro PM <sub>10</sub> , nos Olivais.....	37
Tabela 6.29- Média horária, média diária, máximo horário, máximo diário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro PM <sub>10</sub> , em Santa Cruz de Benfica .....	39
Tabela 6.30- Média horária, média diária, máximo horário, máximo diário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro PM <sub>2,5</sub> , em Entrecampos .....	40
Tabela 6.31- Média horária, média diária, máximo horário, máximo diário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro PM <sub>2,5</sub> , nos Olivais .....	41
Tabela 6.32- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro O <sub>3</sub> , em Entrecampos .....	42
Tabela 6.33- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro O <sub>3</sub> , no Restelo.....	43
Tabela 6.34- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro O <sub>3</sub> , nos Olivais.....	45

## SIGLAS

<b>AML</b>	Área Metropolitana de Lisboa
<b>ANSR</b>	Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária
<b>API</b>	<i>Application Programming Interface/</i> Interface de Programação da Aplicação
<b>APA</b>	Agência Portuguesa do Ambiente
<b>ATMIS</b>	Sistema de Recolha e Processamento de Dados de Qualidade do Ar da CCDR
<b>AVC</b>	Acidentes Vasculares Cerebrais
<b>CCDR</b>	Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional
<b>CCDR LVT</b>	Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo
<b>CE</b>	Comissão Europeia
<b>CML</b>	Câmara Municipal de Lisboa
<b>COV</b>	Compostos Orgânicos Voláteis
<b>DCEA- FCT/UNL</b>	Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
<b>DRA</b>	Direções Regionais do Ambiente
<b>ENAR 2020</b>	Estratégia Nacional para a Qualidade do Ar
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency
<b>FCT NOVA</b>	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa
<b>GPRS</b>	Rede de Banda Larga Móvel
<b>GSEA</b>	Gabinete do Secretário de Estado do Ambiente
<b>IARC</b>	<i>International Agency for Research on Cancer/</i> Agência Internacional de Investigação do Cancro
<b>IMT</b>	Instituto da Mobilidade e dos Transportes
<b>IoT</b>	<i>Internet of Things/</i> Internet das Coisas
<b>LAeq</b>	Nível Sonoro Contínuo Equivalente

<b>LALerta</b>	Limiar de Alerta
<b>LCS</b>	Sensores de Baixo Custo
<b>LInfo</b>	Limiar de Informação
<b>Me</b>	Medições das Estações
<b>Ms</b>	Medições dos Sensores
<b>OEM</b>	Fabricante de Equipamentos Originais
<b>OH</b>	Radical Hidroxilo
<b>OLP</b>	Objetivo de Longo Prazo
<b>OMS</b>	Organização Mundial de Saúde
<b>OPC</b>	Contadores de Partículas Óticas
<b>OVTPS</b>	Oeste, Vale do Tejo e Península de Setúbal
<b>P&amp;M</b>	Políticas e Medidas
<b>PExec</b>	Programa de Execução
<b>PGIL</b>	Plataforma de Gestão Inteligente de Lisboa
<b>PM (PM<sub>10</sub> e PM<sub>2.5</sub>)</b>	Matéria particulada
<b>PM<sub>10</sub></b>	Partículas inaláveis com um diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 10 µm
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	Partículas Finas/ Partículas com um diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 2,5 µm
<b>PMQA RLVT</b>	Plano de Melhoria da Qualidade do Ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo
<b>QA</b>	Qualidade do Ar
<b>QualAr</b>	Índice de Qualidade do Ar
<b>RLVT</b>	Região de Lisboa e Vale do Tejo
<b>RML</b>	Rede de Monitorização de Lisboa
<b>RMQA LVT</b>	Rede de Monitorização de Qualidade do Ar de Lisboa e Vale Do Tejo
<b>RMQAr</b>	Rede de Monitorização de Qualidade do Ar
<b>SSys</b>	Sistemas de Sensores
<b>UE</b>	União Europeia

<b>UFP</b>	Universidade Fernando Pessoa
<b>UV</b>	Ultravioleta
<b>VA</b>	Valor Alvo
<b>VAO</b>	Vias de Alta Ocupação
<b>VL</b>	Valor Limite
<b>VLA</b>	Valor Limite Anual
<b>VLD</b>	Valor Limite Diário
<b>VLH</b>	Valor Limite Horário
<b>ZER</b>	Zona de Emissões Reduzidas



## 1.1 Enquadramento

A poluição atmosférica continua a ser um dos problemas mais graves que ameaça a saúde humana. Ao longo das últimas décadas, o impacto da poluição atmosférica tem se tornado mais visível. Isto é especialmente observável em locais densamente povoados com uma infraestrutura diversificada, como o trânsito intenso, as indústrias transformadoras e outras comodidades urbanas. A Organização Mundial de Saúde (OMS) estima que a poluição atmosférica seja responsável pela morte prematura de 4,2 milhões de pessoas em todo o mundo por ano e que 99% da população mundial viva em locais onde as orientações da qualidade do ar, estabelecidas pela OMS, não estão a ser cumpridas. Na Europa, estima-se que 400 000 mortes prematuras por ano são atribuídas à poluição atmosférica, tornando-se este um dos maiores riscos de saúde ambiental (EEA, 2013, 2018, 2022a, 2022b). Os poluentes atmosféricos que são considerados mais relevantes são as matérias particuladas ( $PM_{10}$  e  $PM_{2.5}$ ), compostos orgânicos voláteis (COV), metais pesados, ozono ( $O_3$ ), monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto ( $NO_x$ ) e dióxido de enxofre ( $SO_2$ ).

Para diminuir o impacto das emissões, estas têm de ser reduzidas e as concentrações dos poluentes na atmosfera devem ser controladas. A monitorização da qualidade do ar é uma componente crítica da gestão da qualidade do ar urbano e um primeiro passo necessário para alcançar os objetivos de qualidade do ar, através de medidas de controlo eficazes. Para ir ao encontro destas necessidades, tem sido elaborada legislação para a qualidade do ar e criadas redes de monitorização de qualidade do ar, com recurso a estações fixas de monitorização, que utilizam métodos de referência, e que fornecem um registo contínuo das concentrações de poluentes à escala local e regional dos poluentes regulamentados.

Os atuais sistemas de monitorização ambiental distinguem-se pelos elevados custos de investimento e de operação, complexidade da instalação e manutenção, exigindo recursos substanciais, infraestruturas e conhecimento técnico. Tudo isto obriga a limitar o número de estações que podem ser instaladas e mantidas numa determinada região, o que impossibilita a cobertura total do território,

limitando deste modo a avaliação robusta da qualidade do ar (Gressent et al., 2020; Okafor et al., 2020; Oladini et al., 2022).

Neste âmbito, na última década, o aumento da consciencialização relativamente aos problemas de qualidade do ar, combinado com os progressos e desenvolvimentos tecnológicos, permitiram a criação de ferramentas para lidar com esta restrição, entre elas, o desenvolvimento de sensores de baixo custo (LCS), também denominados como micro sensores, para, de forma complementar, medir as concentrações de poluentes. Este tipo de sensores permite a recolha de dados em tempo real, com uma densidade espacial e uma resolução temporal superiores às tradicionais redes de monitorização, podendo assim, complementar os equipamentos de referência.

Adotar este tipo de métodos de baixo custo para a monitorização de qualidade do ar permite ultrapassar as lacunas de resolução espacial que se verificam quando se recorre aos métodos de referência tradicionais. Embora estes métodos apresentem uma incerteza associada superior relativamente aos métodos de referência, têm a vantagem de poderem ser implementados de forma massiva num número elevado de locais, permitindo uma caracterização da qualidade do ar mais detalhada e com superior resolução espacial.

Com a implementação extensa deste tipo de sensores, torna-se mais fácil e com um superior nível de detalhe, compreender o perigo e os níveis de poluição em relação às normas e orientações de saúde nacionais e internacionais, compreender os padrões espaciais de poluição e as regiões de elevada exposição, identificar fontes de poluição e detetar *hotspots*; aumentar a consciencialização da sociedade civil e acumular dados para incentivar ações políticas de gestão da qualidade do ar, para além de ainda ser possível um controlo superior da eficácia das políticas e da aplicação dos regulamentos implementados (Giordano et al., 2021; Oladini et al., 2022).

Não obstante de todas estas vantagens que os LCS podem adicionar às estratégias de mitigação dos problemas de qualidade do ar que, como referido anteriormente, não podem ser alcançadas apenas com os métodos convencionais, é necessário ultrapassar o maior desafio para o uso generalizado deste tipo de sensores: a baixa qualidade dos dados. É urgente apostar no desenvolvimento destas metodologias, mais concretamente na verificação da qualidade do desempenho dos micro sensores relativamente aos métodos de referência (Mead et al., 2012).

## **1.2 Definição dos objetivos e âmbito**

Esta dissertação provém de uma colaboração entre a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa (FCT NOVA) e a Câmara Municipal de Lisboa (CML). O principal objetivo desta dissertação é avaliar os dados de qualidade do ar da nova rede de monitorização da Cidade de Lisboa, com recurso a sensores de baixo custo, tendo os dados da rede de monitorização de qualidade do ar (RMQA) como método de referência. Adicionalmente, esta dissertação

pretende apresentar sugestões para a utilização da rede de monitorização como suporte a decisões de gestão da qualidade do ar e planeamento na cidade de Lisboa.

### 1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação divide-se em seis capítulos:

- **Introdução:**

Neste capítulo é feito um enquadramento preliminar da temática em estudo ao longo desta dissertação. Neste contexto, são apresentados alguns dados sobre a mortalidade e morbilidade associada à qualidade do ar, à escala mundial e nacional. É também abordada a importância da monitorização constante da qualidade do ar e da importância de adotar novas tecnologias neste âmbito.

- **Revisão da Literatura**

São explorados de uma forma mais profunda os tópicos do estudo desenvolvido nesta dissertação, tendo em conta estudos prévios, investigação científica e legislação aplicável. Na primeira secção deste capítulo são abordadas as características e as fontes da poluição atmosférica (naturais e antropogénicas). Na segunda secção são abordados os impactos na saúde humana, no ambiente e nos materiais e a influência das condições meteorológicas. Na terceira secção é apresentado um enquadramento legislativo relativo à saúde humana. Na quarta secção são abordadas as formas de monitorização da qualidade do ar, tendo em conta a rede de estações de monitorização da qualidade do ar nacional (o seu funcionamento, técnicas de avaliação, o sistema de divulgação da informação, os métodos de referência e métodos equivalentes e Índice de Qualidade do ar) e os sensores de baixo custo (tipologias e tecnologias disponíveis, aplicabilidades, boas práticas para o funcionamento adequado destes sensores, alguns casos de estudo internacionais e ainda, oportunidades e desafios da utilização deste tipo de sensores).

- **Caso de estudo**

Neste Capítulo é realizada uma breve caracterização da área de estudo em que incide a investigação — a Cidade de Lisboa — tendo em conta fatores geográficos, climáticos e meteorológicos. É também apresentada uma caracterização demográfica e socioeconómica, bem como uma breve análise dos padrões de mobilidade. Por fim, é produzida uma caracterização das emissões dos poluentes atmosféricos das últimas duas décadas e é realizada uma análise dos instrumentos de melhoria da qualidade do ar (Planos de Melhoria da Qualidade do Ar na Região de Lisboa e Vale do Tejo, Zona de Emissões Reduzidas de Lisboa e o projeto de acompanhamento da situação através da rede de monitorização com recurso a sensores de baixo custo).

- **Metodologia**

Neste Capítulo, é apresentada a metodologia que foi seguida na realização desta dissertação. É descrito também todo o processamento dos dados e os indicadores estatísticos utilizados para a discussão dos resultados alcançados.

- **Resultados e discussão**

Neste Capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos relativamente à qualidade dos dados dos sensores de baixo custo do projeto da nova rede de monitorização de Lisboa. É apresentada uma análise dos dados, um estudo da qualidade dos dados, as análises estatísticas entre dados dos sensores de baixo custo e métodos de referência (dados das estações de qualidade do ar), as matrizes de confusão relativas aos Índices de Qualidade do Ar e por fim, um estudo das ultrapassagens aos valores de referência de qualidade do ar, que se encontram legislados.

- **Conclusão**

No sexto e último Capítulo, são apresentadas as principais conclusões do estudo elaborado ao longo desta dissertação, o cumprimento dos objetivos definidos à *priori*, e por fim, são apresentadas recomendações para melhorar a rede de sensores de Lisboa.

Este capítulo tem como objetivo contextualizar o estudo desenvolvido ao longo desta dissertação, através da introdução de conceitos teóricos que irão auxiliar e contextualizar este trabalho.

## 2.1 A poluição atmosférica

### 2.1.1 Poluentes atmosféricos – características e fontes

A poluição atmosférica é um dos problemas ambientais mais desafiantes, devendo este problema ser enfrentado às escalas local, regional e global (Rovira et al., 2020). Nem todas as substâncias presentes no ar são consideradas poluentes. De uma forma geral, a poluição atmosférica define-se como a existência de determinados poluentes na atmosfera, que degradam a qualidade do ar, a níveis que são prejudiciais à saúde humana, ao ambiente e ao património (tudo o que são edifícios, monumentos e materiais). Adicionalmente, a poluição do ar é também a principal causa da degradação dos ecossistemas, problemas globais como a deterioração da camada de ozono estratosférico e as alterações climáticas. No contexto legislativo, só a poluição que provem de fontes antropogénicas é considerada (APA, 2022a; EEA, 2013).

Os poluentes atmosféricos podem ser categorizados como primários ou secundários, dependendo da sua origem. São considerados primários se forem emitidos diretamente por uma fonte para a atmosfera. Na atmosfera, os poluentes primários podem sofrer transformações e reações químicas, resultando em poluentes secundários, como é o caso do ozono e da matéria particulada (PM).

Os principais poluentes atmosféricos primários incluem a PM, os óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), os óxidos de azoto ( $\text{NO}_x$ ), incluindo o monóxido de azoto (NO) e o dióxido de azoto ( $\text{NO}_2$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) e o monóxido de carbono (CO) (EEA, 2021).

Os principais poluentes secundários do ar são a PM, o ozono ( $\text{O}_3$ ),  $\text{NO}_2$  e vários compostos orgânicos voláteis oxidados (COV). Os principais gases precursores para a PM secundária são o dióxido de

enxofre (SO<sub>2</sub>), NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> e compostos orgânicos voláteis (COV) de metais pesados Estes poluentes e os seus gases precursores podem ser de origem natural ou antropogénica (EEA, 2021).

É também importante considerar a localização geográfica e a distribuição das fontes. As escalas local, urbana, regional e global da poluição atmosférica podem ser diferenciadas, dependendo em primeiro lugar da permanência de cada componente específico no ar (World Health Organization, 2005).

As fontes naturais englobam fenómenos da natureza, tais como emissões provenientes de erupções vulcânicas, incêndios florestais de origem natural, tempestades de areia em regiões áridas, *spray* de sal marinho e emissões de COV provenientes da vegetação. Já as fontes antropogénicas são as que resultam das atividades humanas como: a atividade industrial, queima de combustíveis fósseis na produção de eletricidade, transportes e tráfego automóvel, indústria e agregados familiares, processos industriais e utilização de solventes (por exemplo nas indústrias química e mineira), agricultura e tratamento de resíduos (APA, 2022a; EEA, 2021).

O contributo das atividades humanas para a criação de poluentes atmosféricos é geralmente mais fácil de medir e monitorizar do que as fontes naturais. Não obstante, esta contribuição humana varia muito em função do poluente. A queima de combustíveis tem aumentado consideravelmente nos diversos setores económicos, do transporte rodoviário ao consumo energético das famílias envolvendo também a produção de energia elétrica, sendo que mais de 40% das emissões de NO<sub>x</sub> provêm do transporte rodoviário e cerca de metade das emissões de PM<sub>2.5</sub> e CO provêm de edifícios comerciais, governamentais e públicos e famílias (EEA, 2013). Na Tabela 2.1 é possível observar os tipos de poluentes, fontes de emissão e características dos principais poluentes atmosféricos.

Tabela 2.1- Tipos de poluente, fontes de emissão e características dos poluentes atmosféricos principais

		Tipo	Fontes de emissão	
			Naturais	Antropogénicas
Poluentes	Monóxido de Carbono (CO)	Primário e secundário	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incêndios florestais</li> <li>• Erupções vulcânicas</li> <li>• Decomposição da clorofila</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transportes rodoviários</li> </ul>
	Dióxido de Azoto (NO <sub>2</sub> )	Primário e secundário	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oceano</li> <li>• Atmosfera (oxidação do NH<sub>3</sub>)</li> <li>• Solos tropicais (floresta húmida, savanas secas)</li> <li>• Solos temperados (Florestas, prados)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporte rodoviário</li> <li>• Solos agrícolas</li> <li>• Queima de biomassa</li> <li>• Processos de combustão em processos industriais</li> <li>• Gado e lotes de alimentação</li> <li>• Estratosfera</li> </ul>
	Partículas inaláveis (PM <sub>2.5</sub> e PM <sub>10</sub> )	Primário e secundário	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spray marinho</li> <li>• Ressuspensão de solos áridos</li> <li>• Reações químicas na atmosfera</li> <li>• Episódios de poeira do deserto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combustão de combustíveis para aquecimento doméstico</li> <li>• Atividades industriais</li> <li>• Agricultura</li> <li>• Transportes rodoviários</li> </ul>
	Ozono (O <sub>3</sub> )	Secundário	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reações químicas na presença de luz solar, na sequência de emissões de gases precursores</li> </ul>	

### Monóxido de Carbono (CO)

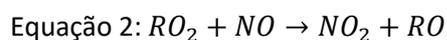
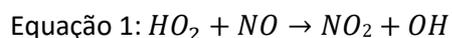
O monóxido de carbono é um poluente primário, com um tempo de vida relativamente curto e com padrões de emissão distintos (Lead et al., 2018). É um gás incolor, sem sabor, inodoro, insípido, inflamável e não irritante, é ubíquo na atmosfera e o de origem antropogénica, proveniente essencialmente da combustão incompleta de combustíveis fósseis ou de outras matérias orgânicas, como por exemplo a gasolina, o gás natural, carvão e madeira. Mais de metade das emissões atmosféricas de CO são causadas por atividades antropogénicas (Lead et al., 2018), sendo que as emissões dos veículos a motor são a principal fonte de CO no ar exterior nas zonas urbanas (Jiang et al., 2022; Sgobba et al., 2022), deste modo, as zonas de tráfego intenso são as que apresentam concentrações mais elevadas de CO. As condições de circulação também influenciam bastante as concentrações, uma vez que as emissões de CO são inversamente proporcionais à velocidade de circulação (Nogueira & Mesquita, 2020).

As principais fontes naturais deste poluente são incêndios florestais, erupções vulcânicas e a decomposição de clorofila. Por outro lado, o CO de origem secundária resulta sobretudo da oxidação de poluentes orgânicos, como por exemplo o metano (Nogueira & Mesquita, 2020).

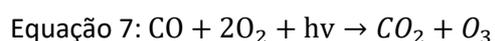
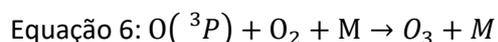
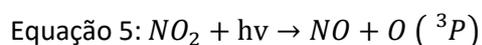
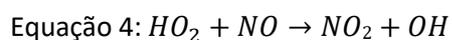
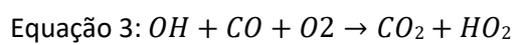
Não é considerado um gás com efeito de estufa direto, uma vez que não absorve radiação infravermelha terrestre suficientemente forte. Não obstante, tem um papel fundamental na determinação da concentração do radical hidroxilo (OH), que afeta indiretamente a presença atmosférica do metano (CH<sub>4</sub>), podendo também levar à formação de O<sub>3</sub> (Lead et al., 2018).

### Óxidos de Azoto (NO<sub>2</sub> e NO)

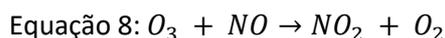
Os óxidos de azoto (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>) são um grupo de gases composto por monóxido de azoto (NO) e NO<sub>2</sub>. Existem duas formas de passar NO a NO<sub>2</sub>: através da oxidação fotoquímica que ocorre do monóxido de azoto, na presença de oxigénio (Equação 4) e através da reação entre radicais livres de oxigénio e NO (Equação 1 e Equação 2) (Farias et al., 2019):



Os NO<sub>x</sub> não afetam diretamente o equilíbrio radiativo da Terra, mas catalisam a formação troposférica de O<sub>3</sub>, através de uma sequência de reações, por exemplo:



Nos veículos automóveis, a grande maioria das emissões do NO<sub>x</sub> troposférico ocorrem sob a forma de NO (produzido pela combustão nos motores), sendo este posteriormente transformado em NO<sub>2</sub> por reação com o oxigénio (O<sub>2</sub>) presente no ar ou com o O<sub>3</sub>. A oxidação do NO pelo O<sub>2</sub> é uma reação lenta, podendo o NO manter-se na atmosfera por largos períodos. Por outro lado, a oxidação do NO pelo O<sub>3</sub> é uma reação relativamente rápida, que em poucos minutos se equilibra fotoquimicamente com o NO<sub>2</sub>, por consumo do ozono troposférico:



Os óxidos de azoto, são os principais constituintes da química troposférica, pelo que devido às suas características de instabilidade química, através da radiação solar ou até vapor de água existente na atmosfera, podem levar à formação de outros poluentes, como é o caso do ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), que em seguida, recolhe aerossóis ou se dissolve em precipitação e posteriormente infiltra-se no solo, podendo alterar as características do mesmo (processo de deposição ácida). Como explicado

anteriormente pela sequência de reações, os  $\text{NO}_x$  são também responsáveis pela formação de  $\text{O}_3$ , e de PM (Cui et al., 2016; EEA, 2021; Farias et al., 2019).

A queima de combustíveis fósseis — que representa mais de 60% do orçamento global de emissões — constitui a principal fonte antropogénica destes óxidos, destacando-se o transporte rodoviário, que a partir da combustão interna dos motores dos veículos emite estes gases. Nos grandes centros urbanos há elevadas concentrações deste composto, uma vez que é emitido muito perto do solo, aumentando a exposição da população ao  $\text{NO}_2$ , que pode gerar efeitos adversos na saúde humana, a curto, médio e longo prazo. Estes efeitos serão explicados na próxima secção (EEA, 2022b; Farias et al., 2019).

As instalações industriais e centrais de fornecimento de energia são também fontes consideráveis de óxidos de azoto. Estes gases também podem ser oriundos de fontes naturais, embora numa escala muito menor, por exemplo em tempestades com relâmpagos, incêndios e alguns tipos de solo (Cui et al., 2016; EEA, 2021).

### **Partículas em suspensão ( $\text{PM}_{10}$ e $\text{PM}_{2.5}$ )**

As partículas são um conjunto complexo de partículas aerossóis, substâncias, minerais ou orgânicas, que se encontram em suspensão na atmosfera, sob a forma líquida ou sólida, que cobrem uma vasta gama de tamanhos e composições químicas (Nogueira & Mesquita, 2020).

As partículas em suspensão, distinguem-se entre as designações pelo seu diâmetro. A sua dimensão pode variar entre algumas dezenas de nanómetros e uma centena de micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), sendo as mais referidas na literatura as partículas com um diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a  $2,5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) e as partículas com um diâmetro igual ou inferior a  $10 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) (Nogueira & Mesquita, 2020).

As partículas podem ser emitidas para a atmosfera a partir de diversas fontes antropogénicas, sendo as mais comuns e significativas o tráfego rodoviário, a queima de combustíveis fósseis para aquecimento doméstico, atividades agrícolas e determinados processos e atividades industriais. No que toca a fontes naturais, podem ser emitidas por vulcões, incêndios florestais ou serem resultantes da atividade do vento sobre superfícies aquáticas e sobre o solo (EEA, 2022b; Nogueira & Mesquita, 2020).

As partículas podem ser libertadas diretamente no ambiente como partículas primárias ou podem formar-se na atmosfera como resultado de reações químicas envolvendo gases e outras partículas presentes na atmosfera como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e COV, que podem gerar sulfatos, nitratos e vários compostos de carbono orgânico (EEA, 2021; Nogueira & Mesquita, 2020).

Os transportes rodoviários são considerados a maior fonte emissora de partículas, em particular nas zonas urbanas, na proximidade de vias de tráfego intenso e regular. Estas partículas são também geradas pelos processos de abrasão dos veículos — desde o desgaste dos pneus, travões e superfície das estradas — e pela ressuspensão de poeiras nas estradas. Vários estudos indicam que os veículos a gasóleo emitem uma quantidade superior de partículas finas, por veículo, comparativamente com os veículos a gasolina (Nogueira & Mesquita, 2020).

### **Ozono (O<sub>3</sub>)**

O ozono (O<sub>3</sub>) é formado por três átomos de oxigénio com um forte poder oxidante (EEA, 2013; Nogueira & Mesquita, 2020).

Na estratosfera — uma das camadas superiores da atmosfera — o O<sub>3</sub> filtra a radiação solar ultravioleta (UV), protegendo assim a vida sobre a Terra. Na troposfera — camada atmosférica em contacto com a superfície terrestre — o O<sub>3</sub>, designado como ozono troposférico ou de superfície, é considerado um poluente secundário que afeta negativamente a saúde humana e a biodiversidade (EEA, 2013; Nogueira & Mesquita, 2020).

O O<sub>3</sub> troposférico não entra diretamente na atmosfera, desenvolve-se na atmosfera como resultado de um conjunto de reações químicas, que começam com as emissões de gases precursores específicos, incluindo CH<sub>4</sub>, CO, NMVOCs e NO<sub>x</sub>. As reações químicas sob a influência da luz solar resultam na formação de O<sub>3</sub> troposférico. Os poluentes primários e precursores deste poluente são essencialmente resultantes de fontes antropogénicas, nomeadamente pelas emissões dos veículos automóveis e, no caso dos COV, também biogénicas (EEA, 2021; Nogueira & Mesquita, 2020; Pierre, 2021).

Os episódios de concentrações elevadas deste poluente acontecem predominantemente em dias de verão, com radiação solar forte, temperaturas elevadas, atmosfera estável e vento fraco. Normalmente, as concentrações mais elevadas deste gás são observadas na periferia dos locais onde são emitidas maiores concentrações dos gases precursores, uma vez que estes podem ser transportados pelas massas de ar por grandes distâncias. Em áreas urbanas, o NO que é emitido pelos veículos automóveis, reage com o O<sub>3</sub>, contribuindo para a redução das concentrações deste poluente, à escala local (Nogueira & Mesquita, 2020).

A produção de ozono aumenta durante o dia, quando não há NO suficiente para destruir o O<sub>3</sub>, pois está a reagir com o oxigénio e a formar NO<sub>2</sub>. Durante o anoitecer, como diminui gradualmente a radiação solar, o O<sub>3</sub> é rapidamente destruído. Deste modo, os picos de concentração deste gás são bem demarcados, como se pode observar na Figura 2.1. Já o NO<sub>2</sub>, tendencialmente vai aumentando até meio da manhã, altura em que começa a aumentar a radiação solar, que facilita a formação de ozono, como foi possível observar na Equação 5, Equação 6 e Equação 7.

No meio rural, quando há ausência de NO, a destruição do ozono é mais lenta e fraca, o que por sua vez gera variações menores e sucessivamente, as concentrações em termos médios acabam por ser mais elevadas (Nogueira & Mesquita, 2020).

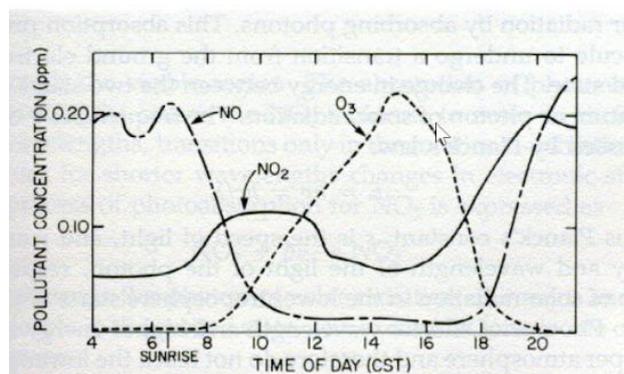


Figura 2.1- Representação gráfica da química da atmosfera.

Fonte: (Ferreira, 2020)

## 2.2 Qualidade do ar

### 2.2.1 Impactos na saúde, ambiente e materiais

Cerca de 400 000 mortes prematuras por ano são atribuídas à poluição atmosférica na Europa, tornando-se um dos maiores riscos de saúde ambiental. As causas mais frequentes de morte precoce ligadas à poluição atmosférica são doenças cardíacas e acidentes vasculares cerebrais (AVC), seguidas de doenças pulmonares e cancro do pulmão. A Agência da OMS, denominada Agência Internacional de Investigação sobre Cancro (IARC) designou o poluente PM, bem como a poluição atmosférica em geral como cancerígena (EEA, 2018).

Os efeitos da exposição aos poluentes atmosféricos estão dependentes de dois fatores principais: a sua concentração na atmosfera e o tempo de exposição. Isto quer dizer que as exposições prolongadas a concentrações baixas de um determinado poluente podem ser mais nocivas, do que exposições de curta duração, mas a concentrações elevadas. Os valores legislados para os vários poluentes definem-se para períodos distintos (ano, dia ou hora), pois os efeitos de cada poluente divergem, consoante o tempo de exposição (Nogueira & Mesquita, 2020).

Os efeitos associados aos poluentes dependem também de certos fatores de sensibilidade, tais como, a idade, estado de saúde e predisposições genéticas para determinadas doenças. Estes fatores determinam também a maior ou menor severidade dos efeitos dos poluentes, o que dificulta a avaliação destes. Os grupos de indivíduos para os quais os poluentes atmosféricos são mais nocivos são as crianças, grávidas, idosos e indivíduos com problemas respiratórios ou cardíacos, especialmente em situações de episódios de poluição (Nogueira & Mesquita, 2020).

As crianças e adultos expostos à poluição atmosférica durante períodos curtos e prolongados podem sofrer de diminuição da função pulmonar, infeções respiratórias e asma agravada. A exposição à poluição atmosférica ambiente entre mulheres grávidas está ligada a efeitos negativos na fecundidade, gravidez, recém-nascidos e crianças. Além disso, há evidências crescentes que ligam a exposição à

poluição atmosférica ao diabetes tipo 2 em adultos, obesidade, inflamação sistémica, envelhecimento, doença de *Alzheimer* e à demência (EEA, 2018).

A poluição atmosférica tem uma série de efeitos negativos significativos no ambiente, incluindo a capacidade de sobrevivência das plantas e dos animais, a qualidade dos solos e dos recursos hídricos e os serviços ecossistémicos que estes recursos proporcionam (EEA, 2018).

## **Monóxido de carbono**

### Impactos na saúde

Concentrações elevadas de CO podem levar à formação de carboxiemoglobina, que é um composto resultante da hemoglobina com o monóxido de carbono. Isto acontece, pois, o carbono apresenta uma afinidade com a hemoglobina 210 vezes superior à do oxigénio. Esta é uma condição que vai reduzindo o oxigénio transportado pela hemoglobina até aos tecidos, sendo que a transformação de 50% de hemoglobina em carboxiemoglobina pode conduzir à morte. A exposição a este poluente pode constituir um risco significativo, sobretudo para pessoas com problemas cardiovasculares. Não obstante, pessoas saudáveis podem também ser afetados, mas só após exposição a concentrações elevadas (Nogueira & Mesquita, 2020; Sgobba et al., 2022).

A exposição a concentrações elevadas de CO está associada à diminuição da perceção visual, capacidade de trabalho, destreza manual, capacidade de aprendizagem e desempenho de tarefas complexas. Os primeiros sintomas são normalmente as dores de cabeça e as vertigens, que se agravam com o aumento da concentração deste poluente, podendo depois observar-se náuseas, vómitos e dores no peito (para pessoas com doenças cardíacas). No caso de uma exposição prolongada, pode provocar o coma ou a morte (Nogueira & Mesquita, 2020).

O CO é também uma das principais causas de envenenamento não intencional, bem como de envenenamento suicida, causando anualmente muitas mortes por hipoxia (Sgobba et al., 2022). O risco para a saúde colocado pelos níveis de CO encontrados no ar ambiente é maior para aqueles que sofrem de doenças cardiovasculares, como a angina pectoris, não obstante disso, pode ser venenoso em níveis de exposição muito mais altos do que são geralmente encontrados no ar ambiente, e mesmo pessoas saudáveis podem ser afetadas (DEC NY, 2021).

### Impactos no ambiente

O CO intervém nos mecanismos de formação do O<sub>3</sub> troposférico. Na atmosfera, este gás transforma-se em NO<sub>2</sub>, contribuindo assim para o efeito de estufa (Nogueira & Mesquita, 2020)

## **Óxidos de azoto**

### Impactos na saúde

O NO<sub>2</sub> foi associado a 54 000 mortes prematuras entre os Estados membros da União Europeia, em 2018, de acordo com a EEA (Rodrigues et al., 2021). Este poluente aumenta a suscetibilidade a desenvolver problemas respiratórios (asma e infeções respiratórias), cardiometabólicos (eventos

isquémicos de doenças cardíacas, eventos coronários, eventos de AVC e diabetes) e ainda a mortalidade associada a problemas de circulação, respiratórios, cancro dos pulmões, doença cardíaca isquémica, acidente vascular cerebral e doença pulmonar obstrutiva crónica (Boogaard et al., 2022).

Em concentrações elevadas, pode provocar lesões, reversíveis ou irreversíveis que vão desde a irritação dos olhos e garganta até à afetação das vias respiratórias, provocando diminuição da capacidade respiratória, dores no peito, edema pulmonar e danos no sistema nervoso central e nos tecidos. Já o NO, não é considerado um poluente perigoso para as concentrações normalmente presentes na atmosfera. Alguns destes efeitos podem ser retardados, aparecendo algum tempo depois da exposição. De salientar que os grupos mais sensíveis são as crianças, os asmáticos e os indivíduos com bronquites crónicas, e que este poluente pode ainda, aumentar a reatividade a alérgenos de origem natural (DEC NY, 2021; Nogueira & Mesquita, 2020).

#### Impactos no ambiente

Em termos ambientais, o NO<sub>2</sub> contribui para a eutrofização e acidificação dos ecossistemas terrestres e aquáticos, e favorece ainda a formação de O<sub>3</sub> troposférico, principalmente durante períodos de forte insolação e temperaturas mais elevadas, como no verão. Além disso, a precipitação é associada a uma atmosfera instável, onde a dispersão dos poluentes é favorecida, assim como a sua deposição no solo e outras superfícies, reduzindo a sua concentração no ar (Farias et al., 2019).

#### Impactos nos materiais

Os problemas em meio urbano manifestam-se na deterioração de construções (Farias et al., 2019).

### **Partículas em suspensão**

#### Impactos na saúde

De acordo com a OMS a exposição à PM<sub>2.5</sub> causa milhões de mortes por ano em todo o mundo, sendo que na Europa, estudos realizados pela Agência Europeia do Ambiente (EEA) estimam que ocorreram 307 000 mortes devido a partículas finas, em 2019 - só mensurável pelo aumento da incidência de uma alargada gama de doenças respiratórias, cardiovasculares e cancerígenas, com efeitos a curto e longo prazo na saúde humana (EEA, 2022a).

A dimensão das partículas é inversamente proporcional com a probabilidade de penetrarem profundamente no aparelho respiratório, pelo que quanto menor a dimensão das partículas, maior o risco de induzirem efeitos negativos. Nesta ordem de ideias, as PM<sub>10</sub> e as PM<sub>2.5</sub> são as mais nocivas, pois penetram no aparelho respiratório, podendo as mais finas, PM<sub>2.5</sub> atingir os alvéolos pulmonares e interferir nas trocas gasosas (Nogueira & Mesquita, 2020).

A exposição crónica a partículas aumenta o risco de desenvolvimento de doenças respiratórias e cardiovasculares, assim como para o cancro de pulmão (Nogueira & Mesquita, 2020). Hoek et al. (2013) apresentou uma revisão da exposição a longo prazo à poluição atmosférica e os seus efeitos nas mortes cardiorrespiratórias. Os resultados indicaram que a exposição crónica às PM<sub>2.5</sub>, acima dos limites

recomendados pela OMS ( $10 \text{ g/m}^3$  - média anual), pode aumentar os riscos para doenças cardiovasculares em cerca de 11% (Fachinger et al., 2021; Rodrigues Teixeira et al., 2020).

De acordo com o relatório "*Revisão das provas sobre os aspetos sanitários da poluição atmosférica*" da OMS, a exposição a longo prazo a partículas finas pode também desencadear aterosclerose, com progressão desta patologia de alta relevância para doenças cardiovasculares, resultados adversos do nascimento (peso baixo no nascimento, parto prematuro e dimensões reduzidas para nascimentos em idade gestacional) e doenças respiratórias infantis (infecções respiratórias e asma)(WHO, 2013).

No que toca à exposição a curto prazo, vários estudos têm evidenciado o aumento significativo da mortalidade, morbidade e *end points* fisiológicos. Evidenciam também o aumento de internamentos hospitalares para uma variedade de doenças cardiovasculares, incluindo doenças cardíacas isquémicas, doenças cerebrovasculares e insuficiência cardíaca (EEA, 2013; WHO, 2013).

As partículas em suspensão são também consideradas um veículo de transporte para outros poluentes atmosféricos nocivos que se fixam na sua superfície, especialmente hidrocarbonetos e metais pesados. Estas substâncias acabam por ser muitas vezes transportadas até aos pulmões onde são depois potencialmente absorvidas para o sangue e tecidos (Nogueira & Mesquita, 2020).

#### Impactos no ambiente

Na atmosfera, a PM pode interferir no ciclo da água, em particular no que diz respeito à formação das nuvens, nevoeiros e precipitação. Adicionalmente, podem influenciar o clima, ao absorverem e difundirem a radiação solar. Uma vez que as partículas finas são da ordem de grandeza do comprimento de onda da luz visível, podem reduzir a visibilidade (Nogueira & Mesquita, 2020).

#### Impactos nos materiais

As partículas em suspensão são muitas vezes as responsáveis pela sujidade aparente nos edifícios e monumentos (Nogueira & Mesquita, 2020).

### **Ozono**

#### Impactos no ambiente

O ozono troposférico tem um efeito nocivo sobre a vegetação. Este limita a capacidade das plantas de absorver dióxido de carbono e reduz a sua capacidade de fotossíntese. Sucessivamente, dificulta o desenvolvimento e a reprodução das plantas, o que reduz o rendimento das culturas e atrasa o estabelecimento das florestas (EEA, 2013; Nogueira & Mesquita, 2020).

#### Impactos na saúde

O ozono troposférico está associado a 19 400 mortes prematuras pelos países da União Europeia (Rodrigues et al., 2021). Este é um gás agressivo para as mucosas oculares e respiratórias e, tal como outros oxidantes fotoquímicos, tem a capacidade de penetrar nas vias respiratórias profundas, afetando essencialmente os brônquios e os alvéolos pulmonares. Pode manifestar-se por irritações nos olhos, nariz e garganta, dores de cabeça e por problemas respiratórios, inclusive dificuldades em respirar, dores no peito e tosse. Adicionalmente pode também provocar o agravamento de patologias

respiratórias já existentes e reduzir a resistência a infeções respiratórias (DEC NY, 2021; Nogueira & Mesquita, 2020).

A exposição a curto prazo às concentrações diárias de ozono (média máxima de 1 hora ou 8 horas) tem sido associado a efeitos de mortalidade, devido a doenças cardiovasculares e respiratórias. No que toca à exposição prolongada, vários estudos sugerem um efeito na mortalidade, pelo menos para a respiração ou mortalidade cardiorrespiratória, especialmente em pessoas com potenciais condições de predisposição (EEA, 2022b; WHO, 2013). As pessoas mais vulneráveis aos efeitos apresentados anteriormente acabam por ser as crianças, que estão mais ativas no exterior durante o verão, os adultos que se dedicam a atividades ao ar livre e pessoas com distúrbios respiratórios pré-existentes (DEC NY, 2021).

Estes efeitos na saúde humana ocorrem, pois, o O<sub>3</sub> troposférico leva à inflamação brônquica e pulmonar. O corpo humano trabalha para impedir que o ozono entre nos pulmões após a exposição. Devido a esta reação, a inalação de oxigénio diminui, pelo que o coração tem de trabalhar mais e com uma menor quantidade de oxigénio presente. Deste modo, os episódios de O<sub>3</sub> elevado podem ser incapacitantes e até fatais para pacientes que já têm problemas cardiovasculares ou respiratórios como asma (EEA, 2013).

#### Impactos nos materiais

O ozono em concentrações elevadas tem a capacidade de corroer objetos, estruturas e seres vivos, bem como determinados materiais, como a borracha, têxteis e pinturas (EEA, 2013; Nogueira & Mesquita, 2020). Na Tabela 2.2, é possível observar um resumo dos impactes na saúde, ambiente e materiais, pelos respetivos poluentes atmosféricos.

Tabela 2.2-Resumo dos impactes na saúde, ambiente e materiais, pelos respetivos poluentes atmosféricos

Poluente	Efeitos		
	Ambiente/Atmosfera	Saúde humana	Materiais
CO	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contribui para o efeito de estufa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diminuição da perceção visual, capacidade de trabalho, destreza manual, capacidade de aprendizagem de desempenho de tarefas complexas</li> <li>Dores de cabeça</li> <li>Vertigens</li> <li>Náuseas e vómitos</li> <li>Coma ou morte</li> </ul>	
NO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eutrofização e acidificação dos ecossistemas</li> <li>Formação de ozono troposférico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Irritação dos olhos e garganta</li> <li>Afetação das vias respiratórias</li> <li>Diminuição da capacidade respiratória</li> <li>Dores no peito</li> <li>Edema pulmonar</li> <li>Danos no sistema nervoso central e nos tecidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deterioração de construções</li> </ul>
PM <sub>10</sub> e PM <sub>2.5</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Interfere no ciclo da água</li> <li>Reduz a visibilidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desenvolvimento de doenças respiratórias e cardiovasculares, cancro do pulmão</li> <li>Aumento da mortalidade e morbili-dade e <i>end-points</i> fisiológicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sujidade em edifícios e monumentos</li> </ul>
O <sub>3</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduz a capacidade de fotossíntese das plantas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desenvolvimento de doenças respiratórias e cardiovasculares</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Danos nas borrachas</li> <li>Dano nos edifícios</li> </ul>

## 2.2.2 Influência das condições meteorológicas

A qualidade do ar é resultado de um equilíbrio complexo entre as emissões diretas de poluentes para a atmosfera e vários processos de variabilidade dos fenómenos atmosféricos, aos quais os poluentes estão sujeitos — transformações químicas, deposição seca ou húmica, transporte e dispersão. Estes são influenciados tanto pela topografia local, como por fatores meteorológicos, tais como a radiação solar, a temperatura, o vento, a pressão atmosférica e a precipitação (Ferreira et al., 2017; Nogueira & Mesquita, 2017).

Estes fenómenos atmosféricos desempenham um papel predominante nos processos de transporte e dispersão dos poluentes na atmosfera, pelo que os níveis de poluição podem variar significativamente de um dia para o outro, mesmo que a quantidade de poluentes emitidos seja similar,

dependendo das condições meteorológicas mais ou menos favoráveis à dispersão dos poluentes (CCDR LVT et al., 2017).

### **Radiação solar**

A radiação solar forte, que normalmente está associada a temperaturas elevadas, contribui para a formação de poluentes fotoquímicos, como por exemplo o O<sub>3</sub> (Nogueira & Mesquita, 2017).

### **Pressão atmosférica**

As situações de altas pressões (anticiclone), são caracterizadas por vento fraco e pela estabilidade do ar, que dificulta a dispersão dos poluentes, fazendo com que estes se concentrem junto ao solo. Já as situações de baixas pressões, correspondem normalmente a uma grande turbulência da atmosfera, favorecendo a dispersão dos poluentes (Nogueira & Mesquita, 2017).

### **Temperatura**

A temperatura desempenha um papel importante na dispersão vertical na atmosfera dos poluentes, bem como na química dos poluentes. Temperaturas mais elevadas, por exemplo no verão, favorecem a formação de O<sub>3</sub>, uma vez que estão associadas a altas pressões e a condições de estabilidade, que bloqueiam a mistura vertical dos gases. Diferenças de temperatura entre o dia e a noite, por exemplo no inverno, podem provocar o fenômeno de inversão térmica e sucessivamente, picos de poluição (Nogueira & Mesquita, 2017).

### **Vento**

Em termos de dispersão dos poluentes, o vento é um fator meteorológico determinante, com efeitos diretos. A produção de turbulência mecânica, que é responsável pela dispersão local, é determinada pela velocidade do vento, sendo que a má qualidade do ar urbano está associada a condições de baixa velocidade do vento (Hanna et al., 2003). Já a ausência do vento, favorece a concentração de poluentes, e situações de vento moderado favorecem a sua dispersão. Não obstante, o vento forte pode provocar um efeito de penacho, e sucessivamente, poluição localizada na direção dos ventos dominantes (Nogueira & Mesquita, 2017).

### **Precipitação**

A precipitação está normalmente associada a condições de atmosfera instável, o que favorece uma boa dispersão dos poluentes atmosféricos. Os poluentes gasosos e as partículas são solubilizados pelas gotas da chuva, o que provoca a sua deposição sobre o solo e outras superfícies, e sucessivamente, diminui as concentrações no ar ambiente (Nogueira & Mesquita, 2017).

## 2.3 Enquadramento legislativo relativo à proteção da saúde humana

A União Europeia (UE), nas últimas décadas, tem vindo a adotar um conjunto de medidas legislativas, com o principal objetivo de reduzir os impactos negativos da poluição atmosférica no ambiente e na saúde humana, através do controle e redução das emissões de poluentes e da definição de objetivos e normas de qualidade do ar (EEA, 2018; Ferreira et al., 2017).

Em 1996, a UE lançou o que seria o pilar da política europeia de qualidade do ar: a Diretiva Quadro 96/62/CE. Esta diretiva surgiu da necessidade de atualizar a versão do quadro legislativo comunitário existente na altura, e de introduzir regulamentação para poluentes que não eram regulados até então. De forma geral, veio definir os princípios de base de uma estratégia comum para a gestão da qualidade do ar ambiente. Esta Diretiva, teve quatro diretivas-filhas(EUR-Lex, 1996):

- 1ª Diretiva-Filha, Diretiva 1999/30/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho de 22 de abril de 1999, relativa a valores-limite para o SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, e NO<sub>x</sub>, PM e chumbo no ar ambiente (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, Pb)(EUR-Lex, 1999);
- 2ª Diretiva-Filha, Diretiva 2000/69/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de novembro de 2000, relativa a valores-limite para o benzeno e o monóxido de carbono no ar ambiente (CO, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)(EUR-Lex, 2000);
- 3ª Diretiva-Filha, Diretiva 2002/03/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 12 de fevereiro de 2002, relativa a valores-limite para o ozono no ar ambiente (O<sub>3</sub>);
- 4ª Diretiva-Filha, Diretiva 2004/107/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 15 de dezembro de 2004, relativa ao arsénio, ao cádmio, ao mercúrio, ao níquel e aos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos no ar ambiente (As Cd Ni Hg HAP) (EUR-Lex, 2004).

Em 2008, a Diretiva Quadro 96/62/CE foi revista, tendo surgido a Diretiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 21 de maio de 2008, também conhecida como "Diretiva CAFE- *Clean Air For Europe*", relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa. Esta Diretiva concentra num único ato legislativo, as disposições legais da Diretiva 96/62/CE e das 3 primeiras diretivas-filhas. Além disso, definiu normas e objetivos de qualidade do ar para o O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, e um conjunto de outros poluentes. Estas normas foram baseadas tendo em conta as normas, orientações e programas da Organização Mundial da Saúde. Adicionalmente exigiu que os Estados-Membros adotem e implementem planos de qualidade do ar e cumpram as normas a fim de proteger a saúde humana e o ambiente(EUR-Lex, 2008; Ferreira et al., 2017).

No plano nacional, e seguindo de perto as políticas comunitárias, têm sido empregues esforços de prevenção e controlo das emissões, quer por via de instrumentos normativos, quer pela implementação de vários planos e programas, como o Programa dos Tetos de Emissão Nacional, o Plano de

Redução das Grandes Instalações de Combustão, os Planos de Melhoria da Qualidade do Ar e o Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC)(DRE, 2016).

No que concerne a qualidade do ar, foram estabelecidos objetivos destinados a evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos para a saúde humana e para o ambiente, os quais se encontram vertidos no Decreto-Lei nº 102/2010, de 23 de setembro, que procedeu à transposição para a ordem jurídica portuguesa da Diretiva 2008/50/CE, agregando também a Diretiva 2004/107/CE. Este Decreto-Lei estabelece o regime da avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente e fixa os objetivos para a qualidade do ar ambiente, tendo em conta as normas, as orientações e os programas da OMS, destinados a evitar, prevenir ou reduzir as emissões de poluentes atmosféricos. Este define também os procedimentos para a avaliação da qualidade do ar nas unidades de gestão e avaliação, que estão estabelecidas para esse efeito (zonas e aglomerações), transmitindo especial atenção às medidas de controlo e garantia de qualidade das medições (DRE, 2010; Nogueira & Mesquita, 2017).

O referido diploma atribui competências de avaliação e de gestão da qualidade do ar e de garantia das medições às Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR), ficando definido que, na respetiva área de competência territorial, a manutenção e gestão da sua rede de monitorização, assim como a elaboração, promoção, aplicação e acompanhamento da execução dos planos de melhoria da qualidade do ar (Nogueira & Mesquita, 2017)

Através da publicação do Decreto-Lei nº 102/2010, todo o quadro legislativo em vigor desde a publicação do Decreto-Lei n.º 276/99, de 23 de julho foi revogado, e todo o regime jurídico relativo à avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente, que se encontrava disperso por diversos Diplomas, foi consolidado num único. Este Decreto-Lei foi alterado em 2015, pelo Decreto-Lei nº 43/2015, de 27 de março, com vista a melhor traduzir os princípios e objetivos insitos na Diretiva n.º 2008/50/CE e visando a adaptação às regras respeitantes ao intercâmbio recíproco e à comunicação de informação sobre a qualidade do ar ambiente estabelecidas pela Decisão de Execução da Comissão n.º 2011/850/UE, de 12 de dezembro de 2011. Este Decreto-Lei foi posteriormente alterado e republicado através do Decreto-Lei nº 47/2017, de 10 de maio, que atualiza e clarifica os objetivos de qualidade dos dados, transpondo a Diretiva 2015/1480/CE, de 28 de agosto, que altera vários anexos das Diretivas 2004/107/CE e 2008/50/CE, 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 (DRE, 2015, 2017; Ferreira et al., 2017).

Estando a Comissão Europeia (CE) ciente das medidas ainda necessárias para reduzir a emissão de poluentes e atingir a melhoria desejada de qualidade do ar, após análise da política europeia para o ar, apresentou em dezembro de 2013, uma estratégia designada "Programa Ar Limpo para a Europa". Esta estratégia visou o pleno cumprimento das normas existentes em matéria de qualidade do ar até ao ano de 2020, bem como a criação de condições para a União Europeia (UE) atingir o objetivo a longo prazo de não exceder os valores-guia para a saúde humana da OMS, nem as cargas e níveis críticos que definem os limites de tolerância dos ecossistemas(Comissão Europeia, 2013; DRE, 2016).

A Estratégia Nacional para a Qualidade do Ar (ENAR 2020), visou alcançar os objetivos de qualidade do ar propostos no Programa Ar Limpo para a Europa e contribuir para o cumprimento das metas nacionais, estando também alinhada com os instrumentos nacionais da política climática. Com as atuais políticas da UE para a qualidade do ar, tornou-se evidente a necessidade de estabelecer uma abordagem integrada e articulada com políticas e medidas ao nível setorial e entre os diversos níveis de governação. Para isto, foi criada a ENAR2020, com o objetivo de garantir uma coerência e coesão entre as políticas e medidas relativas às emissões e qualidade do ar, com vista à redução dos impactes na saúde e nos ecossistemas. Esta estratégia assenta em três eixos principais: avaliar, antecipar e atuar, como intenção de melhorar a qualidade do ar procurando garantir em particular a proteção da saúde humana, e a proteção dos ecossistemas(DRE, 2016).

A Figura 2.2 apresenta a síntese da evolução das várias revisões da legislação à escala europeia e nacional, no que toca à qualidade do ar, desde a Diretiva Quadro 96/62/CE.

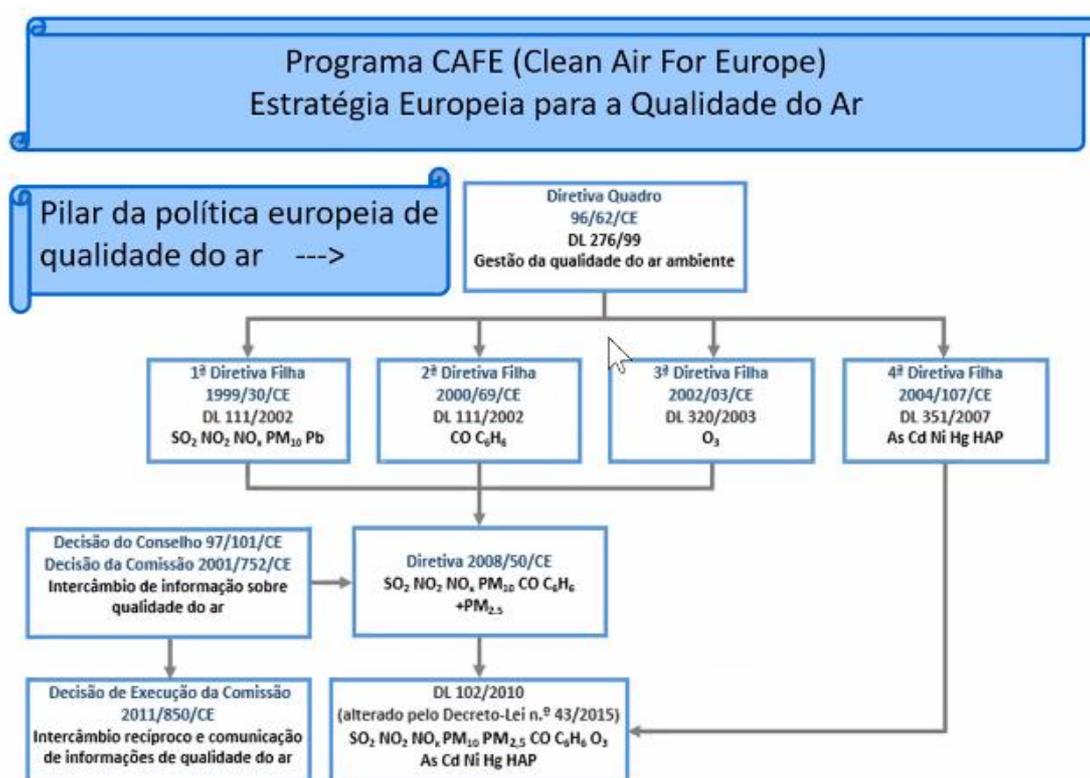


Figura 2.2- Esquema representativo do enquadramento legislativo no âmbito da gestão da qualidade do ar ambiente na UE e em Portugal.

Adaptado de: (Nogueira & Mesquita, 2017)

Com o objetivo de caracterizar os níveis de qualidade do ar, a grande parte destas Diretivas e Decretos-Lei estabelecem parâmetros a avaliar e monitorizar. Na Tabela 2.3 são apresentados os requisitos legais para os poluentes que serão estudados ao longo desta dissertação, regulamentados pelo Decreto-Lei nº 102/2010, com o objetivo da proteção humana.

Tabela 2.3- Valores dos requisitos legais para os poluentes que serão estudados ao longo desta dissertação, regulamentados pelo Decreto-Lei nº 102/2010, com o objetivo da proteção humana

Poluente	Tipo de objetivo ambiental	Período de referência das avaliações	Unidades do objetivo ambiental	Valores numéricos do objetivo ambiental (número de excedências autorizadas)	
NO <sub>2</sub>	Valor limite <sup>1</sup>	Uma hora	Horas de excedência num ano civil	200 µg/m <sup>3</sup> , a não exceder mais de 18 vezes por ano civil.	
		Ano civil	Média anual	40 µg/m <sup>3</sup>	
	Limiar de alerta <sup>2</sup>	Uma hora	A medir em três horas consecutivas, em localizações representativas da qualidade do ar ambiente	400 µg/m <sup>3</sup>	
CO	Valor limite	Média máxima por períodos de 8 horas	Dias em que a média diária máxima de 8 horas ultrapassou o VL	10 mg/m <sup>3</sup>	
PM <sub>10</sub>	Valor limite	Um dia	Dias de excedência num ano civil	50 µg/m <sup>3</sup> , a não exceder mais de 35 vezes por ano civil	
		Um ano civil	Média anual	40 µg/m <sup>3</sup>	
PM <sub>2,5</sub>	Valor limite	Um dia	Dias de excedência num ano civil	25 µg/m <sup>3</sup>	
		Um ano civil	Média anual	20 µg/m <sup>3</sup>	
O <sub>3</sub>	Valor alvo <sup>3</sup>	Média máxima por períodos de 8 horas	Dias em que a média diária máxima de 8 horas ultrapassou o valor de referência médio ao longo de 3 anos	120 µg/m <sup>3</sup> , a não exceder mais de 25 vezes	
		Objetivo a longo prazo <sup>4</sup>	Dias em que a média diária máxima de 8 horas ultrapassou o objetivo a longo prazo num ano civil	120 µg/m <sup>3</sup> , a não exceder mais de 25 vezes	
	Limiar de Informação <sup>5</sup>	Uma hora		Horas de excedência num ano civil	180 µg/m <sup>3</sup>
				Limiar Alerta <sup>6</sup>	240 µg/m <sup>3</sup>

<sup>1</sup> VL

<sup>2</sup> LAlerta

<sup>3</sup> VA

<sup>4</sup> OLP

<sup>5</sup> LInfo

<sup>6</sup> LAlerta

## 2.4 Monitorização da qualidade do ar

### 2.4.1 Rede de estações de monitorização da qualidade do ar

#### Zonas para avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente

As zonas e as aglomerações são as unidades funcionais de avaliação e gestão da qualidade do ar, em todo o território nacional. No Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro, define-se uma "**aglomeração**" como uma zona que constitui uma conurbação caracterizada por um número de habitantes superior a 250 000 — ou em que o número de habitantes se situe entre os 250 000 e os 50 000 habitantes — e tenha uma densidade populacional superior a 500 habitantes/km<sup>2</sup>. Uma "**Zona**", é definida como a área geográfica de características homogéneas, em termos de qualidade do ar, ocupação de solo e densidade populacional delimitada para fins de avaliação e gestão da qualidade do ar (DRE, 2010).

Atualmente, Portugal é constituído por 20 zonas, sendo que 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 (DRE, 2010).

#### Técnicas de avaliação da qualidade do ar ambiente

Tendo em conta a legislação nacional, Decreto-Lei nº 102/2010, a monitorização da qualidade do ar pode ser efetuada através de uma ou mais técnicas de avaliação:

- **Medições fixas**, utilizando métodos de referência ou equivalentes. São "medições efetuadas num local fixo, quer de modo contínuo quer por amostragem aleatória, a fim de determinar os níveis de acordo com os objetivos de qualidade dos dados"(DRE, 2010);
- **Medições indicativas**, são medições" que respeitam objetivos de qualidade dos dados menos rigorosos do que os definidos para as medições fixas"(DRE, 2010);
- **Modelação**, isto é " uma técnica de simulação dos fenómenos que ocorrem na natureza, que permite estimar a concentração dos poluentes num conjunto de pontos com base num conjunto de variáveis que a influenciam"(DRE, 2010);
- **Estimativas objetivas**, isto é, " métodos de avaliação que permitem estimar concentrações respeitando objetivos de qualidade menos rigorosos que a modelação" (DRE, 2010).

O capítulo II, Artigo 6º, ponto 3 do Decreto-Lei nº47/2017, menciona que as medições indicativas, os modelos e as estimativas objetivas podem ser utilizadas como suporte na delimitação das zonas, definidas no âmbito da avaliação da qualidade do ar ambiente e como avaliação complementar da qualidade do ar ambiente nas zonas e aglomerações (DRE, 2017).

Neste Decreto-Lei está também disposto que os regimes de avaliação da qualidade do ar ambiente para os poluentes: CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> e PM<sub>10</sub>, benzeno e chumbo devem ser estabelecidos com base

na comparação dos níveis de qualidade do ar, nas zonas e aglomerações, dos últimos 5 anos, tendo em conta os limiares inferiores e superiores de avaliação (LIA e LSA), que estão associados aos valores limite destes poluentes. É considerado que uma dada zona está a ultrapassar um determinado limiar se este for ultrapassado em 3 ou mais dos últimos 5 anos (CCDR LVT, 2022a; DRE, 2010).

É importante referir que o Decreto-Lei 102/2010 define eficiências de recolha de dados para assegurar a sua validade. A eficiência exigida para garantir a validade dos dados no cálculo dos parâmetros estatísticos, bem como os respetivos critérios de validação relativos à recolha de dados e cálculo de parâmetros estatísticos, estão referidos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4- Objetivos de qualidade dos dados para a avaliação no ar ambiente dos poluentes NO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> e O<sub>3</sub>, com base no Decreto-Lei nº 102/2010 de 23 de setembro, para as medições fixas, indicativas e estimativas objetivas.

Parâmetro	Incerteza			Taxa mínima de recolha de dados		Período mínimo de amostragem	
	Medições fixas	Medições indicativas	Estimativas objetivas	Medições fixas	Medições indicativas	Medições fixas	Medições indicativas
NO <sub>2</sub> e CO	15%	25%	75%	90%	90%	-	14% <sup>7</sup>
PM <sub>10</sub> e PM <sub>2.5</sub>	25%	50%	100%	90%	90%	-	14%
O <sub>3</sub>	15%	30%	75%	90% no Verão 75% no Inverno	90%	-	>10% no Verão

Adaptado de: (DRE, 2010)

O tratamento de dados e a análise realizada ao longo deste trabalho terá em consideração todo o enquadramento legal apresentado.

### Rede de monitorização nacional

Portugal encontra-se dotado com redes de monitorização fixa, providas de estações, para a devida avaliação da qualidade do ar ambiente. Estas estações são na sua grande parte geridas pelas CCDR (APA, 2022c).

Os locais de medição são colocados de modo a garantir um conjunto de requisitos, com o objetivo de garantir a representatividade nas diferentes zonas. Adicionalmente, obedecem a um conjunto de critérios de microlocalização (APA, 2022c).

Para que haja uma uniformidade e coerência da recolha de dados, estão estabelecidos objetivos e requisitos base de qualidade dos dados. As estações da qualidade do ar (QA) classificam-se de acordo com o ambiente em que estão inseridas e a influência a que estão sujeitas. De acordo com o ambiente

<sup>7</sup> Uma medição aleatória por semana, repartida de modo uniforme ao longo do ano, ou oito semanas repartidas de modo uniforme ao longo do ano (DRE, 2010)

podem ser denominadas como rurais, urbanas e suburbanas. De acordo com a sua influência, isto é, a fonte dominante de emissão de poluentes nessa localização, podem ser designadas como estações de tráfego, de fundo e industriais — consoante o caso. Deste modo, representam os tipos de exposição da população aos vários poluentes, sendo que para cada tipologia estão associados os referidos critérios de microlocalização (Tabela 2.5).

As **estações de tráfego** monitorizam a qualidade do ar resultante das emissões diretas do tráfego automóvel, com o objetivo de conhecer as concentrações máximas dos poluentes resultantes, a que a população está exposta. Estas estão predominantemente localizadas próxima de vias de tráfego intenso (APA, 2022c; Rodrigues, 2013).

As **estações de fundo** monitorizam a qualidade do ar a que qualquer cidadão, mesmo que viva longe de fontes de emissão está sujeito, com o principal objetivo de avaliar a exposição média da população a concentrações de fundo. Estas localizam-se predominantemente fora da influência direta de vias de tráfego ou de qualquer fonte próxima de poluição (APA, 2022c; A. Rodrigues, 2013).

As **estações industriais**, monitorizam a qualidade do ar resultante das emissões diretas da indústria, com o principal objetivo de avaliar as concentrações máximas de determinados poluentes. Estas localizam-se próximas de zonas industriais (APA, 2022c; A. Rodrigues, 2013).

Nas estações de monitorização, são medidos poluentes atmosféricos para os quais a regulamentação nacional e comunitária define níveis de concentração que não devem ser ultrapassados: CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> e COV (CCDR LVT, 2022a).

Tabela 2.5- Tipo de estação quanto à influência e ambiente.

Classificação	Tipo	Descrição
Ambiente	Urbana	Localizadas em ambientes urbanos
	Suburbana	Localizadas nas periferias das cidades
	Rural	Localizadas em ambientes rurais
Influência	Tráfego	Monitorizam a QA que resulta das emissões diretas do tráfego automóvel.
	Industrial	Monitorizam a QA que resulta das emissões diretas da indústria.
	Fundo	Não monitorizam a QA que resulta das emissões dietas de nenhuma fonte em particular. Representam a poluição a que qualquer indivíduo, mesmo que viva longe de fontes de emissão está sujeito.

Adaptado de: (DRE, 2010)

A presença de diferentes tipos de estações a operar na mesma rede de monitorização de qualidade do ar (RMQAr) permite uma avaliação a diferentes escalas, o que simplifica a avaliação e gestão da qualidade do ar.

A atual RMQAr compreende todo o território nacional e conta com 70 estações, com equipamentos de medição de concentrações de poluentes atmosféricos em contínuo. Não obstante disso, esta

rede de monitorização não possibilita caracterizar em detalhe e rigor, a qualidade do ar em todo o território nacional, em especial nos grandes aglomerados populacionais, como por exemplo em Lisboa, onde se verifica uma grande variedade de situações microclimáticas e configurações espaciais. Reflete-se assim numa avaliação da qualidade do ar muito incompleta e insuficiente, quando se recorre apenas a este tipo de monitorização, como instrumento de avaliação da qualidade do ar ambiente (Amorim, 2015).

### **Sistema de monitorização e de divulgação da informação**

As estações estão equipadas com um dispositivo de amostragem que recolhe o ar exterior para o interior da estação onde é distribuído por diversos analisadores que, de forma contínua e automática, medem e determinam a concentração dos poluentes atmosféricos em "tempo real". As concentrações dos poluentes são determinadas através das características óticas ou através das propriedades físicas dos poluentes em monitorização seja através da fluorescência de UV — no caso do dióxido de enxofre e quimiluminescência — para os óxidos de azoto, por exemplo (APA, 2022c; CCDR LVT, 2022a).

Cada analisador disponível, emite de forma contínua um sinal elétrico que é proporcional à concentração do poluente medido. Os valores instantâneos obtidos são integrados em médias de quinze em quinze minutos (quarto de hora) e são armazenados temporariamente no equipamento. De hora a hora, estes são enviados através da rede de banda larga móvel (GPRS), para um servidor que está localizado nas CCDR e nas direções regionais de ambiente (DRA) das Regiões Autónomas, que os envia para a base de dados QualAr. A CCDR respetiva centraliza todos os dados numa base de dados relacional, com toda a informação das estações. Estes dados sofrem uma primeira validação automática efetuada pela aplicação ATMIS (Sistema de recolha e processamento de dados de qualidade do ar da rede de monitorização oficial nacional, incluindo das estações de monitorização automáticas utilizadas nesta dissertação, geridas pela CCDR LVT). Após esta validação, a informação é validada por um operador da rede de medição de qualidade do ar. Os dados recolhidos são também analisados pelo operador da rede, com o objetivo de verificar situações de excedência aos limiares de informação e de alerta definidos para os diversos poluentes medidos, ocorrências divulgadas ao público. Todos os dias estes dados são disponibilizados na base de dados nacional QualAr, sob a forma de concentrações médias horárias e de um índice de qualidade do ar para as diversas zonas, que será explicado na secção abaixo. Esta informação é atualizada várias vezes ao dia (APA, 2022c; CCDR LVT, 2022a; A. Rodrigues, 2013).

### **Métodos de referência e métodos equivalentes**

As abordagens mais convencionais para monitorizar a qualidade do ar baseiam-se em medições realizadas em estações de monitorização fixas, que são obrigadas a utilizar métodos de medição de referência, cumprindo os devidos requisitos estabelecidos nos instrumentos legais. No Decreto-Lei nº 102/2010 de 23 de setembro são descritos os métodos de medição de referência que devem ser

utilizados, sendo que, podem ser utilizados métodos alternativos de medição, desde que sejam aprovados pela APA, e que seja demonstrada a equivalência com o método de equivalência que está a ser substituído (DRE, 2010).

As medições efetuadas devem ser padronizadas, para que os dados obtidos sejam comparáveis e que tenham qualidade necessária para validação de modelos atmosféricos, analisar tendências e efetuar outras avaliações estatísticas, bem como assegurar a troca de informação com as entidades da UE. Durante a monitorização, os procedimentos de qualidade devem ser assegurados para garantir que as concentrações obtidas cumprem os requisitos de incerteza máxima fixados pela Diretiva nº 2008/50/CE (EUR-Lex, 2008).

Na legislação portuguesa estão definidos os métodos de referência para avaliação das concentrações no ar ambiente e respetivas taxas de deposição. Na Tabela 2.6, encontram-se apresentados os métodos de referência aplicáveis aos poluentes monitorizados no âmbito desta dissertação.

Tabela 2.6- Métodos de referência aplicáveis aos poluentes monitorizados na presente dissertação, princípios, gamas de medição e referências bibliográficas

Poluente	Método de referência	Princípio de medição	Gama de medição	Referências bibliográficas
CO	Fotometria de infravermelhos- método descrito na norma EN 14626:2012 " <i>Ambient air - Standard method for the measurement of the concentration of carbon monoxide by non-dispersive infrared spectroscopy</i> ".	A concentração de CO no ar é medida utilizando técnicas de infravermelhos não dispersivas. De acordo com a lei LambertBeer, a atenuação da luz infravermelha que viaja através de uma célula de amostra é uma medida da concentração de CO na célula.	0-100 mg/m <sup>3</sup> mg/m	(DRE, 2017; SIST, 2012b)
NO <sub>2</sub>	Quimiluminescência - método descrito na norma EN 14211:2012 " <i>Ambient air quality - Standard method for the measurement of the concentration of nitrogen dioxide and nitrogen monoxide by chemiluminescence</i> ".	A interação do monóxido de azoto com o ozono sustenta a Quimiluminescência. Num analisador de quimiluminescência, o ar é recolhido e é fornecido a um caudal consistente na câmara de reação do analisador, onde é processado, apenas para a medição do NO, quando combinado com um excesso de O <sub>3</sub>	0-500 µg/m <sup>3</sup>	(DRE, 2017; SIST, 2012a)
PM <sub>10</sub> e PM <sub>2,5</sub>	Método gravimétrico- descrito na norma EN 12341:2014 " <i>Ambient air - Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM<sub>10</sub> or PM<sub>2,5</sub> mass concentration of suspended particulate</i> "	O método gravimétrico é baseado na amostragem de matéria particulada por gravimetria, em filtros, e posterior pesagem recorrendo a uma balança.	1-150 µg/m <sup>3</sup>	(DRE, 2017; SIST, 2014)
O <sub>3</sub>	Método descrito na norma EN 14625:2012 " <i>Ambient air - Standard method for the measurement of the concentration of ozone by ultraviolet photometry</i> ."	A absorção UV do ozono é medida alimentando alternadamente a célula de absorção com ar amostrado contendo o O <sub>3</sub> e ar amostrado sem O <sub>3</sub> .	0-500 µg/m <sup>3</sup>	(DRE, 2017; SIST, 2012b)

#### **2.4.1.1 Índice de Qualidade do Ar (IQualAr)**

O índice de qualidade do ar permite compreender, através de uma forma simples e acessível, qual é o estado da qualidade do ar, e deste modo, procurar adequar as ações e medidas que devem ser tomadas, na ótica da proteção da saúde humana, com enfoque nos grupos mais sensíveis da população (crianças, idosos e pessoas com problemas respiratórios) (QualAr, 2022).

Como explicado anteriormente, a legislação da UE, através da Diretiva 2008/50/CE estabelece os valores limite e os limiares de informação e alerta para os diversos níveis de qualidade do ar, a curto prazo (por hora/diário) e a longo prazo (anuais) — relativamente aos poluentes mais impactantes na saúde humana. Uma vez que os valores limite para os níveis de longo prazo são mais restritivos, relativamente aos de curto prazo, o índice indica apenas o estado da qualidade do ar a curto prazo (QualAr, 2022).

Como mencionado acima, o índice QualAr é determinado diariamente, tendo por base os dados obtidos nas estações de qualidade do ar — que são geridas pelas CCDR no continente e pelas DRAs nas regiões autónomas dos Açores e da Madeira (QualAr, 2022).

#### Método de cálculo

O cálculo deste índice é efetuado tendo por base as médias aritméticas dos poluentes medidos nas estações de qualidade do ar, de acordo com os critérios:

- Para zonas, é obrigatório a medição dos poluentes  $O_3$  e  $PM_{10}$  ou  $PM_{2.5}$ ;
- Para aglomerações, é obrigatória a medição dos poluentes  $NO_2$  e  $PM_{10}$  ou  $PM_{2.5}$ .

As seguintes condições (Figura 2.3) devem ser verificadas antes de o índice ser calculado, dependendo se é feito para o dia atual (Corrente) ou para um dia que não seja o mesmo dia (Histórico) (QualAr, 2022):

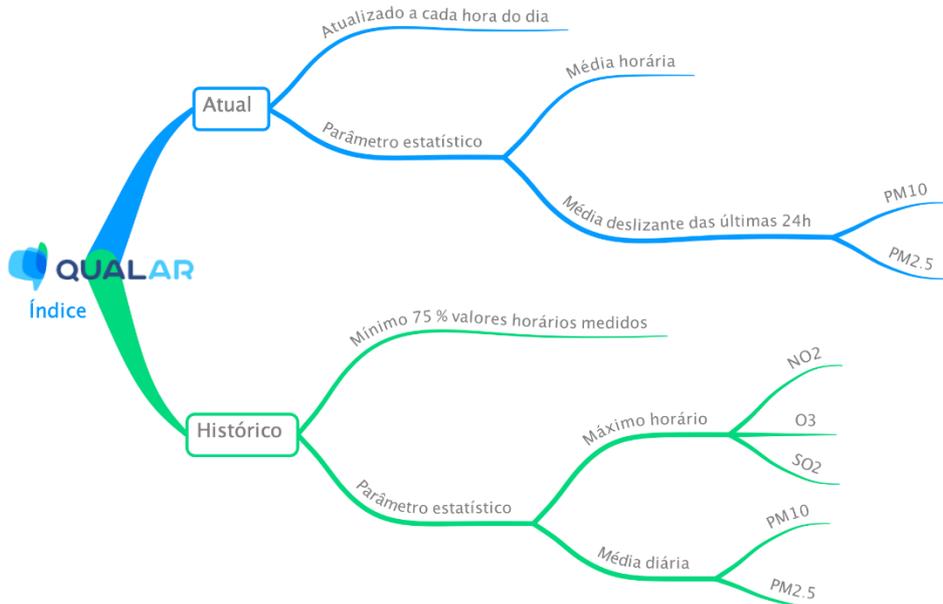


Figura 2.3- Condições de verificação para o cálculo do índice QualAr

Fonte: (QualAr, 2022)

A classificação do índice QualAr está disponível em dois níveis de informação e apresentado em dois níveis distintos:

- Para cada estação- o índice QualAr é determinado globalmente e por poluente.
  - Quando é globalmente, o índice resulta do pior resultado verificado para os poluentes que são monitorizados na respetiva estação. A Figura 2.4 apresenta um exemplo desta visualização do índice QualAr (QualAr, 2022);
  - Quando é por poluente, para o próprio dia, o índice é calculado para cada poluente (NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> e PM<sub>2.5</sub>) e resulta da comparação dos valores médios medidos mais recentes, com a gama de concentrações associadas a uma escala de cores; no caso dos dias diferentes do próprio dia, o índice QualAr resulta da concentração mais elevada obtida relativamente a cada poluente.

A Figura 2.4 apresenta um exemplo desta visualização do índice QualAr (QualAr, 2022);

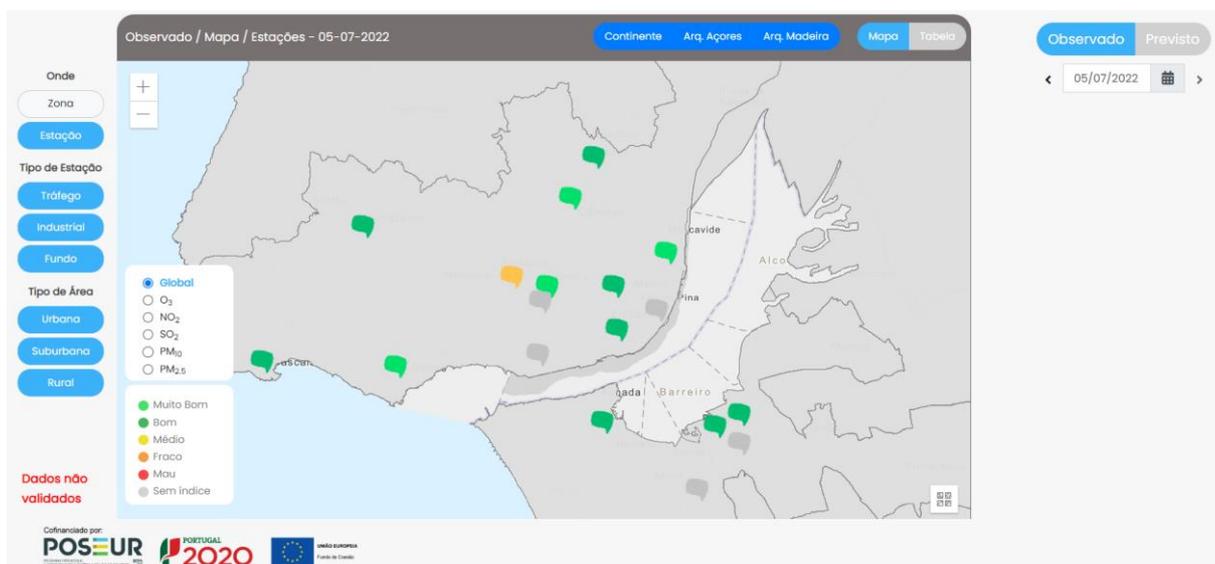


Figura 2.4- Exemplo de visualização do mapa global do índice QualAr, por estações, no dia 05/07/2022.

Fonte: (QualAr, 2022)

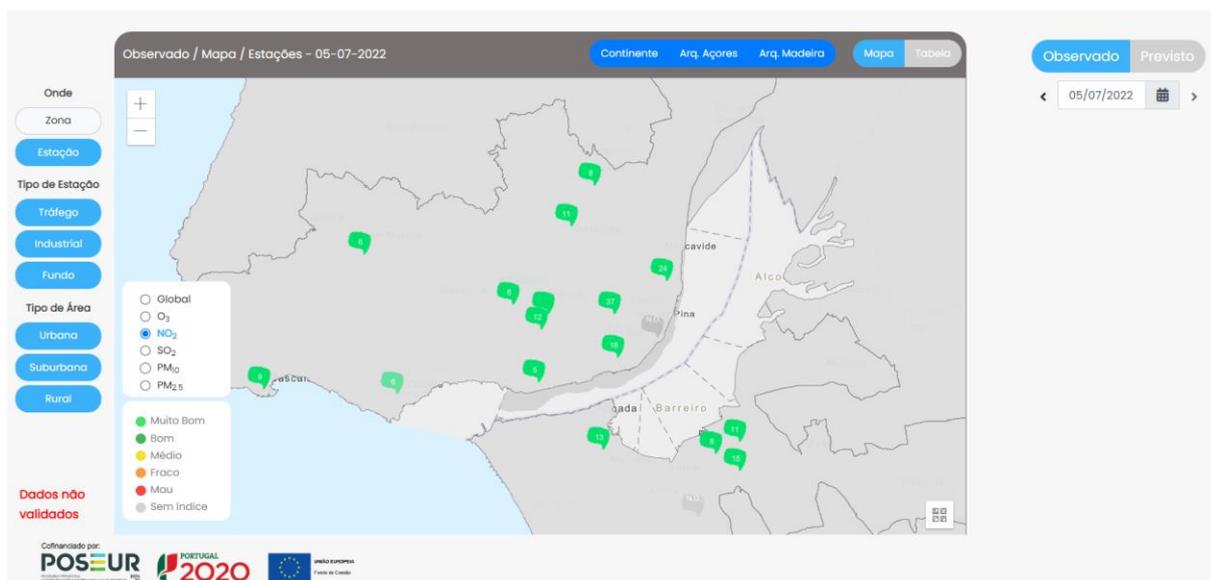


Figura 2.5- Exemplo de visualização do mapa do índice QualAr por estações, para o NO<sub>2</sub>, no dia 05/07/2022.

Fonte:(QualAr, 2022)

- Para a zona/aglomeração- o índice global de cada área resulta do pior resultado verificado para os poluentes que são monitorizados nas estações existentes. Deste modo, os poluentes com as concentrações mais elevadas são os que definem o índice QualAr. A Figura 2.6 apresenta um exemplo desta visualização do índice QualAr (QualAr, 2022).

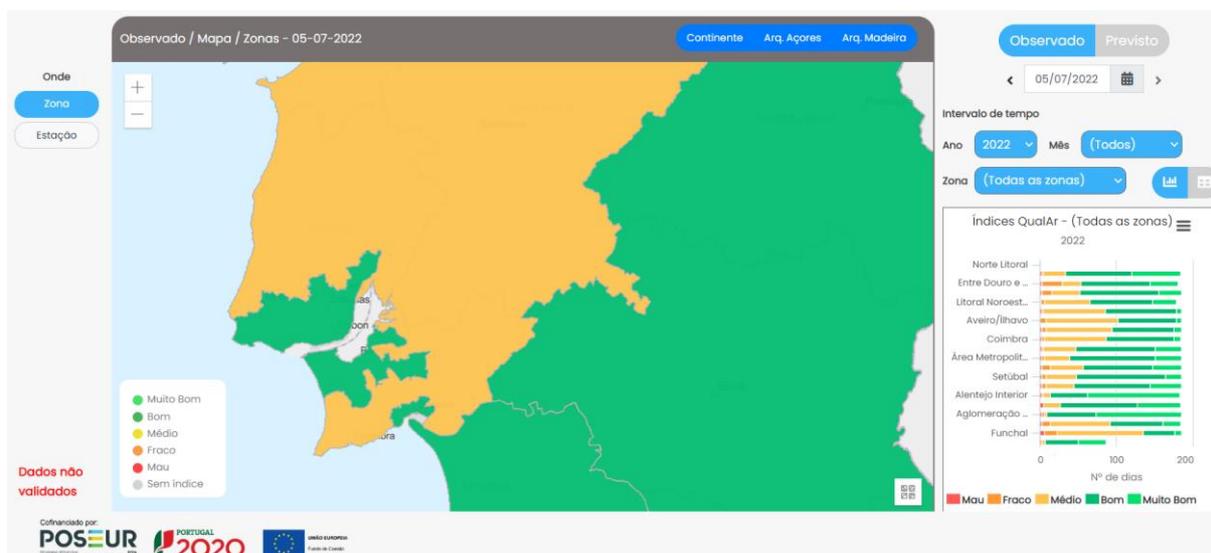


Figura 2.6- Exemplo de visualização do mapa do índice QualAr, por zona/aglomeração, no dia 05/07/2022.

Fonte:(QualAr, 2022)

As localizações das estações de qualidade do ar são indicadas no mapa pelos "balões". A tonalidade atribuída reflete o índice QualAr observado, permitindo a identificação ao nível da estação da situação de qualidade do ar.

As cores podem apresentar três variações:

- Cor cinzenta, caso não existam dados suficientes para o cálculo do índice;
- Cor com transparência, caso o índice esteja a ser calculado com dados medidos há mais de três horas;
- Cor sólida, caso existam dados suficientes para o cálculo do índice, sendo que "para o dia de hoje" significa que os dados foram medidos nas últimas três horas.

### Classes do índice

De acordo com a matriz de classificação da QualAr, o índice de qualidade do ar varia de Muito Bom a Mau para cada poluente, como é possível verificar na Tabela 2.7.

Tabela 2.7- Classes do índice QualAr.

Classificação	PM10	PM2.5	NO2	O3	SO2
Muito Bom	0-20	0-10	0-40	0-80	0-100
Bom	21-35	11-20	41-100	81-100	101-200
Médio	36-50	21-25	101-200	101-180	201-350
Fraco	51-100	26-50	201-400	181-240	351-500
Mau	101-1200	51-800	401-1000	241-600	501-1250

Nota: Os intervalos das classes são expressos em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

## 2.4.2 Sensores de baixo custo

Os avanços e reduções dos microprocessadores, o aumento da disponibilidade comercial da tecnologia e os avanços na Internet das Coisas (IoT na sigla em inglês para *Internet of Things*), iniciaram uma nova era na monitorização ambiental, contribuindo para uma rápida adoção dos sensores de baixo custo para a monitorização da qualidade do ar. Este novo tipo de monitorização permite a recolha de conjuntos de dados espaciais e temporais de alta resolução pela população geral, investigadores e autoridades públicas (Giordano et al., 2021; Karagulian et al., 2019). Os sensores fixos têm sido instalados em diversos locais estacionários — no topo de edifícios, em postes de iluminação pública, ou em estações de referência — ou como sensores móveis — no topo de carros, bicicletas ou transportados por cidadãos (Gressent et al., 2020; Miskell et al., 2017).

De uma forma geral, as autarquias e os governos estão-se a esforçar por melhorar a densidade das medidas de monitorização e, para isso, dependem frequentemente de sensores de baixo custo, uma vez que não têm capacidade financeira para suportar estações de monitorização da qualidade do ar de referência suficientes. Estes tipos de sensores podem fornecer leituras em "tempo real" a um custo mais reduzido, enquanto proporcionam uma cobertura espacial mais abrangente do que os métodos de referência existentes para medir os contaminantes do ar (Karagulian et al., 2019).

Além disso, a monitorização da poluição atmosférica com métodos de medição de referência, exige aos operadores competentes a manutenção e calibração dos instrumentos de medição, que são definidos nos Procedimentos Operacionais-Tipo, definidos na Diretiva 2008/50/CE. Em contrapartida, prevê-se que os sensores de baixo custo possam funcionar sem o envolvimento humano, permitindo que pessoas não especializadas monitorizem a poluição atmosférica sem a necessidade de muitos conhecimentos técnicos. Muitos institutos responsáveis pela monitorização da qualidade do ar para fins regulamentares, bem como as autarquias, estão a ponderar a incorporação de sensores de baixo custo nos seus métodos normais de medição, de modo a complementar a monitorização existente. No entanto, a ausência de informação abrangente e facilmente acessível para comparar o desempenho dos sensores de baixo custo, bem como a vasta gama de ofertas comerciais, dificultam a identificação dos sensores de baixo custo mais adequados para os fins de monitorização (Karagulian et al., 2019).

Embora os sensores tenham estimulado a inovação nos métodos de monitorização de qualidade do ar, e a tecnologia IoT forneça instrumentos viáveis para expandir a capacidade existente na monitorização ambiental, é comumente reconhecido que a qualidade dos dados produzidos por estes dispositivos é muito variada. As diferenças existentes complicam consideravelmente a compreensão do desempenho dos sensores, para a utilização de LCS na monitorização ambiental, suscitando também várias questões, nomeadamente sobre a sua exatidão, fiabilidade, usabilidade no terreno e desempenho (Okafor et al., 2020; Rachele Duvall et al., 2021).

Os LCS são menos exatos e mais sensíveis a fatores externos. A sua resposta pode ser fortemente impactada por sensibilidades cruzadas. As próprias características dos gases, das partículas, ou até das

condições ambientais, podem resultar em sobrestimações ou subestimações, quando comparados com os métodos de monitorização de referência existentes (Okafor et al., 2020).

É então necessário apostar no desenvolvimento desta tecnologia, para que tenha um alcance e aceitação mais amplos para este fim. Calibrar o LCS pode ajudar a melhorar a qualidade dos dados e o seu desempenho. Os fabricantes de sensores de baixo custo calibram frequentemente os sensores antes de os lançarem no mercado; no entanto, a calibração é geralmente feita em circunstâncias laboratoriais controladas, que não correspondem às condições exatas encontradas pelos sensores quando implantados no campo. Como resultado, os sensores podem continuar a reportar resultados errados e pouco precisos, mesmo depois de calibrados em laboratório (Okafor et al., 2020).

Além da calibração pré-venda, os sensores de baixo custo, requerem calibração periódica quando colocados no terreno para garantir uma captura fiável de dados. Algumas abordagens de aprendizagem automática, tais como regressão linear e redes neurais podem ser usadas para calibrar este tipo de sensores, modificando os valores dos sensores através da comparação com as concentrações medida por monitores de referência.

Como mencionado anteriormente, as condições ambientais como a temperatura e a humidade podem ter impacto nos sensores de baixo custo. Para conseguir uma calibração eficiente, estes parâmetros devem ser incluídos no modelo de calibração, a fim de ter em conta a sua influência na resposta do sensor. Não obstante, é preciso ter em conta o número de variáveis aplicadas numa equação de calibração, uma vez que quanto mais forem aplicadas, maior a complexidade de computação e menor a precisão do modelo de calibração. Como resultado, é fundamental compreender as condições ambientais que influenciam a qualidade dos dados dos sensores (Okafor et al., 2020).

Embora os pós-processamentos e a remoção de *outliers* sejam necessários para obter resultados, a principal conclusão é que os sensores de baixo custo, anteriormente considerados apenas sugestivos, podem agora ser utilizados para avaliações quantitativas complementares da qualidade do ar urbana, quando devidamente manuseados. Estes tipos de sensores podem então ser utilizados como uma técnica de medição viável para utilizações não regulamentares, como estudos de tendências locais de qualidade do ar, detetar *hotspots*, atribuir fontes e efetuar estudos da exposição humana (Mead et al., 2012), complementar a monitorização regulamentar e aumentar a consciência educacional/ambiental (Kuula et al., 2022; Rachele Duvall et al., 2021).

Apesar de todos os avanços técnicos da última década, é necessário mais trabalho para que os sensores possam desempenhar um papel significativo na monitorização regulamentar e complementar da qualidade do ar (Kuula et al., 2022).

#### **2.4.2.1 Tipologias e tecnologias disponíveis**

Para classificar e compreender a implantação dos sensores, é importante distinguir entre o detetor de sensor único, produzido pelo Fabricante de Equipamentos Originais (sensores OEM) e os sistemas de sensores (SSys), que incluem sensores OEM simultaneamente com uma caixa de proteção, sistema

de amostragem, sistema de energia, *hardware* eletrônico e *software* para aquisição de dados, analógico para conversão digital, tratamento de dados, e análise de dados. Tanto o OEM e SSys são considerados sensores de baixo custo. Do ponto de vista do utilizador, as SSys são sistemas prontos a usar, já aos sensores OEM, os utilizadores devem adicionar componentes de *hardware/software* para proteção contra condições meteorológicas, armazenamento de dados, pressão de dados, interoperabilidade dos dados e, em geral, a calibração de LCS (Karagulian et al., 2019).

O processo de tratamento dos dados dos sensores de baixo custo, podem ser classificados como "fonte aberta" — quando o utilizador está ciente de todo o processo de tratamento de dados, desde a recolha de dados até aos níveis de concentração de poluentes — e "caixas pretas" — o utilizador é incapaz de compreender toda a cadeia de processamento de dados, uma vez que as técnicas de calibração são pouco claras e não é permitido o controlo de parâmetros (Karagulian et al., 2019).

Embora a maioria dos OEM sejam de código aberto, permitindo que os utilizadores finais os incorporem em SSys, a maioria dos SSys são categorizados como "caixas pretas". Esta é uma restrição, uma vez que as SSys podem exigir uma calibração *a-posteriori* diferente da executada pelo fabricante. Os LCS também são categorizados de acordo com a sua disponibilidade comercial. Os LCS que podem ser comprados e operados por qualquer utilizador são classificados como "comerciais". Quando não é possível localizar um fornecedor comercial de um determinado sensor de baixo custo, estes são classificados como "não comerciais". Este tipo de LCS é frequentemente usado para estudo e publicação, e é impossível para qualquer utilizador replicar a configuração do sensor idêntico (Karagulian et al., 2019).

Os OEM existentes e que são mais comercializados, podem dividir-se em três tipos de tecnologia: sensores resistivos, eletroquímicos ou óticos. Estes operam segundo diferentes princípios de funcionamento, com gamas de sensibilidade e tempos de resposta distintos.

### **Sensores resistivos**

Os sensores resistivos funcionam através da reação entre o metal semicondutor metal-óxido e os gases da atmosfera, o que gera alterações na sua condutividade ou resistência (Martins, 2017).

Estes tipos de sensores são geralmente de reduzidas dimensões e necessitam de altas temperaturas para aumentar a taxa de reação, pelo que geralmente é incorporado um aquecedor no sensor. Estes respondem a uma ampla gama de concentrações dos gases, de alguns ppb a vários milhares de ppm (Aleixandre & Gerboles, 2012).

Segundo Aleixandre & Gerboles, (2012), de todos os sensores avaliados, estes apresentam a maior sensibilidade cruzada, respondendo a praticamente qualquer componente volátil (redução ou oxidação), gases perigosos como NO<sub>x</sub>, ou COV. A estabilidade deste tipo de sensores é provavelmente a sua maior falha. Estes sensores precisam de ser calibrados porque a resposta varia ao longo do tempo. No que toca à temperatura e à humidade, estes parâmetros afetam nas respostas, devendo assim, ser cuidadosamente controlados e avaliados (Aleixandre & Gerboles, 2012).

De acordo com várias pesquisas, o equilíbrio químico na superfície é provavelmente influenciado pelas aplicações ambiente da velocidade do vento (Aleixandre & Gerboles, 2012).

### **Sensores eletroquímicos**

Os sensores eletroquímicos são os mais frequentemente utilizados, sendo que podem detectar as concentrações de vários gases, tais como NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO. Apresentam uma gama de alta sensibilidade de mg/m<sup>3</sup> a µg/m<sup>3</sup> e um tempo de reação rápido, que varia entre 30 e 200 segundos (Martins, 2017; Samad et al., 2020).

O princípio de funcionamento passa pela difusão das moléculas do gás, através da membrana anti condensação. O eléctrodo é então passado através de uma membrana capilar, filtrante e hidrofóbica — antes de ser reduzido ou oxidado — consumindo ou criando electrões e gerando assim uma corrente eléctrica. Este sinal eléctrico é proporcional à concentração do respetivo gás (Martins, 2017; Samad et al., 2020).

Há uma tendência geral para que os erros sejam semelhantes em todos os sensores, sendo que a maior parte apresentam uma divergência de linearidade de aproximadamente 2 a 5 %, podendo chegar a 10 %, em certos casos. Os sensores de baixo custo são influenciados não só por parâmetros externos, como temperatura do ar, humidade relativa e interferências com outros compostos (sensibilidade cruzada), mas também por características diretamente relacionadas com o sensor específico de baixo custo, como o tempo de aquecimento, o ganho de sinal eléctrico e a calibração inicial do fabricante. Embora não possa ser totalmente evitada a sensibilidade cruzada a outros gases, esta pode ser ajustada, escolhendo materiais de eléctrodos alternativos (Samad et al., 2020). Algumas investigações revelaram uma relação entre a velocidade do vento e as aplicações ambiente, demonstrando que estas podem ter um impacto no equilíbrio químico na superfície. A estabilidade a longo prazo é demonstrada pelos sensores (Aleixandre & Gerboles, 2012).

### **Sensores óticos**

O sensor ótico gera um pulso baixo como *output*, após detetar a luz que foi refletida a partir de partículas transmitidas pelo ar. A concentração de partículas é estimada com base na percentagem de tempo que o sensor está a reportar uma pulsação baixa contra uma curva de concentração fornecida pelo fabricante (Martins, 2017).

Este tipo de sensor é mais utilizado para a deteção de concentrações de partículas. Os dois sistemas de sensores mais utilizados são: os contadores de partículas óticas (OPC) e os nefelómetros. Ambos os sistemas detetam a concentração através da deteção da luz dispersa por partículas, embora o OPC seja capaz de contar partículas diretamente, com base no seu tamanho. Os nefelómetros, por outro lado, avaliam a densidade das partículas, que são depois transformadas em massa de partículas (Karagulian et al., 2019).

### 2.4.2.2 Aplicabilidade dos sensores de baixo custo

A nova geração de sensores de qualidade do ar de baixo custo oferece um potencial para os indivíduos empregarem esta tecnologia para outros fins que não a monitorização regulamentar padrão ou regulamentar complementar. Os sensores de poluição atmosférica ainda estão na fase inicial de desenvolvimento, e muitos ainda não foram revistos para determinar a exatidão dos seus dados. O desempenho e os requisitos dos sensores diferem conforme a sua aplicação. A qualidade de uma medição é ditada pela performance do sensor, a forma como o sensor é utilizado, e o método da análise das medições. É muito importante perceber as vantagens e as limitações de um sensor, para a recolha de informação útil para um objetivo específico (Williams et al., 2014). Na Tabela 2.8, são apresentadas algumas potenciais aplicações deste tipo de sensores.

Tabela 2.8- Descrição dos potenciais usos para os sensores de baixo custo (Williams et al., 2014)

Aplicações	Descrição	Exemplo
Investigação	Estudos científicos destinados a descobrir novas informações sobre a poluição atmosférica	Uma rede de sensores de ar é utilizada para avaliar variações da concentração de partículas numa cidade.
Monitorização da exposição pessoal	Monitorização da qualidade do ar a que uma única pessoa está exposta durante a realização de atividades típicas	Uma pessoa com uma condição clínica que a torna mais sensível à poluição atmosférica utiliza um sensor para detetar quando e onde está exposta a poluentes que podem prejudicar a sua saúde.
Complementar os dados de monitorização existentes	Adicionar sensores a uma área de monitorização regulamentar estatal/local existente para complementar a cobertura.	Para definir corretamente o gradiente de concentração entre diferentes locais, é colocado um sensor entre estações fixas reguladas.
Identificação e caracterização de origem	Monitorização perto da fonte suspeita para identificar possíveis fontes de emissões	Um sensor é instalado a favor do vento de uma fábrica industrial para acompanhar as mudanças nas concentrações de poluição atmosférica ao longo do tempo.
Educação	Sensores em contextos educativos para aulas de ciência, tecnologia, engenharia e matemática	Os alunos recebem sensores para detetar e compreender preocupações de qualidade do ar.
Informação/sensibilização	Sensores para monitorização informal da qualidade do ar	Um sensor é usado para comparar a qualidade do ar em casas de pessoas, locais de trabalho, carros e escolas infantis.

Adaptado de: Williams et al., 2014

Na Tabela 2.9, estão disponíveis os objetivos de desempenho sugeridos para as aplicações identificadas anteriormente: precisão e erro de enviesamento, eficiência da recolha de dados e tempo médio de dados, sendo que este último indicador é muito específico do propósito da recolha de dados, podendo variar de minutos até anos de medição e recolha de dados.

Tabela 2.9- Exemplos de objetivos de desempenho sugeridos para sensores para cinco tipos de aplicações em comparação com requisitos de monitorização regulamentar

Área de aplicação	Poluentes	Precisão e erro de enviesamento	Eficiência da recolha dos dados	Racionalidade
Educação e informação/sensibilização	Todos	<50%	≥50%	A importância da imprecisão da medição é secundária para estabelecer que o poluente ocorre numa ampla gama de concentrações.
Identificação e caracterização de origem	Todos	<30%	≥75%	É necessária uma maior qualidade de dados aqui para garantir que o poluente a medir não existe apenas na atmosfera local, mas também numa concentração próxima do seu valor genuíno.
Complementar os dados de monitorização existentes	Poluentes críticos e tóxicos (incluindo COV)	<20%	≥75%	A monitorização suplementar pode ser útil para dar dados extras de qualidade do ar para complementar os sensores existentes. Para ser benéfico no fornecimento de tais dados suplementares, deve ser de qualidade suficientemente elevada para garantir que as novas informações estão a ajudar a "preencher" as lacunas de monitorização em vez de agravar a questão.
Monitorização da exposição pessoal	Todos	<30%	≥80%	A exposição pessoal a poluentes atmosféricos pode ser influenciada por uma variedade de circunstâncias. Taxas de erro mais elevadas dificultam a determinação de como, quando e por que as exposições pessoais aconteceram.
Monitorização regulatória	O <sub>3</sub> CO, SO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub> PM <sub>2.5</sub> e PM <sub>10</sub>	<7% <10% <15% <10%	≥80%	São necessárias medições precisas para adquirir dados de alta qualidade para cumprir as normas regulamentares.

Adaptado de Williams et al., 2014

### **2.4.2.3 Boas práticas para o funcionamento adequado dos sensores de qualidade do ar**

Para garantir um funcionamento adequado e um desempenho fiável, a tecnologia de monitorização do ar, como a maioria dos outros tipos de tecnologia, requer cuidados e manutenção contínuos. Estas medidas preventivas são necessárias a curto e a longo prazo e podem diferir em função do sistema de monitorização utilizado. Ao cuidar corretamente de um equipamento de monitorização, evitam-se possíveis erros de recolha de dados, aumenta-se a vida útil do dispositivo e economiza-se dinheiro em componentes de substituição e serviços de manutenção.

Segundo Williams et al. (2014), os processos de manutenção são as ações necessárias para manter o desempenho do sensor durante um período prolongado. Bons processos de manutenção podem ajudar a maximizar e manter o desempenho do sensor. Os processos de manutenção típicos incluem regularmente:

- Utilizar padrões de contaminante e contadores de fluxo para calibrar;
- Limpeza de superfícies e componentes interiores e exteriores para evitar a acumulação de insetos, poeiras e outros contaminantes;
- Os filtros e os consumíveis devem ser substituídos;
- Substituição do sensor quando este falhar ou tiver chegado ao fim da sua vida útil;
- Trocar pilhas recarregáveis;
- Examinar dados que apresentem padrões estranhos, um declínio na capacidade de resposta geral, deriva na linha de base. Problemas no sensor tendencialmente fornecem dados que parecem demasiado regulares e repetitivos, ou alterações demasiado repentinas, que podem ser causadas por ocorrências climáticas naturais;
- Examinar a colocação do sensor para verificar que não houve alterações substanciais (por exemplo, crescimento das árvores, alterações de construção, etc.). A criação de um conjunto de protocolos de manutenção para o seu sensor ajuda o utilizador a determinar como implantar e manter eficazmente o sensor. É benéfico criar e manter um diário de bordo para garantir que a manutenção é realizada em intervalos regulares.

### **2.4.2.4 Redes de monitorização existentes com sensores (casos de estudo)**

A investigação mais recente em qualidade do ar tem se focado em diferentes abordagens para obter dados de instrumentos *low-cost*, de modo a complementar os dados disponibilizados pelas estações fixas e oficiais. Estes instrumentos têm o potencial de contribuir significativamente para o entendimento e estudo da variação tanto espacial como temporal da concentração dos poluentes em áreas urbanas, não obstante a sua precisão limita o seu uso generalizado (Miskell et al., 2017).

Algumas cidades já utilizam novas tecnologias para atingir objetivos de qualidade do ar, através de redes de sensores de baixo custo, são exemplos disto Londres, Paris, Bombaim e Los Angeles. Nesta secção, serão apresentados alguns casos de estudo para enquadrar como é que estes projetos estão a utilizar estas tecnologias para atingir diversos objetivos de gestão da qualidade do ar.

### ***The Breathe London***

O *Breathe London* é uma nova parceria entre a Câmara Municipal de Londres, *Imperial College London* (facilitado via *Imperial Projects*) e a *Bloomberg Philanthropies*.

A rede de monitorização comunitária de qualidade do ar *Breathe London* foi lançada em janeiro de 2021, na sequência de uma experiência de dois anos bem-sucedida, financiada maioritariamente pelo *Clean Air Fund* (CAF) e do *C40 Cities*. A fase experimental incluiu três formas de monitorização: sensores permanentes de baixo custo em mais de cem locais, monitores móveis em veículos do *Google Streetview* e monitores transportáveis — que mediram a exposição das crianças enquanto iam para a escola. Em novembro de 2020, o Presidente da Câmara de Londres assumiu o financiamento da *Breathe London*, investindo em 136 pequenos sensores de qualidade do ar. A *Bloomberg Philanthropies* juntou-se mais tarde ao Presidente para investir em mais sessenta sensores para os bairros de Londres e seis sensores para instituições culturais e museus, num total de 202 sensores apoiados pelo Presidente da Câmara e pela *Bloomberg*. A rede é atualmente gerida por especialistas do *Imperial College London Environmental Research Group* (ERG) (Baker et al., 2022; Breathe London, 2022; Oladini et al., 2022).



Figura 2.7- Sensor da rede Breathe London.

Fonte: (ICL, 2022)

O principal objetivo deste projeto é empoderar os cidadãos londrinos com dados locais da qualidade do ar, através de:

- dados disponíveis em tempo real no website do *Breathe London*;
- uma rede para organizações, empresas e residentes de Londres, na qual estes podem efetuar um pagamento de uma taxa anual e assim hospedar um sensor numa localização selecionada e obter todos os serviços complementares de gestão de dados;

- uma rede de 60 sensores disponíveis para as organizações comunitárias se candidatarem para hospedarem um sensor gratuito no seu local preferido.

De acordo com os dados de monitorização da *Breathe London*, houve um decréscimo nos níveis de NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, após a data de início de funcionamento da Zona de Emissões Ultra Reduzidas, em abril de 2019, em locais de monitorização ao longo de estradas, dentro da área afetada, bem como em todas as localizações do *Breathe London*. Estes sensores permitem detetar alterações na distribuição geográfica das emissões poluentes e completar a rede de referência.

Com este caso de estudo, verifica-se uma ótima aplicação deste tipo de sensores, uma vez que estes já estão a permitir que sejam definidas medidas e políticas de gestão da qualidade do ar, com base em dados locais.

## Paris

A *Bloomberg Philanthropies* e a Cidade de Paris colaboraram em 2019 para analisar e melhorar a qualidade do ar nas escolas da cidade. A investigação-piloto foi realizada durante um período de um ano, de setembro de 2019 a setembro de 2020. Um total de 138 sensores de baixo custo que detetam os níveis de PM<sub>2.5</sub> e NO<sub>2</sub> foram instalados em 44 escolas (primárias e secundárias), infantários de Paris e ao longo de ruas próximas. Foram utilizados micro sensores, tubos de difusão e 16 estações de referência na investigação que incorporou vários métodos de monitorização (Clarity, 2022; Oladini et al., 2022).

Com este projeto, percebeu-se que as concentrações de poluição atmosférica estavam inversamente relacionadas com a distância dos edifícios escolares das estradas vizinhas, e que as paredes escolares ofereciam um "efeito de abrigo". O estudo encontrou uma diferença média de 36% nas concentrações de NO<sub>2</sub> entre pátios escolares e ruas vizinhas, indicando que a qualidade do ar escolar está em cumprimento com os critérios de qualidade do ar da OMS. No entanto, não se verificou este efeito com o PM<sub>2.5</sub> (Clarity, 2022; Oladini et al., 2022).

Durante o programa piloto, a *Airparif* avaliou o funcionamento dos sensores, bem como a qualidade dos dados adquiridos. A Clarity criou um algoritmo de correção para PM<sub>2.5</sub> com base em leituras das estações de referência. Quando comparado com os dados brutos, o método melhorou consideravelmente as leituras de micro sensores e foi eficaz para os locais numa definição de fundo. Deste modo, o projeto-piloto demonstrou a importância de emparelhar redes de micro sensores com a rede de referência durante várias fases de implementação, para garantir a deteção de dispositivos defeituosos antes da implementação dos sensores, a calibração dos dispositivos e pós-processamento de dados brutos com um algoritmo específico de localização (Clarity, 2022; Oladini et al., 2022).

Após a conclusão do programa piloto, a *Bloomberg Philanthropies* e a Cidade de Paris anunciaram o alargamento da sua parceria com o lançamento de uma nova campanha de medição, liderada pela *Airparif*, para monitorizar as partículas ultrafinas em Paris e envolver a participação dos cidadãos no combate à poluição atmosférica (Clarity, 2022).

## Bombaim

A *Bloomberg Philanthropies* apoiou um projeto-piloto de sensores de baixo custo em Bombaim, em colaboração com o *Maharashtra Pollution Control Board* e o *Indian Institute of Technology Kanpur*. O projeto piloto decorreu entre novembro de 2020 e maio de 2021, tendo introduzido a possibilidade de escalar a monitorização da qualidade do ar — através de sensores de baixo custo pela Índia — especialmente nas cidades selecionadas como prioritárias no *National Clean Air Programme* (Nikunja Sundaray & Rai Bhardwaj, 2019). O principal objetivo do projeto era testar a incorporação de sensores de baixo custo no estado do sistema de gestão da qualidade do ar de Maharashtra e mostrá-lo como um modelo de adoção nacional, que poderia beneficiar regiões com pouca ou nenhuma capacidade de monitorização existente (Oladini et al., 2022).

Na maior Região Metropolitana de Bombaim, quarenta sensores construídos por quatro *start-ups* indianas, foram instalados com o Conselho de Controlo de Poluição de Maharashtra (Figura 2.8). Foram instalados quatro conjuntos de sensores junto a monitores de referência/governamentais que cobrem toda a cidade de Bombaim. Os monitores regulamentares escolhidos para a co-localização foram selecionados para fornecer uma amostra representativa de cinco ambientes: fundo, industriais, residenciais, comerciais e de tráfego. Ao avaliar os sensores, a equipa tentou também criar um método fiável baseado em *machine learning*, para calibrar os sensores de baixo custo para PM<sub>2.5</sub> (Oladini et al., 2022).

Com este projeto foram obtidos resultados muito positivos. Verificou-se que os dados dos sensores eram comparáveis ou superiores (> 90%) aos monitores fixos, e que 20 dos sensores produziram leituras que diferem das estações de monitorização em apenas 10-15%. Os resultados demonstram que após a calibração, o erro — calculado como a relação entre as leituras de sensores e as leituras da rede de monitorização regulamentar — é inferior a 15% para dois dos sensores e menos de 20% para os outros dois tipos de sensores.

Os sensores implementados com monitores regulamentares, que mediram o PM<sub>2.5</sub>, estavam em concordância com as leituras dos monitores, em diversos ambientes com níveis de poluição elevados e baixos. Com os dados provenientes de estações fixas com métodos de referência e com sensores, estão a ser produzidos novos modelos de *machine learning*, que podem ajudar a reduzir o tempo necessário para co-localizar os sensores, e ainda, permitir a calibração diretamente no campo. Estes avanços científicos poderão consequentemente reduzir os custos de monitorização da qualidade do ar nas cidades.

As lições aprendidas com este programa piloto despertaram o interesse de outros estados e cidades. O IIT Kanpur já implementou sensores adicionais em cidades como Jaipur e Lucknow, e estão em curso planos para expandir a rede para a Índia rural (Oladini et al., 2022).

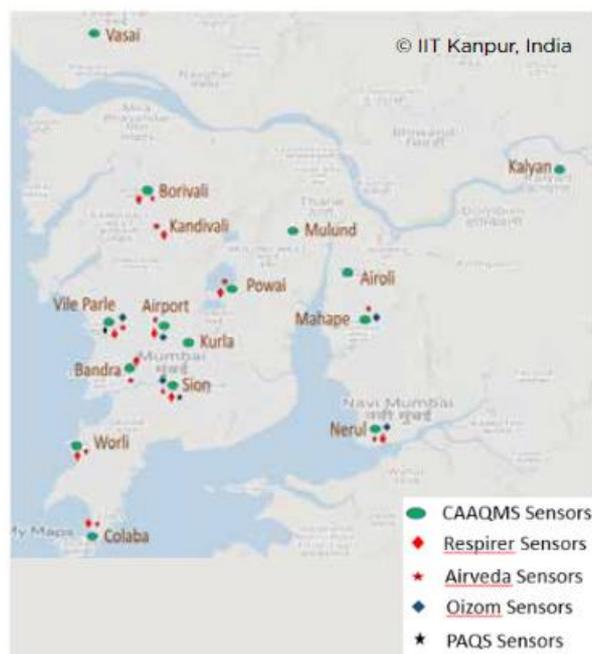


Figura 2.8-Localização dos sensores da rede de monitorização do projeto piloto em Bombaim.  
 Fonte: (Oladini et al., 2022)

### Los Angeles

Este projeto de monitorização da qualidade do ar criou uma rede de monitorização da qualidade do ar hiper local de ponta, para oferecer uma imagem abrangente da qualidade do ar do bairro em estudo. O projeto monitoriza  $PM_{2.5}$  e  $NO_2$  em todos os locais de monitorização, bem como o  $O_3$  em locais selecionados. A Figura 2.9 mostra a localização dos sensores (Mukherjee & Hafner, 2021).

A iniciativa teve início em julho de 2020, com a instalação de treze sensores de baixo custo (*Clarity e Aeroqual*) instalados nas luzes da cidade, em locais selecionados por membros da comunidade, como escolas, centros seniores e parques. Através da rede de sensores, são fornecidas informações sobre o ar a que os residentes estão expostos numa base bloco-a-bloco, algo que os monitores regulamentares e regionais não conseguem alcançar (Mukherjee & Hafner, 2021; Oladini et al., 2022). Em outubro de 2020, foi lançado o portal de monitorização da qualidade do ar da *Watts Rising*. Neste portal são feitas atualizações periódicas da qualidade do ar.

Este projeto foi desenhado tendo o conceito comunitário muito intrínseco. De forma regular, são marcadas reuniões com a comunidade, onde os participantes questionam e debatem sobre as informações obtidas pelos dados gerados pelos sensores. Estas reuniões permitem gerar a discussão em volta da temática da qualidade do ar, dando a oportunidade de a comunidade empoderar-se nestes assuntos (Mukherjee & Hafner, 2021).

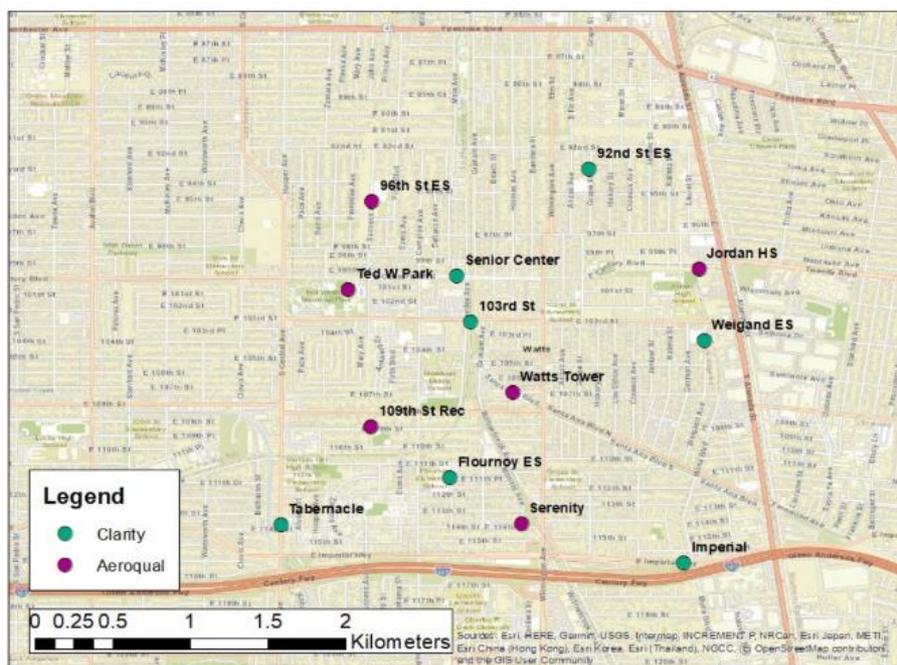


Figura 2.9- Localização dos sensores da rede de monitorização da qualidade do ar de Watts. ES e HS designam escola primária e escola secundária. Os sensores da *Clarity* estão representados a verde e os da *Aeroqual* estão representados a roxo.

Fonte: (Mukherjee & Hafner, 2021)

#### 2.4.2.5 Oportunidades e desafios da utilização de sensores de baixo custo

Os sensores de qualidade do ar de baixo custo têm gerado uma nova era de monitorização da qualidade do ar que alavanca os avanços na Internet das Coisas, eletrónica, digital e tecnologias de *machine learning* (Y. Li et al., 2022). Na Tabela 2.10 está disponível uma síntese das oportunidades e desafios identificados pela utilização de sensores de baixo custo.

Tabela 2.10- Síntese das oportunidades e desafios da utilização de sensores de baixo custo.

Oportunidades	Desafios
Baixo custo	Calibração e validação dos dados
Fácil instalação e manutenção	Ausência das revisões atuais sobre a concordância entre o LCS e os dados de referência
Facilidade de disponibilização dados contínuos e em tempo real, democratizando o acesso à informação	Ausência de técnicas e métricas amplamente estabelecidas para avaliar o desempenho do LCS
Complementar as atuais metodologias de monitorização com alternativas acessíveis e flexíveis	Qualidade variável: a precisão das medições de LCS podem ser questionadas, quando comparado os valores dos sensores com medidas de referência
Aumentar a área de cobertura e a resolução temporal	Selecionar os micro sensores para os objetivos e medições pretendidos
Permitem que os cidadãos possam tomar decisões mais informadas	Falta de compreensão sobre como funcionam as tecnologias destes sensores
	Determinar se irá detetar corretamente e de forma fiável o poluente-alvo, dentro do intervalo de concentração previsto para a aplicação
	Determinar como as diferentes características (humidade relativa, temperatura, composição de partículas ou flutuações de tamanho) podem afetar as leituras
	Estimar como a resposta do sensor evolui ao longo do tempo e a partir de que altura a leitura do sensor se torna errada ou pouco fiável
	Compreender como os sensores funcionam "fora da caixa" e se os ajustes ou correções são necessários para fornecer dados mais precisos

Fonte: (Karagulian et al., 2019; S. Li et al., 2022; Rachele Duvall et al., 2021; Santana et al., 2021)

Para ultrapassar todos estes desafios apresentados e aumentar a lista de oportunidades deste tipo de sensores, é necessário que sejam feitos mais investimentos para a investigação na área e para a criação de metodologias, que possam ser aplicadas de forma uniforme, nos vários tipos de sensores.

## CASO DE ESTUDO: CIDADE DE LISBOA

Este capítulo inclui uma breve caracterização da área de estudo, dos fatores geográficos, climáticos e meteorológicos, fatores esses que podem influenciar a dispersão, formação e transporte dos poluentes na atmosfera. É também feita uma caracterização demográfica e socioeconómica da população, bem como dos seus padrões de mobilidade. Estes parâmetros também determinam a distribuição e a atividade das fontes emissoras de poluentes atmosféricos, e de uma forma geral, também influenciam a qualidade do ar da cidade de Lisboa. Na parte final deste capítulo, é realizada uma caracterização das emissões dos poluentes atmosféricos e é feita uma análise dos instrumentos de melhoria de qualidade do ar.

### 3.1 Caracterização da área de estudo

A cidade de Lisboa, além de capital de Portugal, é o centro de uma das duas áreas metropolitanas do país, neste caso, da Área Metropolitana de Lisboa (AML). É constituída por 24 freguesias e está localizada na margem direita do rio Tejo. O centro da cidade consiste em colinas e a parte oeste é ocupada pelo parque florestal de Monsanto. O município de Lisboa, com uma área terrestre de 85,9 Km<sup>2</sup> ocupa cerca de 2,97% da AML, sendo que este agrega 18 concelhos com uma dimensão total de 2 892 Km<sup>2</sup> (AML, 2018).

O tráfego rodoviário é a fonte mais significativa de poluição atmosférica na cidade (Faria et al., 2020; Santos et al., 2019). Além disso, devido à sua localização geográfica e ao regime dominante do vento ocidental, Lisboa é fortemente influenciada por fontes naturais, como por exemplo os aerossóis marinhos. Além disso, a cidade é frequentemente afetada pelo transporte de massa aérea norte-africana, o que contribui significativamente para a carga de poeiras minerais atmosféricas. Outras fontes de poluição são o aeroporto (localizado no norte da cidade) e as indústrias (localizadas a sul). Estas indústrias incluem têxteis, produtos químicos, aço, óleo e refinação de açúcar, produção de sabão e farinha. Há também um porto de transporte marítimo, que têm um contributo significativo para as emissões globais de poluentes atmosféricos. Em Lisboa podem ser detetadas elevadas concentrações

de poluentes atmosféricos em condições meteorológicas adversas, condições de dispersão baixas e inversões térmicas, nomeadamente durante o inverno (Faria et al., 2020; Santos et al., 2019).

### 3.1.1 Zonamento da RLVT para avaliação e gestão da qualidade do ar

A avaliação e gestão da qualidade do ar em Portugal é efetuada tendo em consideração as unidades funcionais de avaliação e gestão da qualidade do ar que estão delimitadas para este objetivo: as aglomerações e as zonas.

Em 2014, após uma reavaliação da delimitação das zonas da Região de Lisboa e Vale do Tejo (RLVT), que se deu em 2013, a região passou a ser constituída por quatro zonas homogéneas: as três aglomerações já existentes — "Área Metropolitana de Lisboa Norte", "Área Metropolitana de Lisboa Sul" e "Setúbal"— (com a inclusão de algumas freguesias novas) e uma zona nova — "Oeste, Vale do Tejo e Península de Setúbal (OVTPS)" —, que engloba os territórios das antigas zonas "Vale do Tejo e Oeste" e "Península de Setúbal/Alcácer do Sal", e é excluído o município de Alcácer do Sal. Em suma, a Rede de Monitorização de Qualidade do ar de Lisboa e Vale do Tejo (RMQA LVT) engloba atualmente três aglomerações e duas zonas, sendo constituída por 23 estações de monitorização. Na Tabela 3.1 e na Figura 3.1, é possível observar as características das zonas e aglomerações da RLVT e a delimitação das unidades de gestão da qualidade do ar, respetivamente. Na Figura 3.2, estão representadas as zonas de medição da qualidade do ar na AML e Vale do Tejo, com um total de 25 estações (CCDR LVT, 2022a).

Tabela 3.1. Características das zonas e aglomerações da região de Lisboa e Vale do Tejo definidas em 2013.

Fonte:(Ferreira et al., 2017)

Zona	População (habitantes)	Área (km <sup>2</sup> )	Densidade populacional (habitantes/km <sup>2</sup> )
Área Metropolitana de Lisboa Norte (a)	1 866 677	524,3	3 560
Área Metropolitana de Lisboa Sul (a)	566 413	342,2	1 655
Setúbal (a)	90 640	62,5	1 449
Oeste, Vale do Tejo e Península de Setúbal	1 128 800	10 873,8	104

(a) aglomeração

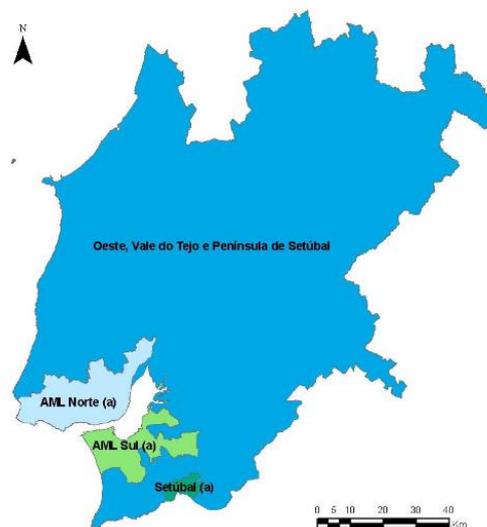


Figura 3.1- Delimitação das unidades de avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente da RLVT(a) aglomeração. Retirado de: (Ferreira et al., 2017)

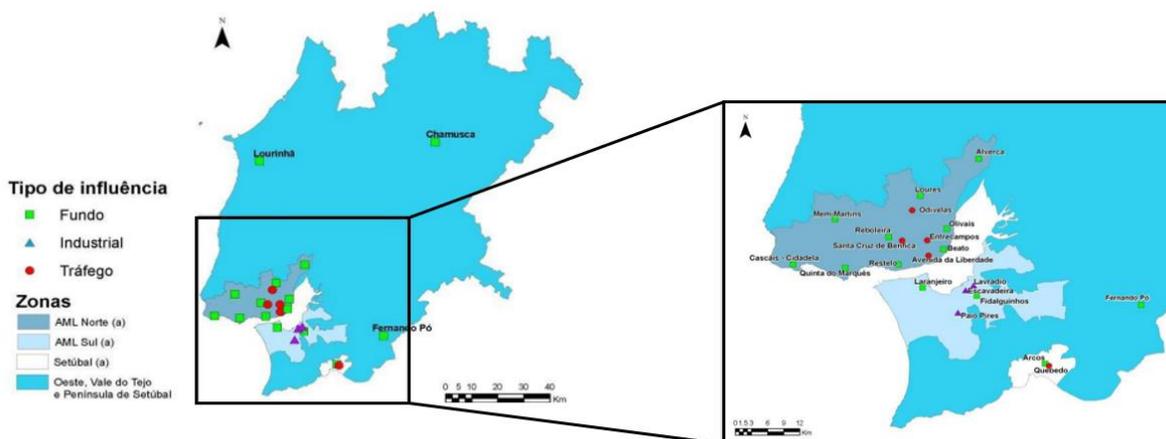


Figura 3.2- Localização das estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo (CCDR LVT) em funcionamento em 2020. Fonte: CCDR (Nogueira & Mesquita, 2021)

### 3.1.2 Geografia e clima

A localização geográfica constitui um papel muito importante na definição do clima da RLVT. A região encontra-se localizada na faixa costeira ocidental da Península Ibérica, sendo, portanto, muito fortemente influenciada pelo Oceano Atlântico. O clima da região é também condicionado pelos fenómenos atmosféricos de larga escala como o anticiclone dos Açores e depressões transientes (Ferreira et al., 2017).

A RLVT apresenta uma orografia bastante complexa, o que acaba por ter implicações diretas na dispersão de poluentes numa escala local, obrigando e perturbando a circulação atmosférica na camada superficial (Ferreira et al., 2017). Na Figura 3.3, é apresentado o relevo da AML. É possível

identificar vários contrastes, que assinalam a existência de uma diversidade de climas na cidade de Lisboa e na restante região. De forma complementar, na Figura 3.4, é possível observar as unidades morfoclimáticas de Lisboa: vales e depressões, península de Lisboa e vales do Tejo e do Sado.

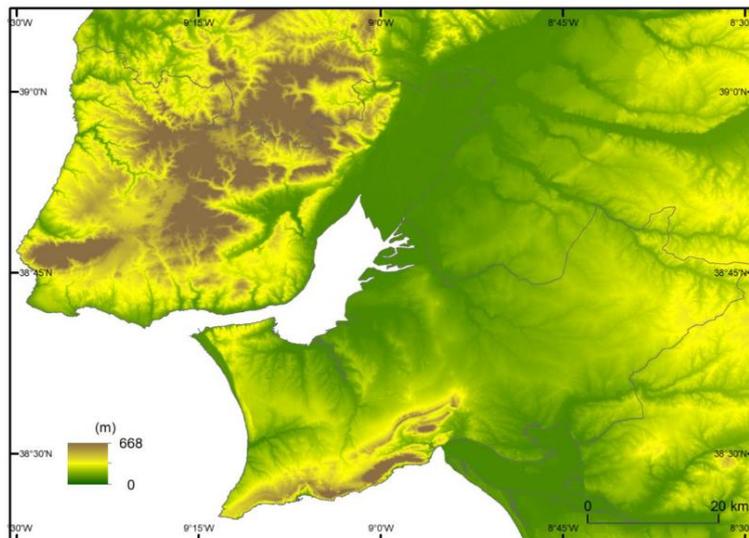


Figura 3.3- Hipsometria da AML.  
Retirado de: (AML, 2018)

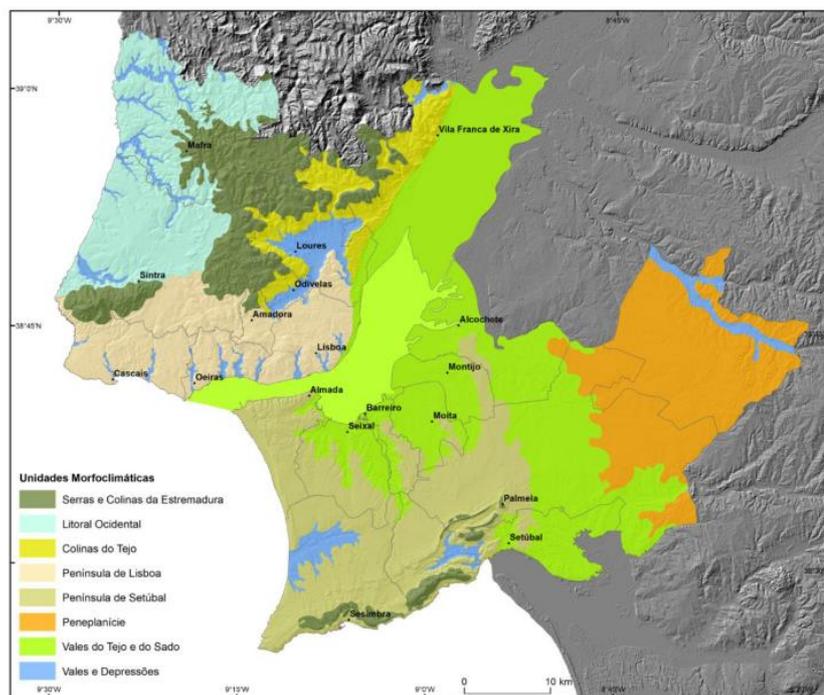


Figura 3.4- Unidades morfoclimáticas da AML.  
Retirado de: (AML, 2018)

A caracterização do clima baseia-se em valores médios observados durante um longo período. Não obstante disso, os valores médios indicam variações interanuais que permitem fazer a distinção entre

anos e meses, fazendo uma classificação com base no seu estado médio. A este valor médio (mensal ou anual) de cada elemento climático, designa-se por normal climatológica.

Na Figura 3.5, é possível observar a normal climatológica mensal das temperaturas do ar, relativas à estação geofísico de Lisboa (Instituto Geofísico D. Luís), referente ao período 1981-2010. A análise da evolução dos valores climatológicos da temperatura demonstra que os meses com temperaturas mais baixas são dezembro, janeiro e fevereiro, e que os meses mais quentes são junho, julho e agosto.

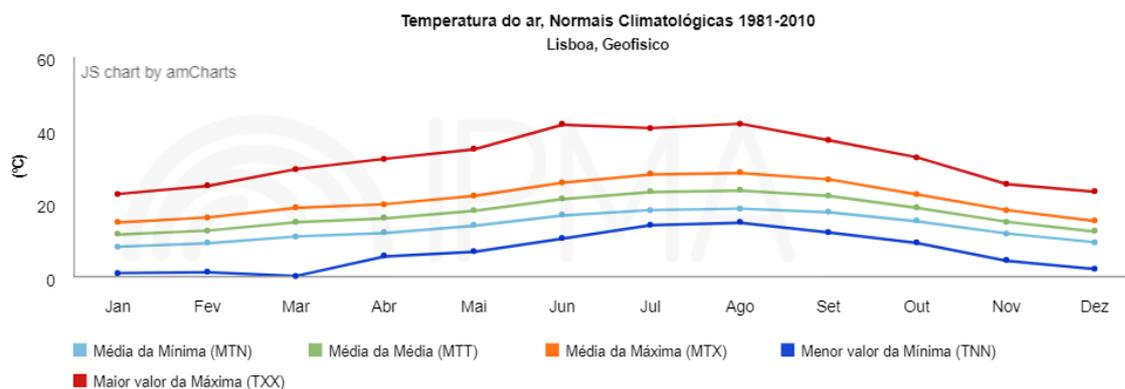


Figura 3.5- Normais climatológicas da temperatura do ar, para a estação de Lisboa Geofísica 1981-2010. Fonte: (IPMA, 2022a)

Na Figura 3.6, é possível observar as normais climatológicas da precipitação anual, para a estação de Lisboa Geofísica, no período de 1981 a 2010. A análise da evolução dos valores climatológicos da precipitação caracteriza os meses de Verão como secos. O mês de novembro apresenta os valores médios mais elevados de precipitação.

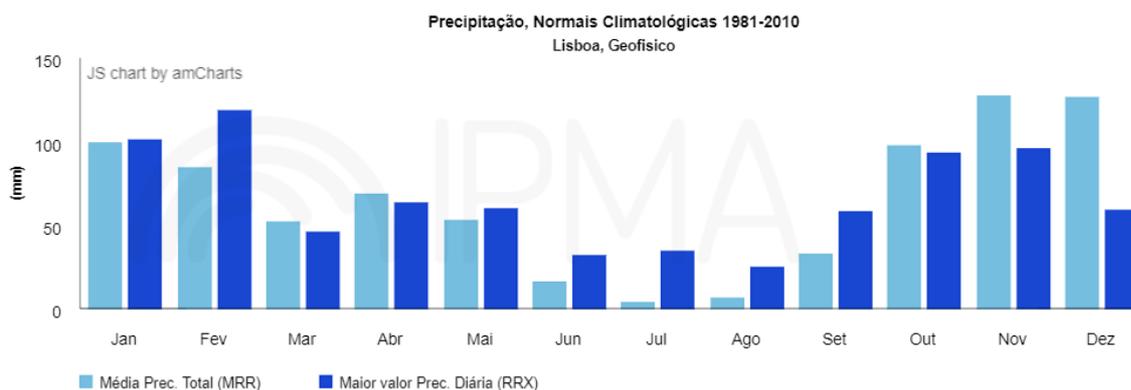


Figura 3.6- Normais climatológicas da precipitação anual, para a estação de Lisboa Geofísica, 1981-2010. Fonte: (IPMA, 2022a)

O Verão é então considerado quente e seco, com temperaturas que variam entre os 16°C e os 35°C, sendo que a temperatura média do mês mais quente é superior ou igual a 22°C, com uma frequência relativamente elevada de noites tropicais, superior a 10 noites por ano, em média. O Inverno é tépido, com ausência de dias com geada. As temperaturas variam entre os 8°C e os 18°C, sendo que

a média das temperaturas mínimas no mês mais frio ronda os 8°C. No que toca à precipitação anual, esta é considerada moderada e reduzida (650 a 700 mm), com dias chuvosos pouco frequentes (80 dias/ano) (AML, 2018; Faria et al., 2020).

O vento é um dos parâmetros que exerce influência direta na dispersão dos poluentes atmosféricos. Em Lisboa dominam os ventos provenientes do norte e noroeste (AML, 2018). A circulação atmosférica que caracteriza esta região é influenciada pelo contraste oceano-continente, o que favorece o desenvolvimento de brisas do mar. Nos meses de Verão e Primavera, é muito frequente a existência das Nortadas, ou seja, ventos oriundos de norte ou noroeste, mais intensos e persistentes nesta altura do ano, que atingem um máximo de intensidade durante a tarde. Este regime regional de ventos ocorre devido ao efeito da circulação conjunta do anticiclone dos Açores e da depressão de origem térmica, que se forma sobre a região central da Península Ibérica. Nos meses de Inverno e Outono, também influenciados pela circulação anticiclónica, existe maior variabilidade dos estados do tempo (Ferreira et al., 2017; IPMA, 2022c).

Na Figura 3.7 é possível observar as normais climatológicas da intensidade média do vento, à superfície, na AML, verificando-se que na AML a intensidade do vento é predominantemente moderada (5,5 m/s), variando 4 m/s e 5 m/s. Observa-se também que nos meses de verão, a intensidade do vento é mais elevada e que nos meses de Outono é mais baixa.

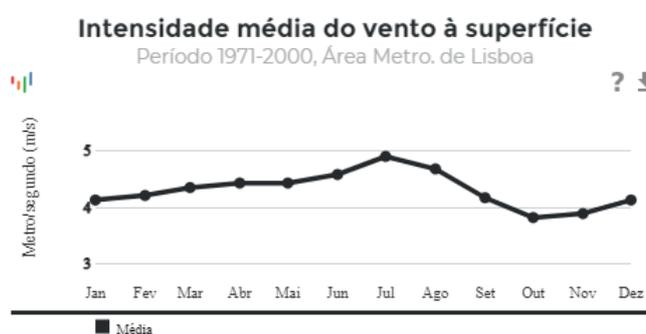


Figura 3.7-Normais climatológicas da intensidade média do vento à superfície, na AML, no período 1971-2000.

Fonte: (IPMA, 2015)

Em suma, a área de estudo localiza-se unicamente na unidade morfoclimática "Península de Lisboa", sendo que esta tem uma área de 302,8 km<sup>2</sup>. Esta é descrita e caracterizada, em termos de clima, como uma área meridional da AML Norte, com forte urbanização. O clima é considerado mediterrânico suave, do tipo Csa (temperado com verão seco e quente), segundo a classificação de Köppen-Geiger, sendo fortemente influenciado pela Corrente do Golfo (Farias et al., 2019; IPMA, 2022b).

Pela Figura 3.8, observa-se que Lisboa insere-se num domínio climático designado de "marítimo de transição". Estas áreas são abertas à influência das massas de ar marítimo, onde alternam os dias atlânticos, húmidos e com baixas amplitudes térmicas, e os continentais, secos e com extremos térmicos mais elevados (AML, 2018).

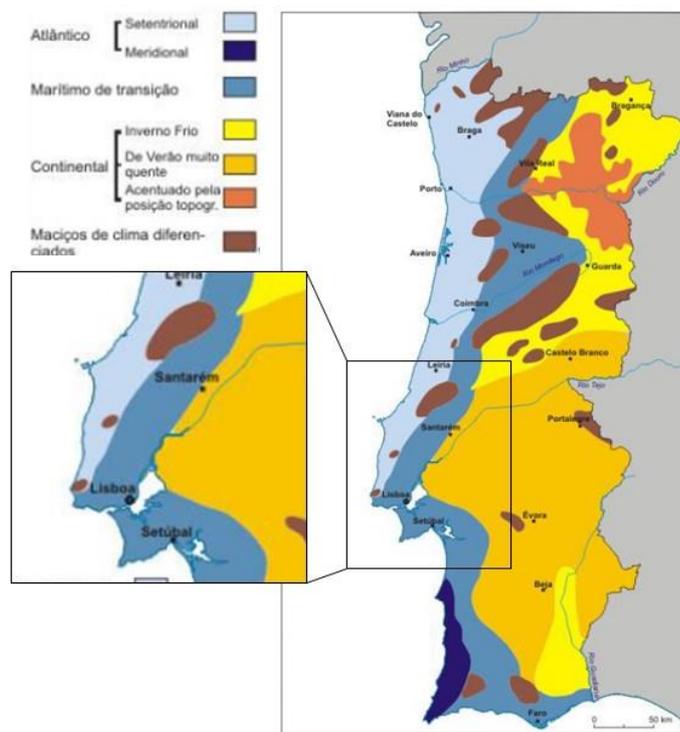


Figura 3.8- Domínios climáticos de Portugal Continental.  
Retirado de:(AML, 2018)

### 3.1.3 Demografia e sócio economia

As características demográficas e socioeconómicas, a localização dos principais polos de emprego e atividades, bem como os padrões de mobilidade da população, são fatores que se podem correlacionar com a distribuição das emissões antropogénicas de poluentes atmosféricos, e consequentemente influenciar a qualidade do ar da região. Nesta secção efetuar-se-á uma descrição breve dos fatores que foram considerados mais relevantes, neste âmbito (Ferreira et al., 2017).

Os Resultados provisórios dos Censos 2021 confirmam a tendência de um aumento da população na AML: mais 1,7% (2 821 876) do que em 2011(2 520 708), continuando a registar a maior concentração populacional e económica de Portugal. Entre 2001 e 2011 deu-se um crescimento populacional significativo (+6%), três vezes superior ao registado no Continente (1,8%).

Apesar da AML Norte concentrar mais de 70% da população, regista-se um forte crescimento dos municípios da AML Sul, no período entre 2011 e 2021(3,3% face a 0,5% da AML Norte). Esta dinâmica populacional da AML Sul pode ser explicada pela gradual melhoria das acessibilidades entre as margens do Tejo (construção da Ponte Vasco da Gama e construção do Eixo Ferroviário Norte/Sul). Noutra perspetiva, o crescimento da periferia de Lisboa está também a ser impulsionado pela disponibilidade de habitação com preços de mercado mais baixos nestas cidades vizinhas.

Este crescimento populacional é desigual nos municípios da AML. Em 1981, Lisboa tinha mais de 30% da população da AML. Em 2021 passou a representar um valor inferior a 20%. Lisboa destaca-se assim, como um dos municípios que tem perdido maior quantidade de residentes, sendo que entre 2011 e 2021, assistiu-se a um decréscimo de 1,2%. É, portanto, notável o esvaziamento da capital, enquanto se assiste a um crescimento demográfico da AML nos últimos 40 anos (Censos, 2021; CML, 2015). Na Figura 3.9 é possível observar a evolução da população residente em Lisboa e na AML, entre 1991 e 2021.

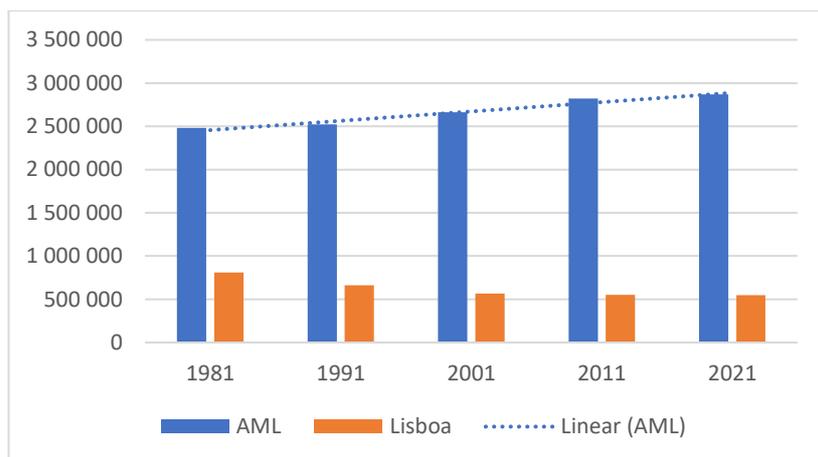


Figura 3.9-Evolução da população residente (nº) AML e Lisboa, 1991 a 2021.

Fonte: INE(Censos),1981, 1991,2001, 2011 e 2021(provisório)

No que toca à densidade populacional média da AML (951,7 habitante/ km<sup>2</sup>), esta era em 2021 bastante superior à média do país (112,2 habitante/km<sup>2</sup>, sendo Lisboa um dos municípios mais densamente povoados (5 438 habitante/km<sup>2</sup>).

De acordo com os resultados provisórios dos Censos de 2021, verifica-se que a capital do país apresenta duplo envelhecimento, na base e no topo: uma inferior proporção de jovens (13,1%) e uma maior proporção de idosos (23,4%). Por outro lado, Lisboa apresenta uma proporção, embora pouco relevante, da classe etária ativa, dos 25 aos 64 anos (53,5%), em relação à AML (53,2%) e ao Continente (50,5%).

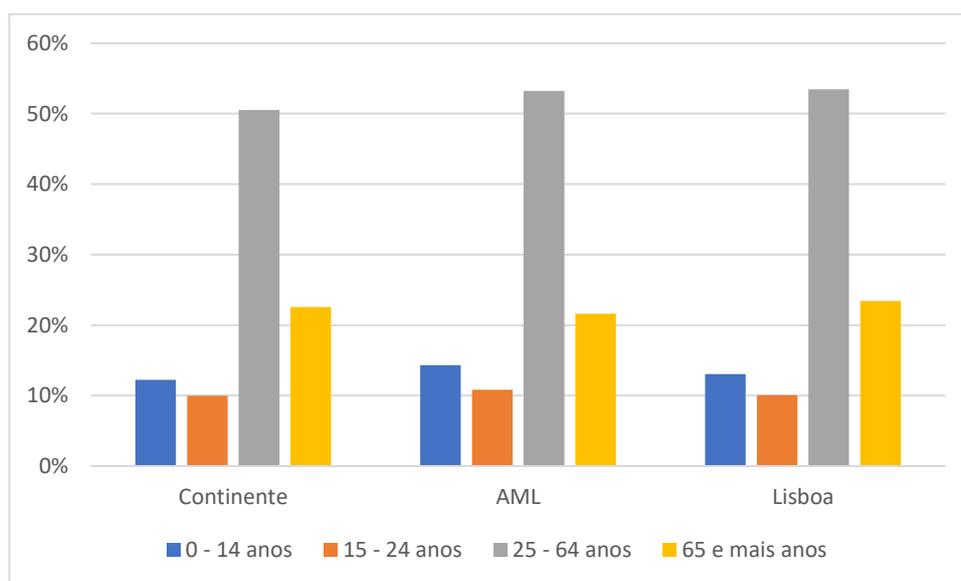


Figura 3.10-População por Grandes Grupos de Idades (%),2021, Lisboa, AML e Continente.

Fonte: INE(Censos), 2021(provisório)

Em 2011, a AML concentrava cerca de 28% do emprego e 47,5% da produção empresarial nacional. No que toca aos setores de atividade (Figura 3.11), é possível constatar que o mercado de trabalho nesta região e em Lisboa é predominantemente composto por população empregada no setor terciário, 83% e 89%, respetivamente, seguindo-se o secundário, 17% e 11%, e o primário 1% e 0,3%.

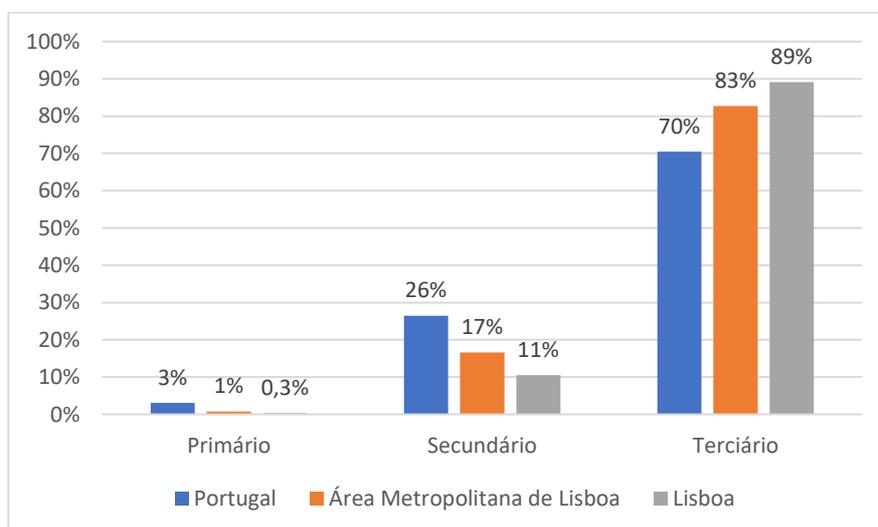


Figura 3.11- Setores da atividade económica em Portugal, AML e Lisboa, segundos os Censos de 2011.

Fonte: (PORDATA, 2015)

No que toca aos níveis educacionais e à estrutura socioeconómica, a população de Lisboa destaca-se, com níveis de instruções mais elevados, com enfoque nas freguesias localizadas em Lisboa Norte e ocidental, com extensão pela marginal, ao longo dos concelhos de Oeiras e Cascais (Marques da Costa, 2016). Entre 2011 e 2021, assistiu-se a um aumento de 25% da população residente com um nível de ensino superior, o que significa que 36,8% da população residente apresenta estudos superiores.

Assistiu-se também a um decréscimo de 15,2% da população residente sem nenhum nível de ensino, na última década(Censos, 2021).

No que toca aos ganhos médios mensais dos trabalhadores por conta de outrem, verifica-se que Lisboa, em 2019, se encontrava bastante acima da média nacional, 1 669€ e 1 206€, respetivamente. Verifica-se que o poder de compra per capita no concelho, em 2019, é superior ao dobro da média nacional, 205, 6 e 100, respetivamente. Não obstante, entre 2017 e 2019, verificou-se uma quebra de 0,06%(PORDATA, 2022). Já o valor médio de compra e vendas das propriedades encontra-se muito acima da média nacional, 462 062€ e 112 470€, respetivamente. Face ao valor elevado das habitações, em 2021 notou-se um decréscimo de 1,4% dos alojamentos próprios, comparativamente a 2011(PORDATA, 2022).

A ocupação urbana do território da AML encontra-se predominantemente apoiada nos principais eixos de acessibilidade de transporte ferroviário e rodoviário. De acordo com a Figura 3.12, onde é possível observar a distribuição da população residente por lugar, no ano de 2011, verificando-se que a organização territorial é estruturada pelas principais vias radiais de ligação à cidade de Lisboa, nomeadamente as linhas de Cascais, Vila Franca de Xira e Sintra. Destaca-se também a área urbana contínua envolvente à cidade de Lisboa, constituída pelos concelhos da Amadora, Odivelas, Loures e Oeiras.

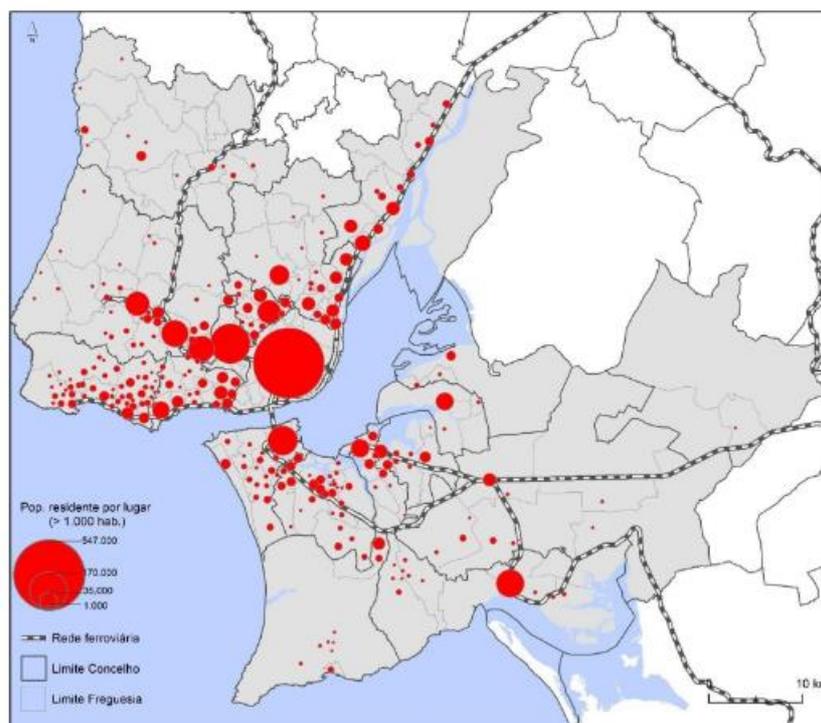


Figura 3.12- População residente na AML por lugar em 2011.

Retirado de:(Ferreira et al., 2017)

Os fluxos relativos aos movimentos pendulares na Área Metropolitana de Lisboa mostram a forte relação que é estabelecida entre os concelhos metropolitanos(Ferreira et al., 2017).

O município de Lisboa destaca-se por ser o principal polo de atração das deslocações metropolitanas, recebendo população trabalhadora ou estudante de todos os restantes municípios da AML, onde

a proporção da população que entra é superior à que sai. Em 2011, das 1,7 milhões de deslocações, 21,6% tinham como destino Lisboa, 38,4% eram realizados entre concelhos da margem norte, 20,2% entre concelhos da margem sul e apenas 15,9% tinham origem ou destino a cidade de Lisboa, acentuando-se a tendência de redução da importância das deslocações centradas em Lisboa (Marques Da Costa, 2016).

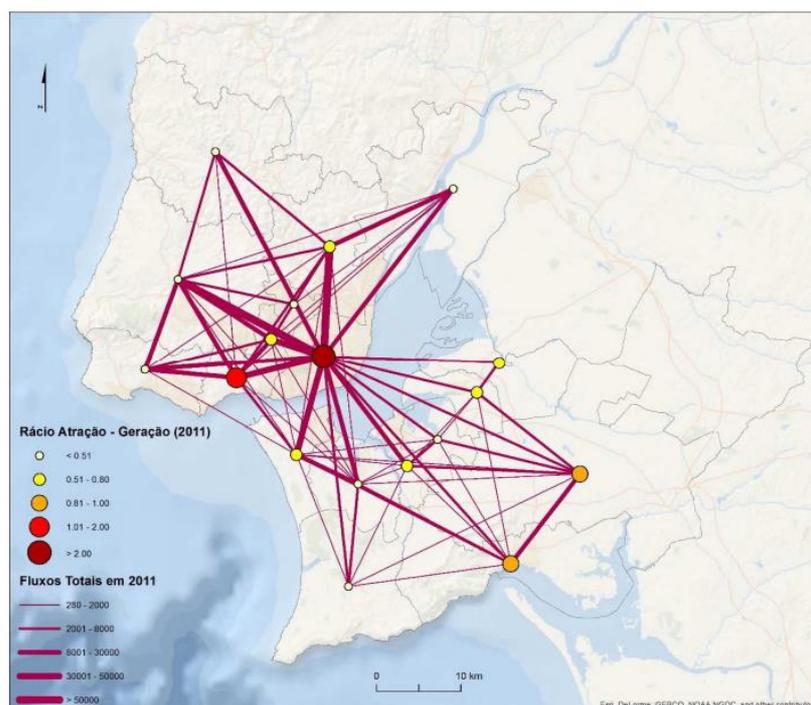


Figura 3.13-Deslocações casa-trabalho ou casa-estudo, em 2011.

Retirado de:(Marques Da Costa, 2016)

No que diz respeito à evolução da repartição modal à escala metropolitana, esta tem sido predominantemente marcada pelo aumento da utilização do transporte individual — predominantemente usado por um ocupante único. Este aumento ocorreu a partir dos anos 90 do século XX, quando se deu a evolução da rede rodoviária. O resultado foi o alastrar da ocupação do território AML, ao longo dos principais eixos radiais a partir da cidade de Lisboa, para áreas mais afastadas (Ferreira et al., 2017; Marques Da Costa, 2016).

Por outro lado, o transporte público apresentou grandes dificuldades de adaptação às novas condições de procura de transporte na área metropolitana. Esta redução da sua quota na repartição modal, deve-se à diminuição significativa da densidade de procura e devido ao estender da localização da residência (Ferreira et al., 2017; Marques Da Costa, 2016).

Sendo considerado mais flexível, disponível e rápido (tendo em conta o tempo médio das deslocações) a utilização do transporte individual é atualmente dominante nas deslocações por motivo de trabalho ou de estudo na AML, sendo que em 2011, mais de metade das deslocações eram realizadas em automóvel (53,8%, cerca de +11% do que em 2001), enquanto o transporte público rodoviário detinha uma quota de 15% (-6% face a 2001). Esta situação é bastante oposta ao que se verificava em 1981, quando a utilização do automóvel era de apenas 13% e a quota do transporte público era de 62% (Ferreira et al., 2017; Marques Da Costa, 2016).

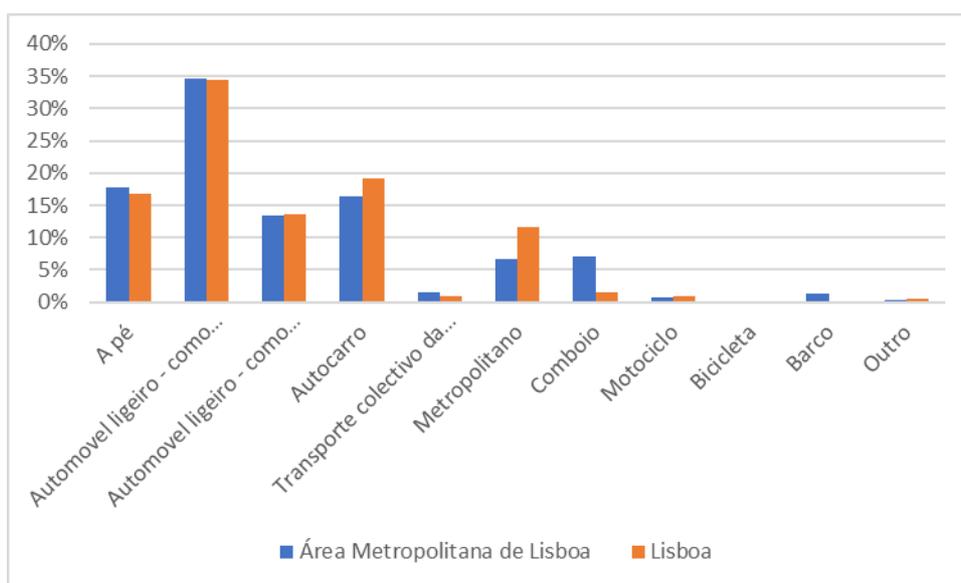


Figura 3.14- Modo de transporte predominante na AML e em Lisboa, em 2011.

Fonte:(INE, 2021)

Nas deslocações interconcelhias, no que diz respeito aos modos de transporte, o automóvel detinha, no ano de 2011, um peso de 58% dos fluxos na AML, ascendendo a 74% no caso de Lisboa. O autocarro e o comboio destacam-se também, representando 15% e 17% das deslocações metropolitanas, respetivamente.

### 3.1.4 Diagnóstico da qualidade do ar

Tendo em conta o inventário de emissões atmosféricas da RLVT, realizado no âmbito do Plano de Melhoria da Qualidade do Ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo (PMQA RLVT), conclui-se que o transporte rodoviário é o setor que mais influencia as emissões totais de  $\text{NO}_x$ , partículas, CO e COV, sendo que as emissões mais elevadas de  $\text{NO}_x$  e  $\text{PM}_{10}$  estão associadas a veículos a gasóleo — categoria de veículos com maior peso na frota em circulação na RLVT).

As emissões mais elevadas de  $\text{NO}_x$  e  $\text{PM}_{10}$ , associadas ao setor do transporte rodoviário verificam-se em vários concelhos (Loures, Sintra, Vila Franca de Xira), e em particular no de Lisboa, município onde se concentram 41% das emissões totais de  $\text{NO}_x$  da AML Norte. Verifica-se também que as emissões de  $\text{NO}_x$ , associadas ao setor do transporte marítimo e aéreo têm alguma expressão, devido a infraestruturas de transportes existentes, neste caso o aeroporto, um porto e terminais de transporte fluvial de passageiros.

Nesta secção será realizado um breve diagnóstico da qualidade do ar na RLVT, com enfoque na cidade de Lisboa, entre 2001 e 2020. Será apresentado um estudo relativo ao índice de qualidade do ar, e às ultrapassagens dos valores de referência presentes no Decreto-Lei 102/2010, relativos aos poluentes  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  e  $\text{O}_3$ .

As estatísticas anuais calculadas podem ser consultadas no Site da CCDR LVT, na folha de cálculo "Estatísticas da rede de monitorização da qualidade do ar da CCDR LVT no período 2001-2020".

#### 3.1.4.1 Índice de qualidade do ar

Na Figura 3.15 é possível observar a distribuição do índice QualAr pelo número de dias em cada ano, em Lisboa. Na Figura 3.16, observa-se a evolução da percentagem do número de dias com índice QualAr Médio, Mau/Fraco e Muito Bom/Bom.

Observando ambas as figuras, verifica-se que a classe do índice mais frequente é Bom/Muito Bom, com valores sempre superiores a 50% dos dias, a partir de 2003, atingindo em todos os anos valores na ordem dos 250 dias. De um modo geral as classes “Fraco” e “Mau” têm gradualmente tido menos expressão, sendo sempre inferiores a 10% dos dias, a partir de 2007.

Torna-se então possível identificar uma tendência decrescente na quantidade de dias com classificação “Fraco” e “Mau”, tendo diminuído de 18%, em 2005, para 2%, em 2021. Verifica-se também que, desde 2019, há um aumento do número de dias com classificação “Médio” e uma diminuição do nº de dias com classificação “Bom”. Esta situação, segundo o Relatório do Estado do Ambiente 2020/2021, dá-se devido a uma alteração metodológica, que passou a considerar valores mais restritos nas concentrações do poluente ozono, sendo que este é um dos principais poluentes responsável pela cor do índice (pior resultado dos vários poluentes, por dia). O referencial do poluente para a classificação “Médio” passou de 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (APA, 2021a).

Entre 2020 e 2021, observa-se uma melhoria no índice de qualidade do ar, sendo que em 2021, o Índice QualAr na cidade de Lisboa foi classificado como “muito bom” em 97 dias (mais 8 dias do que em 2020), “bom” em 188 dias (mais 8 dias do que em 2020), “médio” em 42 dias (menos 20 dias do que em 2020) e “fraco” em apenas 7 dias (apenas mais 2 dias do que em 2020).

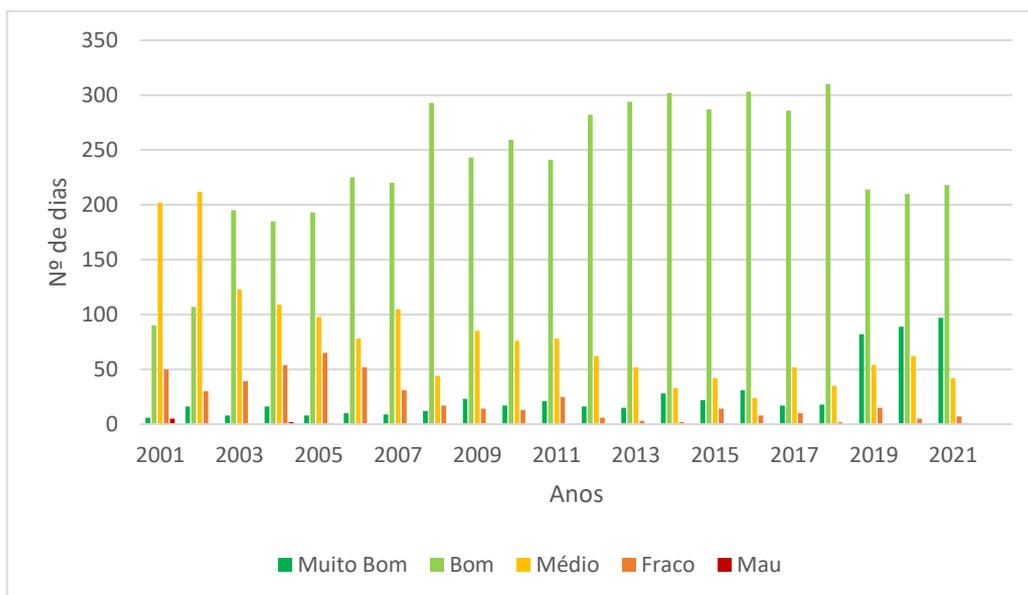


Figura 3.15- Distribuição do Índice de Qualidade do Ar pelo número de dias em cada ano, em Lisboa, entre 2001 e 2021. Fonte: (APA, 2022b)

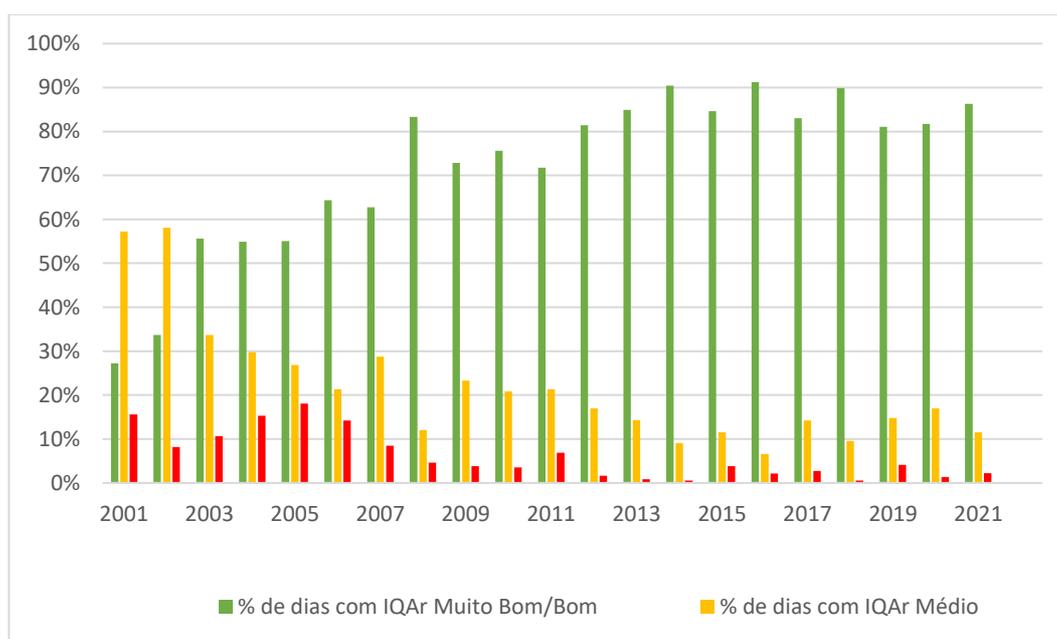


Figura 3.16- Evolução da percentagem do número de dias com IQualAr Médio, Mau/Fraco e Muito Bom/Bom. Fonte: (APA, 2022b)

### 3.1.4.2 Dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>)

Na Figura 3.17, é possível observar excedências ao valor limite anual (VLA) do NO<sub>2</sub>, em Lisboa, bem como a evolução da concentração média anual, entre 2001 e 2020. Da análise da Figura 3.17, verifica-se que no período de 2008 a 2012 ocorreram ultrapassagens ao VLA (40 µg/m<sup>3</sup>) em todas as estações de tráfego da AML Norte localizadas na cidade de Lisboa — Santa Cruz de Benfica, Entrecampos e Avenida da Liberdade — tendo-se observados as concentrações mais elevadas nesta última estação.

Entre 2013 e 2016, apenas a estação da Avenida da Liberdade apresentou uma média anual superior ao VLA (nos anos de 2012 a 2014, a taxa de recolha de dados da estação de Santa Cruz de Benfica foi inferior a 85%, e desse modo não foi possível avaliar a sua conformidade face ao VLA).

De 2019 para 2020 é possível observar um decréscimo significativo, nas concentrações de todas as estações, que se explica pelo facto de 2020 ter sido um ano atípico, marcado pelo impacto que a pandemia da COVID-19 teve na qualidade do ar — devido à ocorrência de vários períodos de confinamento. A melhoria da qualidade do ar sentida neste ano, deu-se sobretudo, nas zonas de tráfego mais intenso, principalmente nos grandes aglomerados urbanos, como é o caso de Lisboa.

Verifica-se que a estação da Avenida da Liberdade é a que apresenta médias mais elevadas ao longo das duas décadas, estando muito acima do VLA, com exceção no ano 2020, em que obteve uma concentração média anual de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Entre 2002 e 2012, e entre 2017 e 2018, a estação de Entrecampos também esteve acima do VLA. Apesar das oscilações da concentração média anual das restantes estações, estas estiveram sempre abaixo do valor limite, com exceção da de Santa Cruz de Benfica, no ano 2008. De uma forma geral, constata-se uma tendência de decréscimo das concentrações médias anuais a partir de 2009 até 2020.

Segundo o Relatório do Estado do Ambiente de 2020-2021, o VLH de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , a não exceder mais de 18 vezes no ano, foi cumprido integralmente em todas as zonas e aglomerações do território nacional (APA, 2021b) .

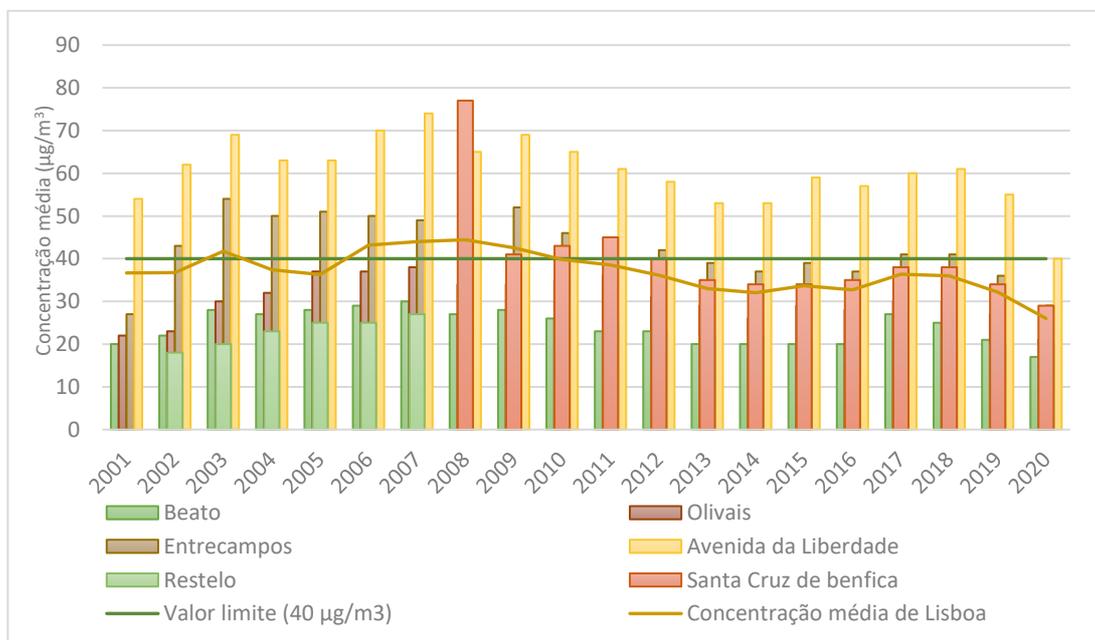


Figura 3.17- Evolução da concentração média anual de NO<sub>2</sub>, nas estações de Lisboa, entre 2001 e 2020.

Fonte: (APA, 2022b)

Na Figura 3.18, observa-se o número de ultrapassagens ao valor limite horário (VLH) do NO<sub>2</sub> ( $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), nos últimos 20 anos, na cidade de Lisboa, por estação. Da análise da Figura 3.18, verifica-se

que na AML Norte, as ultrapassagens acima do número permitido —18 vezes por ano civil — ocorreram apenas na estação da Avenida da Liberdade, no período 2006-2011, 2014-2015 e 2017-2018. A antiga estação da Rua da Prata apresentou ultrapassagens acima do número permitido de excedências ao VLH, no ano de 2001 e 2004. A estação de Olivais e de Entrecampos, também apresentaram ultrapassagens, em 2004 e em 2005, e em 2009, respetivamente. Nas restantes estações tem sido cumprido o critério definido pela legislação.

Segundo o Relatório do Estado do Ambiente de 2020-2021, o VLH de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , a não exceder mais de 18 vezes no ano, foi cumprido integralmente em todas as zonas e aglomerações do território nacional (APA, 2021b).

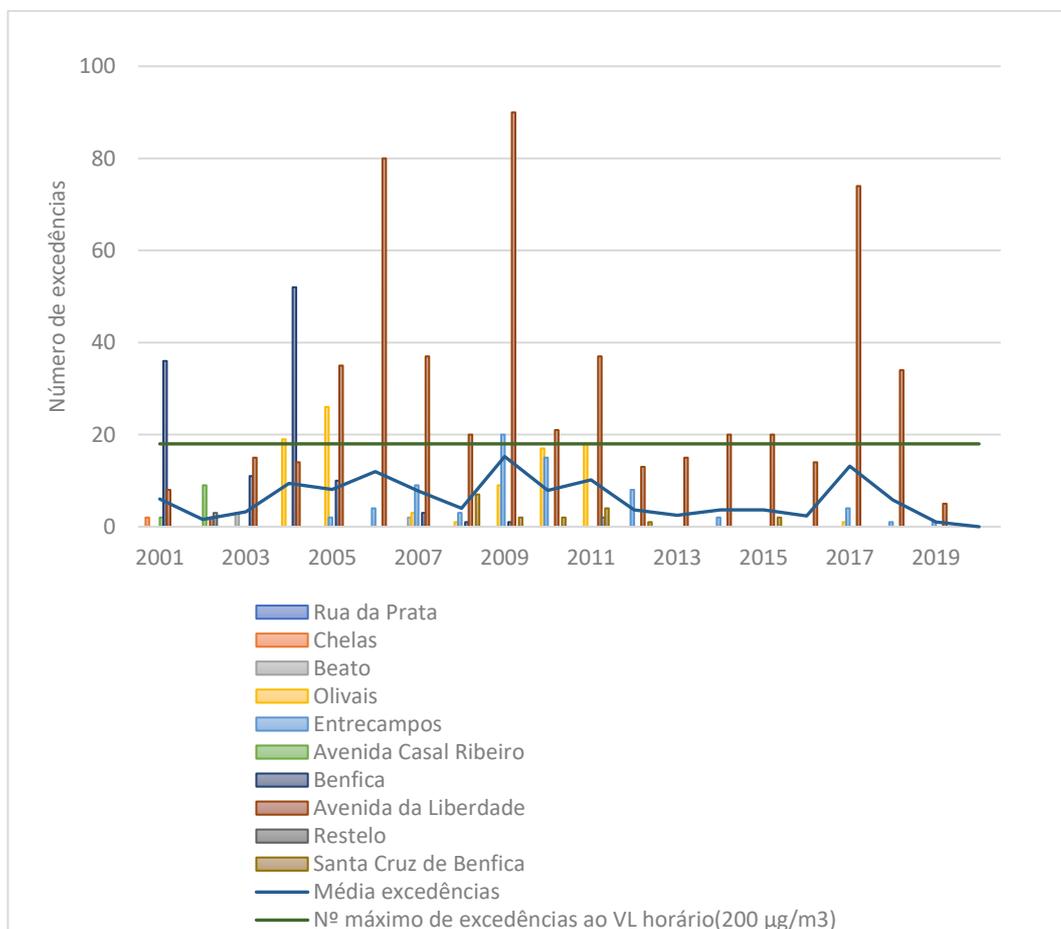


Figura 3.18- Nº de ultrapassagens ao valor do limite horário ( $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), por estação de Lisboa e média das excedências.

Fonte: (APA, 2022b)

### 3.1.4.3 Partículas em suspensão ( $\text{PM}_{10}$ )

Em Lisboa, as  $\text{PM}_{10}$  são essencialmente emitidas pelo tráfego rodoviário — emissões diretas do escape dos veículos, desgaste dos pneus e dos travões e ressuspensão — podendo também ter origem em fontes industriais e/ou naturais. Nas zonas com maior concentração de tráfego verificam-se os valores mais elevados de poluição atmosférica por este poluente (CML, 2015).

Para a análise deste poluente, consideraram-se os valores afetados do desconto da contribuição provenientes de fontes naturais, como está previsto no nº3 do artigo 31.º, do Decreto-Lei nº 102/2010, relativo à contribuição de poluentes provenientes de fontes naturais: "Caso as excedências sejam unicamente imputáveis a fontes naturais, essa excedência não é considerada para efeitos de cumprimento dos valores limite fixados no presente Decreto-Lei" (DRE, 2010).

Na Figura 3.19, é possível observar a evolução da concentração média anual de PM<sub>10</sub> e na Figura 3.20 e o número de excedências do valor limite diário. Da análise da Figura 3.19, verifica-se que, para os anos compreendidos entre 2001 e 2011, ocorreram situações de ultrapassagem do VLA (40 µg/m<sup>3</sup>). Estas ultrapassagens ocorreram na estação da Avenida da Liberdade (com exceção do ano de 2009) e na de Entrecampos (entre 2001 e 2006). No período de 2011 a 2020, os casos de ultrapassagens do VLA foram pontuais, verificando-se sobretudo em estações urbanas de tráfego. Estas ultrapassagens ocorreram em 2012, na estação de Santa Cruz de Benfica e na do Restelo, em 2015.

A evolução dos níveis registados a partir do ano 2011, verifica a tendência decrescente das concentrações de partículas PM<sub>10</sub>, na cidade de Lisboa, com os níveis a estabilizar nos últimos dois anos, sendo que, os resultados registados entre 2012 e 2014, indicam uma melhoria significativa das concentrações de PM<sub>10</sub>. No ano de 2020, atingiu-se a concentração mais baixa nos últimos 20 anos (18,3 µg/m<sup>3</sup>) e o número de excedências anual mais baixo (1 excedência).

Entre 2017 e 2020, tem se observado uma tendência para as concentrações entre estações estarem mais aproximadas entre si.

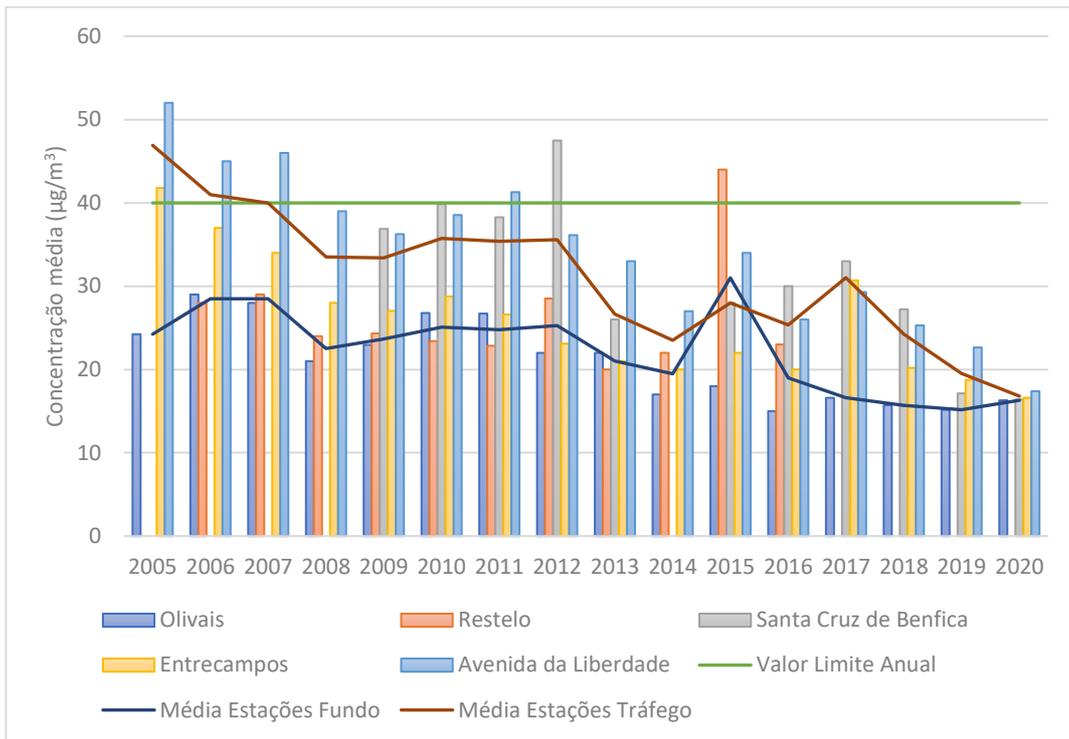


Figura 3.19- Evolução da concentração média anual de PM<sub>10</sub>, para as estações localizadas em Lisboa  
 Fonte: (APA, 2021b)

Na Figura 3.20 pode-se observar o número de excedências ao valor limite diário (VLD) de PM<sub>10</sub> (50 µg/m<sup>3</sup>), nas últimas duas décadas. Os resultados demonstram que até ao ano de 2011, este era um parâmetro que exigia maior preocupação, face aos valores elevados registados e ao número elevado de dias em excedência ao VLD. Entre 2011 e 2020, verificaram-se algumas ultrapassagens pontuais ao

número máximo de excedências, na estação da Avenida da Liberdade e na de Santa Cruz de Benfica, no ano de 2013, 2015 e 2017, e 2017, respetivamente.

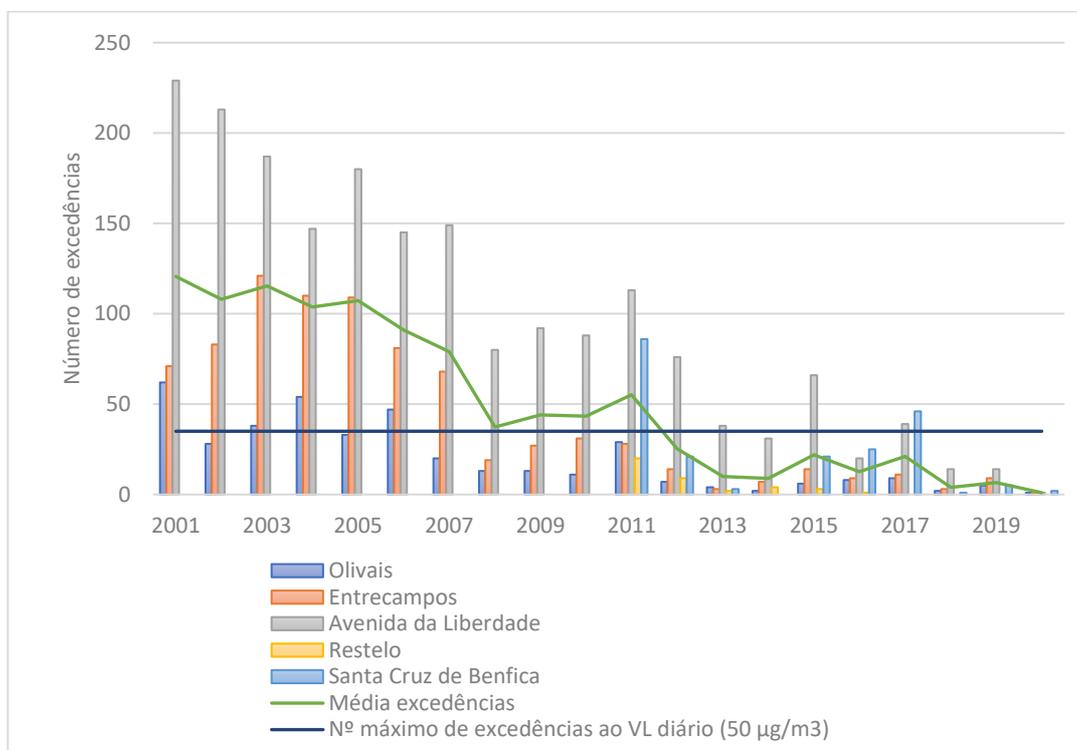


Figura 3.20- Nº de excedências ao valor limite diário de PM<sub>10</sub> nas estações de Lisboa

Fonte: (APA, 2021b)

De uma forma geral, verifica-se uma tendência de decréscimo das concentrações de PM<sub>10</sub>, bem como uma redução do número de estações em incumprimento dos VL, apesar de algumas ultrapassagens pontuais em 2013, 2015 e 2017.

#### 3.1.4.4 Partículas finas (PM<sub>2.5</sub>)

Na Figura 3.21, é possível observar a evolução da concentração média anual de concentração de PM<sub>2.5</sub>. Verifica-se que as concentrações médias anuais das estações de Lisboa ultrapassaram pontualmente o valor limite (20 µg/m<sup>3</sup>), entre 2003 e 2020. Entre 2005 e 2008, deu-se uma redução das concentrações. Após 2008, a tendência de evolução das PM<sub>2.5</sub> não é muito clara, mantendo-se a níveis muito abaixo do valor limite (Nogueira & Mesquita, 2021).

À semelhança do verificado com as PM<sub>10</sub>, no ano de 2020, ocorreu um decréscimo das concentrações médias anuais em várias estações, face aos anos anteriores, tendo-se atingido a concentração mais baixa nos últimos 20 anos (10 µg/m<sup>3</sup>).

A estação de Entrecampos, por ser uma estação com influência do tráfego, destaca-se pelas concentrações médias anuais mais elevadas. Já a estação de Olivais, por ter uma influência de fundo, acaba por apresentar concentrações mais baixas, embora ambas as estações oscilem de forma semelhante.

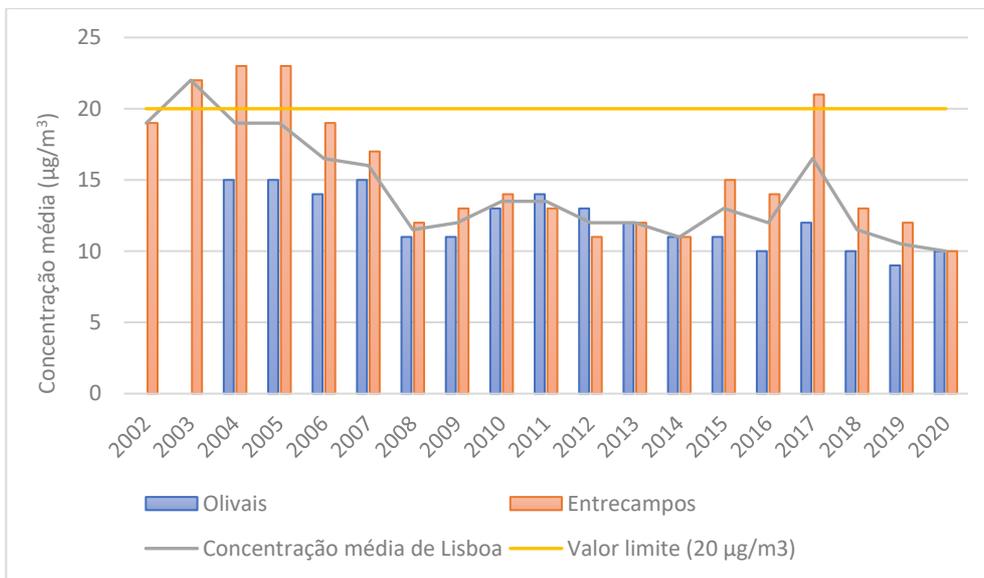


Figura 3.21- Evolução da concentração média anual de PM<sub>2.5</sub>, para as estações localizadas em Lisboa.

Fonte: (APA, 2021b)

### 3.1.4.5 Ozono (O<sub>3</sub>)

Na Figura 3.22, observa-se a evolução das concentrações médias anuais, entre o ano de 2001 e 2020. Observa-se que a média, apesar de apresentar algumas oscilações, tem sido praticamente constante, ao longo das duas décadas. Em 2013 observou-se a concentração média mais elevada (67 µg/m<sup>3</sup>), na estação do Restelo e em 2001 a mais baixa (30 µg/m<sup>3</sup>), em Entrecampos.

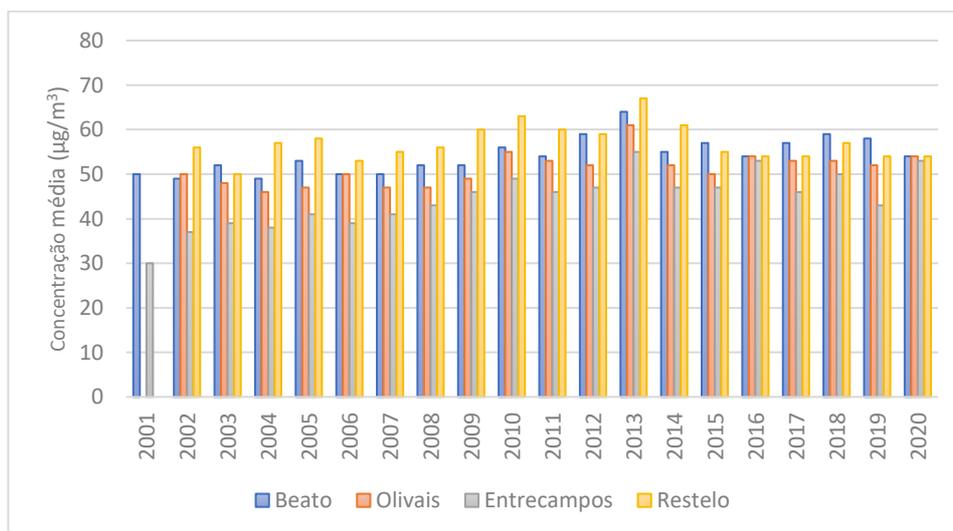


Figura 3.22- Evolução das concentrações médias anuais ozono troposférico, nas estações de Lisboa.

Fonte:(APA, 2021b)

Na Figura 3.23, na Figura 3.24 e na Figura 3.25, observam-se os números de dias com ultrapassagens do limiar de informação ao público, as excedências ao Objetivo de Longo Prazo e ao valor alvo, respetivamente. Registaram-se algumas excedências ao limiar de informação e ao objetivo de longo

prazo, nos períodos em que se verificaram condições meteorológicas propícias à formação deste poluente. O valor alvo nunca foi atingido.

Não é possível verificar uma tendência de evolução muito clara destes eventos. Não obstante disso, parece haver uma ligeira tendência de decréscimo destas situações episódicas. Verifica-se também que as ultrapassagens ao limiar de informação O<sub>3</sub> ocorreram em maior número no período entre 2003 e 2006 e no ano de 2013.

Sendo que a formação do ozono depende, não só das suas substâncias precursoras, como também das condições meteorológicas — elevada radiação solar e vento fraco —, não é detetada uma tendência de evolução das suas concentrações. Segundo o Relatório do Estado do Ordenamento do Território de Lisboa, verifica-se que em anos em que o verão foi mais quente ocorreu um maior número de ultrapassagens aos limiares de informação e de alerta (CML, 2015).

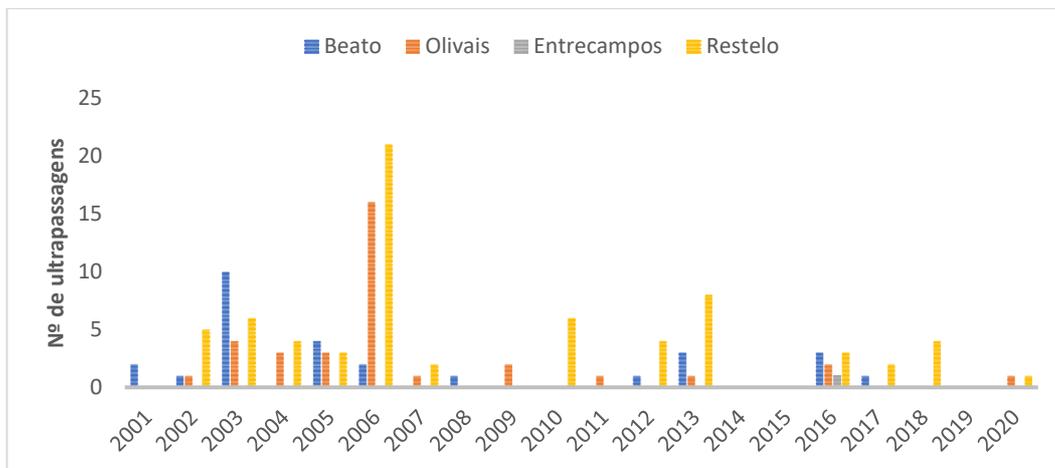


Figura 3.23- Ultrapassagem ao limiar de informação ao público, nas estações de Lisboa (Beato, Olivais, Entrecampos e Restelo). N.º de médias horárias > 180 µg/m³.

Fonte: (APA, 2021b)

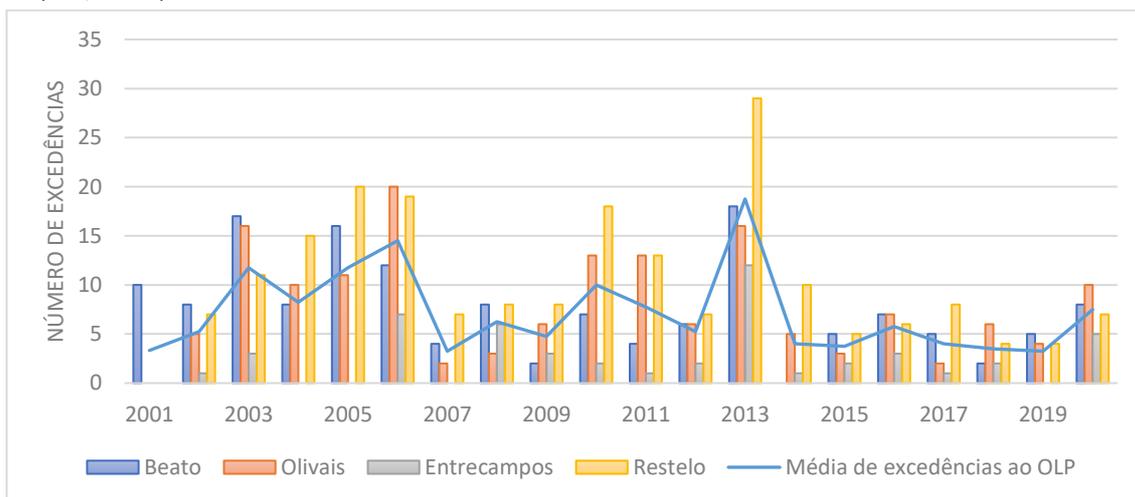


Figura 3.24- Excedências ao Objetivo de longo Prazo (OLP).

Fonte: (APA, 2021b)

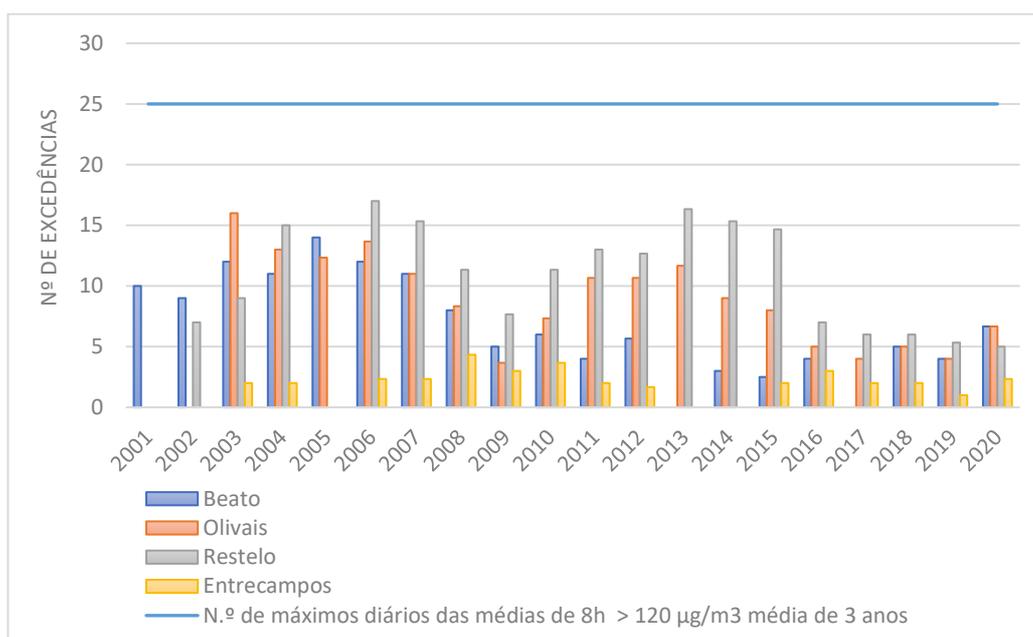


Figura 3.25- Excedências ao valor alvo (n.º de máximos diários das médias de 8h > 120 µg/m³ média de 3 anos)  
 Fonte: (APA, 2021b)

### 3.1.4.6 Síntese

De um modo geral verifica-se que a qualidade do ar na cidade de Lisboa tem melhorado significativamente na última década, verificando-se um decréscimo das emissões da grande parte dos poluentes. Tem-se, portanto, verificado um aumento do número de dias com índice QualAr "Bom" e uma diminuição da quantidade de dias com classificação "Fraco" e "Mau". Não obstante disso, observam-se ainda concentrações elevadas de PM<sub>10</sub> e NO<sub>2</sub>, sobretudo nas zonas de maior tráfego, como é o exemplo da Avenida da Liberdade.

## 3.1.5 Instrumentos de melhoria da qualidade do ar

### 3.1.5.1 Planos de Melhoria da qualidade do ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo

Nos termos do disposto no Decreto-Lei n.º 276/99, de 23 de julho, alterado pelo Decreto-Lei n.º 279/2007, de 6 de agosto (CCDR LVT, 2022b; DRE, 2008), que transpunha a Diretiva 96/62/CE de 27 de setembro de 1996, relativa à avaliação e gestão da qualidade do ar, estabelece que as CCDR, nas zonas e aglomerações em que os níveis de um ou mais poluentes são superiores ao valor-limite (acrescidos da margem de tolerância), devem elaborar e aplicar planos de melhoria de qualidade do ar, destinados a fazer cumprir o valor-limite dentro do prazo fixado (CCDR LVT, 2022b; DRE, 2010).

Assim sendo, a CCDR LVT elaborou em 2005 o primeiro Plano de Melhoria da Qualidade do Ar na Região de Lisboa e Vale do Tejo (PMQA-LVT) para o período de avaliação 2001-2004, o qual foi aprovado pela Portaria n.º 715/2008, de 6 de agosto. Este plano, aplicável às aglomerações da Área Metropolitana de Lisboa Norte, Área Metropolitana de Lisboa Sul e Setúbal — áreas onde se registaram

níveis de PM<sub>10</sub> e NO<sub>2</sub> superiores aos valores limite, acrescidos da respetiva margem de tolerância —, visou avaliar e propor um conjunto de medidas, a implementar a curto-médio prazo, destinadas a fazer cumprir os valores limite nessas zonas (CCDR LVT, 2022b).

O PMQA-LVT serviu de base à elaboração do respetivo Programa de Execução (PExec PMQA-LVT), que foi aprovado pelo Despacho Conjunto n.º 20763, publicado em 16 de setembro de 2009. Neste programa foram selecionadas as medidas do PMQA-LVT a adotar, foram definidas as ações a realizar para a sua concretização, a respetiva calendarização, quais as entidades responsáveis pela execução dessas ações, bem como os indicadores para avaliar a sua eficácia (CCDR LVT, 2022b).

Para a elaboração deste programa foi formada uma equipa intersectorial, que reuniu os responsáveis pela política de ambiente, transportes, indústria, proteção civil e também da administração local (DRE, 2009).

Da diversidade de políticas e medidas (P&M), a ênfase foi dada ao sector dos transportes, em particular a medidas destinadas à redução de emissões provenientes do tráfego rodoviário. Como consequência, a maioria das medidas deste programa de execução é orientada para este sector. As medidas enquadraram-se em dois tipos: de âmbito municipal — concretizadas em grande parte pela administração local —, de âmbito supramunicipal — envolvendo a concretização da medida mais do que um município — e, frequentemente, entidades da administração central (DRE, 2009).

Algumas das Políticas e Medidas (P&M) são (DRE, 2009):

- **Gestão e acalmia do tráfego:** introdução de "zonas 30"; introdução de uma Zona de Emissões Reduzidas (ZER); criação de Vias de Alta Ocupação (VAO), conjugadas com corredores bus e circulação de veículos elétricos (VAO+BUS+E); pedonalização de determinadas rodovias/zonas;
- **Otimização e melhoria do desempenho ambiental de veículos e frotas:** renovação parcial de frotas (CARRIS, Transtejo, CP e veículos pesados de passageiros); abate de veículos com reduzido desempenho ambiental; incentivo à instalação de filtros de partículas em veículos pesados de mercadorias; aquisição de veículos movidos a combustíveis alternativos;
- **Promoção da utilização dos transportes coletivos:** criação de estacionamento gratuito ou com tarifação reduzida junto a interfaces de Transporte Coletivo (TC); introdução do passe 4\_18@escola.pt e sub23@superior.pt; introdução/extensão de infraestruturas de Transporte Coletivo Ferroviário (TCF) e/ou rodoviários (corredores BUS); renovação das centrais de gestão de pedidos de serviço de táxis;
- **Promoção de "modos suaves" de mobilidade:** criação/ampliação de ciclovias;
- **Gestão de oferta e procura de estacionamento:** redução do número disponível de lugares de estacionamento; aumento do esforço de fiscalização do estacionamento ilegal;
- **Promoção e sensibilização ambiental:** campanhas e cursos de ecocondução; campanhas de sensibilização ambiental dedicadas à problemática da qualidade do ar;

- **Outros tipos de P&M:** Alargamento das áreas dedicadas a espaços verdes; desenvolvimento de projetos de partilha de veículo (*carpooling* ou *carsharing*); aumento da frequência de lavagem das ruas; planos de deslocações escolares e/ou *pedi-bus*.

Tendo em conta que o calendário de implementação das medidas constantes do PExec PMQA-LVT abrangeu o período 2005-2012, no ano de 2013 foi efetuada a avaliação final deste processo, tendo por base a monitorização anual da implementação das medidas adotadas.

No dia 4 de fevereiro, foi publicada a Portaria n.º 116-A/2019, que aprova o segundo “Plano de Melhoria da Qualidade do Ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo para as partículas finas (PM<sub>10</sub>) e NO<sub>2</sub> nas aglomerações da Área Metropolitana de Lisboa Norte e da Área Metropolitana de Lisboa Sul”. Este plano foi elaborado em cumprimento do disposto no Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro, tendo em conta as situações de incumprimento aos valores limite destes poluentes ocorridas no período entre 2011 e 2014 (CCDR LVT, 2022b).

Neste plano foram incluídas um conjunto preexistente de medidas —definidas no âmbito de outras estratégias — que deveriam ser implementados até ao ano de 2020, constituindo estas o **cenário base**, bem como, um conjunto de medidas propostas que, conjuntamente com as medidas do cenário base, constituem o **cenário projetado** (DRE, 2019; Ferreira et al., 2017).

#### Algumas das P&M preexistentes ou parcialmente em implementação:

- Aumento do esforço de fiscalização associado à ZER da cidade de Lisboa;
- Regulação da circulação de veículos afetos à atividade de animação turística na cidade de Lisboa, em particular os triciclos, quadriciclos e ciclomotores (onde os denominados “*tuk-tuks*” se incluem);
- Alterações infraestruturais relevantes na cidade de Lisboa na oferta associada à mobilidade Intra concelhia;
- Melhoria do desempenho ambiental de frotas cativas e de gestão pública;
- Medidas de promoção da mobilidade elétrica;
- Medidas de promoção da transferência modal para os Transportes Coletivos, baseadas em preços de bens e serviços.

#### Algumas das P&M propostas no âmbito deste PMQA:

- Reforço da exigência associada à ZER da cidade de Lisboa;
- Introdução de Planos de Mobilidade para empresas e grandes polos geradores de deslocações na cidade de Lisboa e, em particular, na sua ZER
- Revisão do enquadramento das operações de Cargas e Descargas da cidade de Lisboa, promovendo operações logísticas mais eficazes e com melhor desempenho ambiental;
- Fomento de boas práticas para reduzir emissões atmosféricas de partículas em suspensão, resultantes da construção e demolição de edifícios e de infraestruturas;

- Introdução de um Plano de Informação e Comunicação sobre qualidade do ar, ambiente e mobilidade;
- Sensibilização sobre qualidade do ar e mobilidade;
- Introdução de um Plano de Medidas SOS para dias em que se prevejam episódios de poluição atmosférica na RLVT.

#### Áreas de estudo futuro

- Promoção do estudo de áreas com informação insuficiente e potencial impacte relevante em termos de emissões atmosféricas na RLVT.

Após a aprovação deste Plano, e de acordo com o disposto no Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro, o PMQA deveria ter sido concretizado sob a forma do respetivo Programa de Execução, contendo as medidas de execução obrigatória (DRE, 2019).

#### **3.1.5.2 Implementação da ZER em Lisboa**

Das várias P&M apresentadas no primeiro PMQA, uma das mais relevantes foi a criação de uma ZER na cidade de Lisboa, com o objetivo de se fazer cumprir com as conformidades legais de qualidade do ar na RLVT. O grupo de trabalho multissetorial que conduziu o desenvolvimento desta medida foi constituído pelas seguintes autoridades: Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR); CCDR -LVT; Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DCEA — FCT/UNL); CML; Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres (IMTT); Gabinete do Secretário de Estado do Ambiente (GSEA) (DRE, 2009).

A ZER em Lisboa, que regula a circulação de veículos em duas zonas centrais da cidade, foi implementada por etapas, tendo em conta tanto a área geográfica afetada, a tipologia e desempenho ambiental dos veículos abrangidos, com base nas normas Euro. Ao longo das etapas, foi-se alargando gradualmente a sua área, e tornada mais exigente em 2012 (2ª fase) e em 2015 (ano da implementação da 3ª e fase em vigor), incluindo mais tipos de veículos —por exemplo, revogando a isenção para autocarros de transporte público —, e adotando requisitos mais rigorosos em termos de normas mínimas de emissão necessárias para aceder à ZER (Ferreira et al., 2015).

A fiscalização destas restrições é efetuada manualmente, pelas entidades policiais competentes (Polícia de Segurança Pública e Polícia Municipal), mediante a verificação da matrícula e do documento único automóvel. Segundo o PMQA da RLVT (Ferreira et al., 2017), apesar das melhorias na qualidade do ar sentidas aquando da implementação desta ferramenta de gestão de tráfego, esta apresenta ainda muito potencial por explorar. Uma das P&M apresentadas neste PMQA foi no sentido de potenciar um aumento do esforço de fiscalização associados à ZER de Lisboa, pelo que é considerado insuficiente.

A ZER inclui 2 zonas diferenciadas, que incluem cerca de um terço da área central e ribeirinha da cidade. Mais informações relativas às fases e áreas da ZER encontram-se abaixo, em anexo.

### 3.1.5.3 Aumento da cobertura espacial de monitorização em tempo real

A cidade desenvolveu uma complexa rede de sensores locais para cumprir o seu objetivo de poluição zero. A cidade pode agora monitorizar indicadores de qualidade ambiental como qualidade do ar, ruído, tráfego e condições climáticas graças a 80 estações de monitorização e 650 sensores. Esta rede foi criada e construída para receber e analisar dados para decisores, prestadores de serviços operacionais e estratégicos, juntas de freguesia, *stakeholders*, investigadores e residentes (Oladini et al., 2022).

Cada indicador ambiental tem o seu próprio mecanismo de alerta na rede — com base em valores ou limites nacionais. A referida rede está alojada na Plataforma de Gestão Inteligente de Lisboa (PGIL), uma plataforma integrada de gestão inteligente da cidade que centraliza, organiza e analisa dados de diversas fontes em todo o meio urbano da cidade. Os dados estão disponíveis em tempo real e já atraíram muitos utilizadores internos e externos: funcionários municipais, cidadãos, investigadores e outras entidades privadas (Oladini et al., 2022).

Os dados podem ser obtidos através do site de dados aberto "Lisboa Aberta" da Câmara Municipal de Lisboa, uma facilidade de partilha gratuita de dados criada pela autarquia e administrada por um parceiro externo. Esta procura melhorar o envolvimento público, promover a partilha e utilização de dados, enfatizar o investimento em tecnologias de informação e comunicação e facilitar a replicação (Oladini et al., 2022).

Lisboa criou também um sistema de indicadores para a emissão de avisos e notificações para importantes métricas ambientais, bem como alarmes sonoros quando os níveis de limiar são ultrapassados. O objetivo é sensibilizar os cidadãos para as ameaças ambientais e a sua gravidade, bem como coordenar a reação do município, através de uma app, *Microsoft Power BI* (Oladini et al., 2022).

O projeto teve um custo total de 349 900 Euros e é apoiado pela CML e cofinanciado pelo projeto *Sharing Cities* (20 000€) do programa de investigação e inovação horizonte 2020 da União Europeia ao abrigo do Acordo de Subvenção nº 691895.

A seleção da localização dos pontos da rede de sensores, teve por objetivo monitorizar a diversidade de espaços com características ambientais diferentes, representativas de todo o concelho e com uma distribuição homogénea. Para selecionar as localizações das estações dos sensores, foram seguidos alguns critérios: uma grelha com o espaçamento de 2x2km, os requisitos do projeto *Sharing Cities*, os limites das freguesias e da ZER, áreas com potencial resposta climática homogénea, a carta de uso e ocupação do solo, a rede viária proximidade a fontes de poluição entre outros critérios (CML, 2021b; Oladini et al., 2022).



Figura 3.26- Sensores da rede de monitorização complementar de qualidade do ar de Lisboa.

Fonte:(CML, 2021c)

Os sensores alojados nas oitenta estações medem os parâmetros de qualidade do ar —CO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> —, ruído, meteorologia — temperatura, humidade, pressão, intensidade e direção do vento, precipitação — e tráfego — número de veículos e classes (CML, 2021b).

O principal objetivo da rede de sensores de Lisboa é definir a qualidade do ar, o ruído e o clima urbano da cidade, monitorizar os indicadores ambientais em tempo real e dar dados adicionais para complementar as redes oficiais de qualidade do ar e de monitorização meteorológica. Lisboa tem como objetivo utilizar os dados da rede para atualizar o mapa estratégico do ruído da cidade, bem como as previsões climáticas e meteorológicas locais — descrevendo as condições de base atuais e as futuras alterações climáticas em 2030 e 2050. Será colocado um foco na validação de uma investigação urbana de ilhas de calor, bem como nos padrões de vento e nas tendências hidrológicas, na distribuição de poluentes atmosféricos e na avaliação de soluções para minimizar as emissões excessivas de NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> e PM<sub>2.5</sub> (Oladini et al., 2022).



Neste capítulo explicar-se-ão quais foram os dados utilizados, a redução do âmbito do estudo, as ferramentas que foram utilizadas e (ainda) como foi o processamento dos dados. Na Figura 4.1, é possível observar a metodologia adotada para o presente estudo.

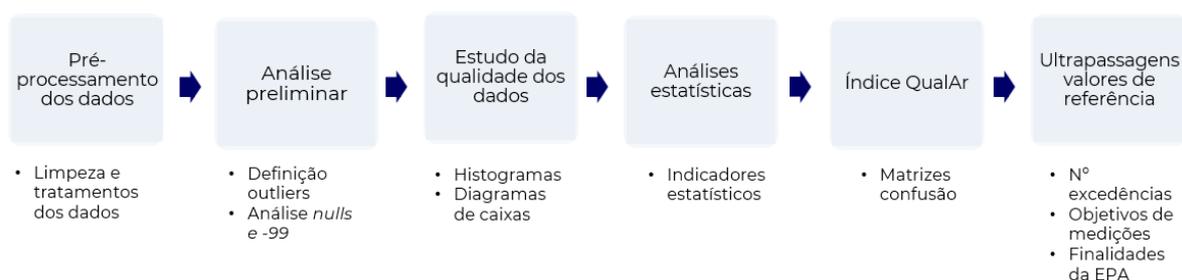


Figura 4.1- Resumo da metodologia adotada para o presente estudo

## 4.1 Dados utilizados

Para este estudo foram utilizados dados das estações fixas da rede oficial de estações da Agência Portuguesa do Ambiente (APA), mais concretamente da RMQA LVT, e dados disponibilizados pelos sensores de qualidade do ar da rede de monitorização da CML, também localizados nessas estações. Foram utilizados os dados referentes aos seguintes poluentes: CO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> e O<sub>3</sub>.

Os dados disponibilizados pelos sensores de qualidade do ar consistem em medições executadas no âmbito do recente projeto de monitorização de parâmetros ambientais, de qualidade do ar, ruído, tráfego e estado do tempo, da CML (CML, 2021c).

Esta rede de monitorização tem como principal objetivo mapear a cidade de Lisboa em tempo real, ao nível destes indicadores, na modalidade de “*sensing as a service*”, na ótica da utilização destes dados para apoiar a tomada de decisões políticas em matérias de tráfego, urbanismo e monitorização contínua, em termos da legislação existente para qualidade do ar e ruído (Lisboa Aberta, 2022). O investimento nesta rede de sensores, tem também como objetivo complementar a calibrada rede existente de estações fixas de medição de qualidade do ar (APA/CCDR-LVT) e das estações meteorológicas (IPMA), garantindo a operabilidade entre redes, e também, aumentar o número de estações e parâmetros controlados (CML, 2021a).

Esta rede, que entrou em funcionamento em março de 2021, é constituída por um total de 677 sensores para os diversos parâmetros ambientais, distribuídos por oitenta estações, sendo que 381 são para monitorizar a qualidade do ar. Estes encontram-se localizados predominantemente em

postes de iluminação pública (CML, 2021b; Lisboa Aberta, 2022). Os parâmetros a serem monitorizados são: PM<sub>2.5</sub> e PM<sub>10</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, O<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, nível sonoro contínuo equivalente (LAeq), pressão atmosférica, humidade relativa, vento forte, precipitação forte, temperatura, radiação global, radiação ultravioleta e tráfego médio pública (CML, 2021b; Lisboa Aberta, 2022).

Todos os dados recolhidos encontram-se disponibilizados publicamente aos cidadãos, sendo atualizados em tempo real, no portal Lisboa Aberta. Estes dados obtidos em tempo real, embora permitam ter conhecimento de tendências ambientais, não deverão ser diretamente comparáveis com as observações obtidas nas redes de referência, mencionadas anteriormente.

Para este estudo, utilizaram-se os dados referentes a Restelo, Avenida da Liberdade, Entrecampos, Olivais e Santa Cruz de Benfica (SC Benfica), como é possível observar na Figura 4.2 (representados pelos círculos com maiores dimensões), relativos ao período entre 1 de setembro de 2021 e 25 de maio de 2022, ou seja, praticamente 9 meses de dados.

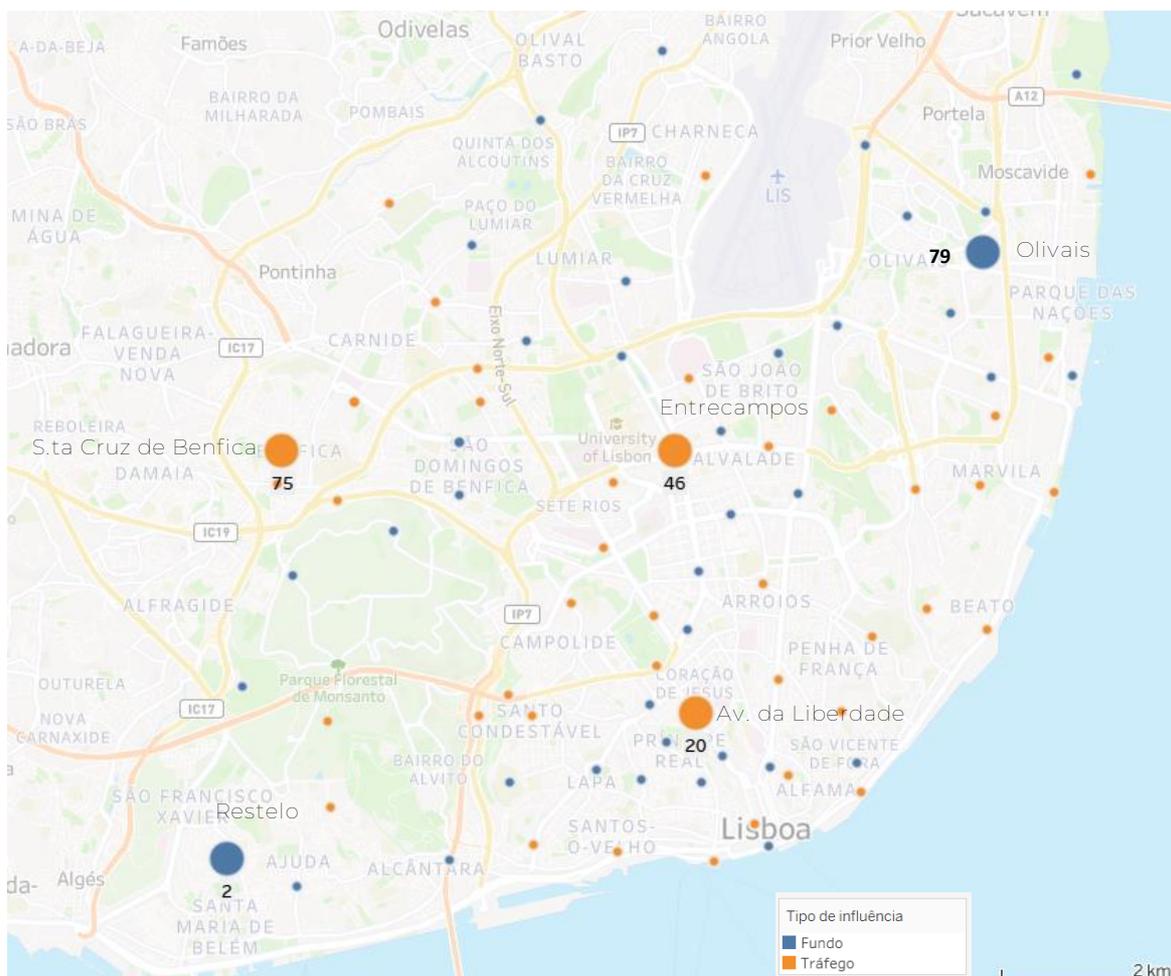


Figura 4.2- Localização das estações da rede de monitorização em estudo

Na Tabela 4.1, é possível observar o ID da estação dos dados relativos às estações fixas da rede de monitorização de qualidade do ar, a respetiva localização, tipo de influência e ambiente, altitude e

poluentes monitorizados. Na Tabela 4.2 é possível observar os *Ids*, as localizações dos sensores, os poluentes monitorizados por cada um deles e a empresa que efetuou a instalação do sensor. Esta rede de monitorização pelos sensores trata-se de um serviço fornecido pelo consórcio MEO/MONITAR/QART (CML, 2021b), tendo sido instalada por duas empresas nacionais, a QART e a MONITAR. As estações foram repartidas equitativamente por ambas.

Tabela 4.1- ID da estação, localização, influência, ambiente, altitude e poluentes monitorizados

ID	Localização	Influência	Altitude (m)	Poluentes monitorizados									
				PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NO	CO	O <sub>3</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	SO <sub>2</sub>	Pb Ni Cd As in PM <sub>10</sub>
3087	Restelo	Fundo	143		x	x	x	X	x	x		x	
3075	Avenida da Liberdade	Tráfego	44		x	x	x	X	x				
3072	Entrecampos	Tráfego	86	x	x	x	x	X	x	x	x	x	
3071	Olivais	Fundo	32	x	x	x	x	X	x	x	x	x	
3100	Santa Cruz de Benfica	Tráfego	76	x	x	x	x	X	x	x	x	x	x

Tabela 4.2-Localização dos sensores, parâmetros medidos, empresa que instalou os sensores e tipo de estação

ID da estação	Localização	Empresa da instalação	Parâmetros monitorizados						
			PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>2</sub>	NO	CO	O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>
2	Restelo- Rua Gonçalves Velho Cabral	QART	x	x	x	x	x	x	x
20	Avenida da Liberdade- Rua Manuel Jesus Coelho	MONITAR	x	x	x		x	x	
46	Entrecampos	MONITAR	x	x	x		x	x	x
79	Olivais- Avenida Doutor Francisco Luís Gomes/EMQA	MONITAR	x	x	x	x	x	x	
75	Santa Cruz de Benfica- Alameda Padre Álvaro Proença	MONITAR	x	x	x		x	x	x

Relativamente aos dados dos sensores, os valores disponibilizados correspondem às médias horárias obtidas, tendo por base valores médios de períodos de 15 minutos. A CML disponibilizou um documento para este estudo, que discrimina algumas características técnicas dos sensores. Em termos de computação, estes sensores são constituídos por múltiplos processadores RISC e funcionam com

um sistema em tempo real (QARTOS). Em termos de comunicação, apresentam uma tecnologia GSM 2G/3G/4G e uma atualização a cada 60 segundos.

Na Tabela 4.3 e na Tabela 4.4, é possível observar os termos da medição dos parâmetros de qualidade do ar, o tipo de sensor/método de medição adotado para cada parâmetro — e a respectiva gama de medição, sendo que os parâmetros correspondem aos poluentes monitorizados, o tipo de sensor corresponde à tecnologia utilizada, e a gama corresponde à gama de valores alcançado pelo respectivo sensor.

Tabela 4.3- Parâmetros atmosféricos medidos, tipo de sensor e gama de medição dos micro sensores

Parâmetros monitorizados	Tipo de sensor	Gama de medição ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
CO	Sensor eletroquímico	5 a 20 000
NO <sub>2</sub>	Sensor eletroquímico	5 a 1 000
PM <sub>10</sub> e PM <sub>2,5</sub>	Sensor ótico	5 a 500
O <sub>3</sub>	Sensor eletroquímico	5 a 500

Tabela 4.4- Parâmetros atmosféricos medidos pelas estações, método de medição e gama de medição

Parâmetros monitorizados	Método de medição	Gama de medição ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
CO	Fotometria de infravermelhos	0 a 100
NO <sub>2</sub>	Quimioluminescência	0 a 500
PM <sub>10</sub> e PM <sub>2,5</sub>	Método de absorção por radiação beta	0 a 200
O <sub>3</sub>	Fotometria de ultravioleta	0 a 500

## 4.2 Redução do âmbito

Para selecionar os poluentes que seriam analisados ao longo deste trabalho, fez-se uma correspondência entre os parâmetros monitorizados pelas estações fixas e pela rede de sensores, para as respectivas localizações. Deste modo, foram excluídos desta análise: NO<sub>x</sub>, NO, o SO<sub>2</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> e Pb Ni Cd As in PM<sub>10</sub>. Os poluentes avaliados foram cinco: NO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO e O<sub>3</sub>, como se pode observar na Tabela 4.5.

Tabela 4.5- Localização das estações em estudo e poluentes avaliados em cada estação

ID	Marca	Localização	Poluentes avaliados				
			NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
2	QART	Restelo	x	X			
20	MONITAR	Avenida da Liberdade	x		x		x
46	MONITAR	Entrecampos	x	X	x	x	x
79	MONITAR	Olivais	x	x	x	x	x
75	MONITAR	Santa Cruz Benfica	x		x		x

### 4.3 Pré-Processamento dos dados

Para efetuar a avaliação dos sensores de qualidade do ar da rede de monitorização da CML, efetuou-se um processamento dos dados, com o objetivo de retirar informação não utilizável das séries temporais e de perceber quais seriam os conjuntos de sensores que reuniam condições e dados suficientes para serem alvo de uma avaliação detalhada, tendo em conta os diferentes poluentes e localizações. Para este processamento, seguiu-se a sequência apresentada na Figura 4.3.

Primeiramente, foi feito um diagnóstico dos dados a ser avaliados, extraídos dos sensores da Rede de Monitorização de Lisboa (RML), como dos dados de referência para o estudo, extraídos das estações da RMQA. De seguida, organizaram-se os dados das medições dos sensores (Ms) e das medições das estações (Me) e retirou-se do *dataset* todos os "-99" e posteriormente, as medições consideradas "outliers". Estes "-99" tratam-se, portanto de valores impossibilitados de serem registados ou que se encontram indisponíveis. Após este pré-processamento, obteve-se os conjuntos de dados processados e prontos a ser avaliados e utilizados para o estudo.

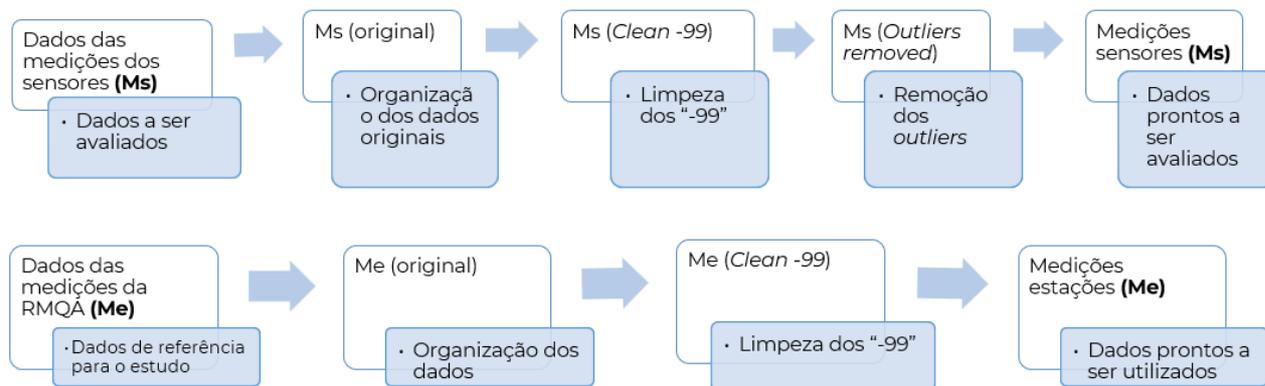


Figura 4.3-Resumo esquemático do processamento dos dados

### Remoção dos *Outliers*

*Outliers* são pontos de dados que se encontram distanciados dos outros pontos de dados. Estes podem ser gerados por uma variedade de fatores, incluindo falhas de sensores, problemas de conectividade de rede ou até condições extremas de poluição atmosférica (Ottosen & Kumar, 2019).

Nesta fase realizou-se um estudo para identificar os *outliers* do conjunto de dados, pelo que se chegou a dois tipos distintos de grupos de *outliers*: *out of range* — os dados que se encontravam fora de um domínio que foi estabelecido para cada poluente —, e ainda os por variação excessiva — quando a diferença absoluta entre dois dados consecutivos era superior a um determinado valor, conforme o poluente em estudo. Deste modo, todos os valores que se encontravam ou fora do domínio ou ultrapassavam a variação máxima estabelecida foram considerados *outliers* e consequentemente foram considerados valores nulos (*nulls*).

Para definir o domínio de valores para cada poluente, estabeleceu-se o limiar inferior tendo em conta o limite da gama dos sensores de cada poluente, e o limiar superior tendo em conta uma discussão com o orientador desta dissertação, Professor Doutor Francisco Ferreira, especialista em qualidade do ar, que definiu os valores pelo que seria um limiar superior aceitável e com margem, para cada poluente.

Para a definição dos *outliers* por variação excessiva, considerou-se a diferença absoluta máxima, entre dois dados consecutivos de todas as localizações, para cada poluente, relativamente aos dados das estações. Os valores definidos para a definição de *outliers* estão disponíveis na Tabela 4.6.

Tabela 4.6- Definição dos outliers: *out of range* e variação excessiva

	Tipo de outlier		
	Out of range		Variação excessiva
Parâmetro	Limiar inferior	Limiar superior	Diferença absoluta entre dois dados consecutivos
PM <sub>10</sub>	5 µg/m <sup>3</sup>	550 µg/m <sup>3</sup>	180
PM <sub>2,5</sub>	5 µg/m <sup>3</sup>	100 µg/m <sup>3</sup>	40
O <sub>3</sub>	5 µg/m <sup>3</sup>	250 µg/m <sup>3</sup>	105
NO <sub>2</sub>	5 µg/m <sup>3</sup>	300 µg/m <sup>3</sup>	80
CO	0,005 mg/m <sup>3</sup>	5 mg/m <sup>3</sup>	1,5

### 4.3.1 Análise preliminar dos dados

Nesta etapa, efetuou-se uma análise à quantidade de dados disponíveis: *nulls* e valores impossibilitados de serem registados ou que se encontram indisponíveis (-99), por estação/ sensor, parâmetro e localização. Mais abaixo, no próximo capítulo serão demonstrados os resultados.

## 4.4 Estudo da qualidade dos dados

O *boxplot* de Tukey é uma ferramenta gráfica comumente utilizada, que permite visualizar a distribuição de conjuntos de dados univariados e detetar possíveis *outliers* (Gijbels & Hubert, 2009; Wilcox, 2003).

Nos histogramas de frequência, a gama de dados é dividida em várias classes que são uniformemente espaçadas para criar um histograma. Este tipo de visualização exhibe os valores da variável medida no eixo horizontal e nas frequências — ou seja, o número de medições — que ficam associados a cada classe do eixo vertical. A eficácia da representação é influenciada pelo número de classes, pelo que deve ser tomada alguma atenção a esta componente (Li Vigni et al., 2013).

Para o estudo em vigor, com o objetivo de perceber a distribuição dos dados, bem como a sua frequência e distribuição, realizaram-se gráficos de caixas e histogramas, tanto para os dados das estações, como para os sensores, para cada combinação de localização e parâmetro. No caso dos histogramas, utilizou-se a barra T, como estilo da barra de erro. Para esta análise, considerou-se os "*outliers*" máximos como valores máximos e não o valor do bigode que indica o 3º quartil.

Para avaliar a qualidade dos dados dos sensores, realizaram-se alguns estudos mais específicos. Primeiramente elaborou-se uma análise estatística, com recurso a diversos indicadores, para avaliar a relação entre os dados dos sensores e dados de referência — dados das estações —, para cada combinação de localização e parâmetro.

Para estudar de que modo as classes do índice QualAr entre os sensores e os dados das estações eram ou não coincidentes, realizou-se um estudo com matrizes confusão. Ainda no âmbito deste estudo, calcularam-se alguns indicadores de qualidade: o F1-Score, a precisão, sensibilidade e a exatidão.

Tendo em conta os valores-limite das concentrações de diversos poluentes do ar descritos no Decreto-Lei n.º 102/2010, fez-se um estudo para analisar a quantidade de ultrapassagens dos dados dos sensores.

#### 4.4.1 Análises estatísticas

Para efetuar a análise estatística do modelo de regressão linear simples e respetivos estudos de correlação entre os dados dos sensores e estações, para cada localização e parâmetro, utilizou-se o *software IBM SPSS Statistics* e o *software PAST*.

Na literatura existente são propostas várias metodologias de avaliação para o cálculo das estatísticas do desempenho dos modelos de dispersão atmosférica e/ou qualidade do ar — métodos que proporcionam uma forma abrangente e quantitativa de comparar os parâmetros físicos/químicos observados e previstos. Os parâmetros estatísticos geralmente utilizados para avaliar o desempenho de modelos são o viés médio/ *Mean Bias* (MB), o viés fracionário/ *Fractional Bias* (FB), o coeficiente de Correlação de Pearson (R), o erro quadrado médio de raiz/ *Root Mean Square Error* (RMSE) e o erro quadrado médio normalizado/ *Normalized Mean Square Error* (NMSE) (Sengupta et al., 2022).

Para os conjuntos de dados disponíveis foram utilizadas algumas destas medidas estatísticas para a respetiva comparação entre parâmetros, bem como alguns outros índices amplamente utilizados e aceites para comparações de dados. Foram então selecionadas as avaliações de desempenho de modelos mais comuns, reportados por Borrego et al., (2016); Emery et al., (2017); Simon et al., (2012), nomeadamente: Erro de preconceito médio/ *Mean Bias Error* (MBE), Coeficiente R, Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), Erro quadrado médio da raiz centrada/ *Centred Root Mean Square Error* (CRMSE), o RMSE, o NMSE, o FB, o Fator de Excedência/ *Factor of Exceedance* (FOEX), Erro Absoluto Médio/ *Mean Absolute Error* (MAE) e o parcial médio normalizado/ *Normalized Mean Bias* (NMB). Mais detalhes sobre estes indicadores podem ser observados na Tabela 6.4, disponível no anexo. De acordo com a Diretiva relativa à qualidade do ar da UE, a incerteza da medição deve ser o indicador primário utilizado para avaliar o objetivo de qualidade dos dados dos métodos de medição da poluição atmosférica, pelo que também se considerou esse indicador, bem como a eficiência da recolha.

As métricas dadas nas mesmas unidades que as medições — métricas absolutas — são o MBE, o CRMSE, RMSE e MAE. O **MBE** quantifica a tendência do modelo para subestimar ou sobrestimar, bem como a magnitude do erro (Simon et al., 2012). O **CRMSE** é definido como uma métrica de avaliação operacional alternativa, que compara os coeficientes de correlação com desvios padrão na variabilidade prevista e observada. Os diagramas de Taylor podem ser utilizados para retratar graficamente estas relações. O **RMSE** é um dos indicadores estatísticos mais utilizados em qualidade do ar. Este

fornece uma boa medida global de quão perto os valores modelados estão dos valores previstos (Okafor et al., 2020; Simon et al., 2012). Por fim, o **MAE**, indica a média da magnitude dos erros, não indicando a direção do erro (Borrego et al., 2018). Um valor mais baixo tanto do MAE como do RMSE indica uma boa relevância de modelos (Okafor et al., 2020).

As métricas absolutas têm a desvantagem de tornar complexas as interpretações das comparações do desempenho do modelo para diferentes ambientes, ou entre diferentes poluentes. Consequentemente, gamas de métricas relativas são frequentemente utilizadas neste tipo de análises. Estas métricas são apresentadas em unidades fracionadas ou percentuais, sendo o caso do  $R^2$ , o NMSE, o FB, o FOEX e o NMB, no presente estudo.

O **NMSE** dá a estimativa dos desvios globais entre medições de referência e sensores. É um indicador estatístico muito sensível a valores extremos. A média das concentrações observadas e modeladas é utilizada para normalizar o enviesamento e o erro em FB e FOEX. O **FB** representa uma medida do acordo entre as concentrações médias medidas e as medições de referência. Já o **FOEX** mede a estimativa superior ou inferior das medições em estudo, dando uma perspetiva da tendência para a sobrestimação e subestimação, relativamente aos valores de referência. A métrica do enviesamento FB e FOEX é preferida por alguns investigadores porque é simétrica em torno de 0. Os valores possíveis do FB variam entre -200 e +200% e os do FOEX entre -50% e +50%, sendo que -50% significa a clara tendência para a subestimação e +50%, o oposto (Emery et al., 2017; Simon et al., 2012).

O **NMB** é benéfico para comparar poluentes em escalas de concentração, sendo que o enviesamento médio é normalizado dividindo-se pela concentração medida (Carslaw & Ropkins, 2012). Quando as métricas de enviesamento e de erro se aproximam de zero e o coeficiente de determinação se aproxima de um, o desempenho é o ideal. No entanto, o acordo perfeito para qualquer métrica nem sempre é indicativo de um bom desempenho do modelo. Ao avaliar o desempenho do modelo, devem ser consideradas várias métricas. Além disso, o desempenho perfeito não é possível porque as observações estão sujeitas a técnicas de medição e incertezas de abordagem analítica. Não se pode esperar que os modelos atinjam uma precisão para além da incerteza das medições dos instrumentos (Emery et al., 2017).

Para o cálculo da incerteza de medição, considerou-se o presente no Decreto-Lei 102/2010 para a incerteza associada às medições indicativas e estimativas objetivas: "é definida como o desvio máximo entre as concentrações medidas e calculadas, no período em causa, em relação ao valor limite (ou valor alvo no caso do ozono), independentemente da cronologia das ocorrências" (DRE, 2010). Para o cálculo da eficiência da recolha, considerou-se como o total de referência, o número de dados horários que seriam de esperar para o período em estudo, neste caso,  $N=6408$ .

Para facilitar a análise dos indicadores estatísticos, construiu-se uma visualização por parâmetro, com recurso ao software Tableau, que contempla 3 indicadores:  $R^2$  (eixo das ordenadas), FOEX (eixo das coordenadas) e NMSE (dimensão do círculo), para as diversas localizações.



## 4.4.2 Índice QualAr

Para avaliar a qualidade da classificação da correspondência entre os índices de qualidade do ar, dos dados das estações, e dos sensores, efetuou-se uma análise com os dados horários, através de matrizes confusão. Para a discussão dos resultados, selecionou-se o parâmetro  $\text{NO}_2$ , na Avenida da Liberdade como exemplo demonstrativo do tipo de análise que foi elaborado para cada uma das matrizes confusão. Todas as restantes matrizes e tabelas com os respetivos valores de exatidão, precisão, sensibilidade e F1-score, para cada uma das combinações de parâmetro e localização, estão disponíveis em anexo.

A matriz de erro — vulgarmente referida como a matriz de confusão — é um conceito usado principalmente para a categorização e classificação estatística. Esta é uma espécie de tabela de contingência, que contém informação sobre classificações reais e previstas/estimadas.

Uma matriz de confusão tem duas dimensões: uma dimensão indexada pela classe real de um objeto, e outra indexada pela classe que o classificador prevê/estima. Cada coluna da matriz reflete o valor real/observado, e cada linha representa uma instância específica de um valor de previsão — ou vice-versa. A matriz é então composta por variáveis, que podem então ser classificadas como: verdadeiros positivos (VP), verdadeiros negativos (VN), falsos positivos (FP) e falsos negativos (FN), sendo que:

- Os VP indicam que tanto o valor real como o valor previsto são positivos;
- Os VN indicam que o valor real é positivo, mas o valor previsto é negativo;
- Os FP revelam que o valor real é negativo, mas o valor previsto é positivo;
- Os FN demonstram que tanto o valor real como o valor previsto são negativos.

Na Figura 4.4 é possível observar uma representação do *layout* de uma matriz confusão (Das et al., 2022; Deng et al., 2016).

Para efeitos de teste da importância estatística, as hipóteses são classificadas pela forma como descrevem a diferença esperada entre os grupos de estudo. A hipótese nula ( $H_0$ ), afirma que não há associação entre as variáveis de previsão e os resultados na população. Esta hipótese é a base formal para testar significâncias estatísticas (Banerjee et al., 2009; Johnson & Gregory, 2019; Nisbet et al., 2009).

Erros do tipo I e do tipo II podem afetar os resultados das análises estatísticas. A rejeição imprópria de uma verdadeira hipótese nula é referida como um erro do tipo I — um falso positivo — ou seja, a conclusão de que existe uma associação quando verdadeiramente não existe nenhuma. Por outro lado, aceitar a hipótese nula, quando efetivamente existe uma verdadeira associação é um erro do tipo II — um falso negativo (Banerjee et al., 2009; Johnson & Gregory, 2019; Nisbet et al., 2009).

		Valores observados	
		P	N
Valores previstos	P	VP	FP
	N	FN	VN

Figura 4.4- Representação do layout de uma matriz confusão.

Adaptado de (Das et al., 2022)

Com base na matriz de confusão, uma série de métricas de desempenho de classificação podem ser estabelecidas:

- A exatidão (ACC) é a proporção do número total de previsões que estavam corretas (Deng et al., 2016):

$$ACC = \frac{VP+VN}{VP+VN+FP+FN} \quad (\text{Equação 9})$$

- A precisão (P) é um rácio, que varia entre 0 e 1, entre os positivos verdadeiras e o número total de positivos previstos. Esta medida foca-se em erros tipo I (FP), sendo que uma baixa precisão (<0,5), significa que o classificador tem um número alto de falsos positivos. É definida por (Bajaj, 2019; Deng et al., 2016):

$$P = \frac{VP}{VP+FP} \quad (\text{Equação 10})$$

- A sensibilidade (Sn) é um rácio, que varia entre 0 e 1, entre os positivos verdadeiros (TP) e todos os positivos (TP e FN). Acaba por ser uma medida da capacidade de um modelo de previsão, para selecionar instâncias de uma determinada classe a partir de um conjunto de dados. Esta medida foca-se em erros tipo II (FN), sendo que valores próximos de 1 significam que o modelo não perdeu praticamente nenhum positivo verdadeiro e que valores baixos, significam que o classificador tem um número alto de falsos negativos. Esta medida é definida pela seguinte equação (Bajaj, 2019; Deng et al., 2016):

$$Sn = \frac{VP}{VP+FN} \quad (\text{Equação 11})$$

- O F1-Score é a média harmónica entre a precisão e a sensibilidade. Um valor alto de F1-Score significa que existe um bom balanço entre a precisão e a sensibilidade. Por outro lado, um F1-Score baixo significa praticamente nada. Significa que dos casos que foram identificados como casos positivos, obteve-se poucos corretos. não sendo possível identificar se o modelo sofre de erros tipo I ou tipo II. Esta medida é definida pela seguinte equação (Bajaj, 2019; Deng et al., 2016):

$$F1 - score = 2 \times \frac{P \times Sn}{P + Sn} \quad (\text{Equação 12})$$

### 4.4.3 Ultrapassagens dos valores de referência

A ultrapassagem de valores de referência — em particular de valores-limite estabelecidos na legislação — é um aspeto fundamental a avaliar no desempenho dos sensores. Uma diferença significativa entre **dados com recurso a um método de monitorização de referência** e a um **instrumento de medição alternativo**, com resultados diferentes, impede uma correta avaliação de situações de concentrações mais elevadas e críticas em termos de impacte para a saúde pública. Para se perceber a quantidade de ultrapassagens dos dados dos sensores relativamente aos valores de referência de qualidade do ar presentes no Decreto-Lei n.º 102/2010, fez-se um estudo que consistiu na análise das séries temporais para cada poluente e localização através do software *Tableau Desktop*.

Para cada série temporal adicionou-se uma linha constante com o valor alvo, valor-limite ou limiar de informação de acordo com o poluente em causa. De seguida, contabilizou-se o número de excedências. No caso do parâmetro O<sub>3</sub> e do CO, definiu-se uma fórmula que calculava a média máxima para os períodos octohorários, nas respetivas séries temporais. No caso do PM<sub>10</sub>, efetuou-se a média diária dos dados da série temporal e no caso do NO<sub>2</sub>, utilizaram-se os dados horários.

Foi também feita uma avaliação dos objetivos de qualidade dos dados, tendo em conta os valores de incerteza e taxa mínima de recolha de dados, definido no Decreto-Lei n.º 102/2010, com o objetivo de perceber que tipo de avaliação poderia ser feita, considerando os dados dos sensores, se medições indicativas ou se estimativas objetivas. Por fim, foi feita uma breve análise das áreas de aplicação dos sensores de baixo custo, considerando os valores recomendados pela *Environmental Protection Agency* (EPA) para a precisão, erro de enviesamento e eficiência de recolha dos dados.

Para a discussão dos resultados, selecionou-se o parâmetro NO<sub>2</sub>, na Avenida da Liberdade como exemplo demonstrativo do tipo de análise que foi elaborado para cada das combinações de poluente e localização. Todas as restantes figuras com as séries temporais e estudo das ultrapassagens aos valores limites, bem como as tabelas com os respetivos valores médio horários, máximos horários, eficiência de recolha e incerteza, estão disponíveis em anexo.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados relativos à análise preliminar dos dados, ao estudo de qualidade dos dados, às análises estatísticas com recurso a diversos indicadores, às correspondências com o índice QualAr e ainda, às ultrapassagens aos valores de referência.

### 5.1 Análise preliminar dos dados

A Tabela 5.1 apresenta a eficiência da recolha dos dados dos sensores e das estações, por localização e poluente. É possível verificar que a quantidade de dados relativos às medições das estações (identificados com Me), são praticamente constantes para cada estação e poluente, variando entre 5 861 (91%) e 6 408 (100%) horas de registo, de um total de 6 408 horas em causa. A estação com menor quantidade de dados disponíveis localiza-se no Restelo, no parâmetro NO<sub>2</sub>. Das 18 combinações possíveis entre localizações e poluentes, nenhuma apresenta a totalidade dos dados disponíveis, para o período em estudo.

No que toca aos dados dos sensores, é possível verificar uma variância superior da quantidade de dados, das várias combinações de poluentes e localizações. As contagens variam entre 2 314 (36,1%) e 6 164 (89,1%), do total de 6 408 horas em estudo. O sensor com menor quantidade de dados localiza-se em Entrecampos relativamente ao parâmetro PM<sub>2.5</sub>. Por outro lado, o sensor com maior quantidade de dados localiza-se em Olivais, relativamente ao parâmetro CO e NO<sub>2</sub>. Nenhum dos sensores apresenta a totalidade dos dados horários, para o período em estudo. É então possível verificar uma diferença significativa entre a quantidade de dados disponíveis das estações e dos sensores.

Tabela 5.1- Eficiência da recolha dos dados dos sensores e das estações, por localização e poluente

Parâmetros	Localizações	N			Eficiência de recolha		
		Ms	Me	Total	Ms	Me	nMs/nMe
CO	AVL	5691	6325	6408	88,8%	98,7%	90,0%
	ENT	5682	6327	6408	88,7%	98,7%	89,8%
	OLI	5708	6164	6408	89,1%	96,2%	92,6%
	SCB	3301	6329	6408	51,5%	98,8%	52,2%
NO <sub>2</sub>	AVL	5672	6331	6408	88,5%	98,8%	89,6%
	ENT	5666	6326	6408	88,4%	98,7%	89,6%
	OLI	5654	6328	6408	88,2%	98,8%	89,3%
	RES	4862	5861	6408	75,9%	91,5%	83,0%
	SCB	2679	6276	6408	41,8%	97,9%	42,7%
PM <sub>10</sub>	AVL	5693	6247	6408	88,8%	97,5%	91,1%
	ENT	4040	6289	6408	63,0%	98,1%	64,2%
	OLI	5680	6095	6408	88,6%	95,1%	93,2%
	SCB	3009	6372	6408	47,0%	99,4%	47,2%
PM <sub>2.5</sub>	ENT	2314	6204	6408	36,1%	96,8%	37,3%
	OLI	4130	6353	6408	64,5%	99,1%	65,0%
O <sub>3</sub>	ENT	5555	6151	6408	86,7%	96,0%	90,3%
	RES	4842	6393	6408	75,6%	99,8%	75,7%
	OLI	2574	6370	6408	40,2%	99,4%	40,4%

Escala:



Analisando a Figura 5.1, relativa às contagens dos dados cuja medição não foi efetuada (valores indisponíveis, identificados como “-99”) e cujo valores foram impossibilitados de serem registados (valores identificados como “nulls”), tanto dos sensores como das estações, é possível verificar que os dados das estações apresentam uma quantidade de valor indisponíveis superior comparativamente com os dados dos sensores. Tendo em conta a Tabela 6.1 (em anexo), verifica-se que os dados das estações apresentam um total de N=1254 de valores impossibilitados de serem registados e os dos sensores, N=329. Esta diferença significativa deve-se ao facto de os sensores, na grande maioria das vezes, não assinalarem os valores impossibilitados de serem registados com a notação “-99”, sendo que frequentemente, estes não são de todo registados, contribuindo para um aumento significativo de *nulls*, por parte das suas medições.

Na Figura 5.1, é também possível observar a percentagem de *Nulls* identificados nos dados das estações e dos sensores, por localização e por poluente. Verifica-se que há uma maior incidência de *Nulls* nos dados dos sensores, nomeadamente na estação de Santa Cruz de Benfica para todos os parâmetros. Na Tabela 6.2 (em anexo), é possível observar as quantidades de *nulls* identificados para todas as localizações e parâmetros, em termos absolutos e relativos.

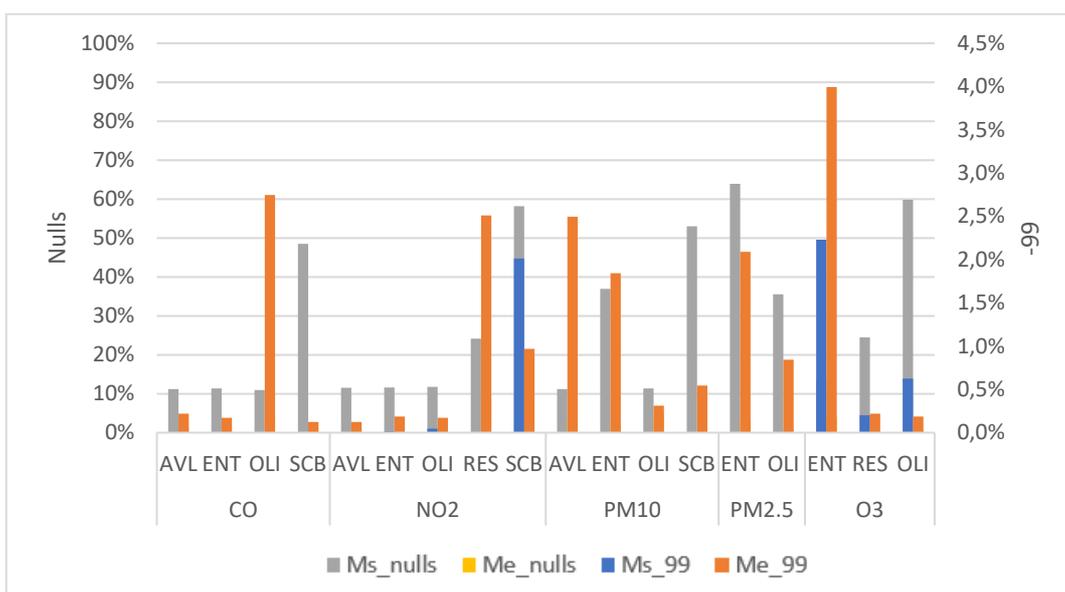


Figura 5.1- Percentagem dos valores impossibilitados de serem registados ou que se encontravam indisponíveis (-99) e de Nulls, nos dados dos sensores e das estações por localização e poluente

Através da Figura 5.2, é possível observar a percentagem de valores considerados atípicos (*outliers*), para cada poluente e localização. Verifica-se que o parâmetro PM<sub>2,5</sub>, em Olivais e em Entrecampos, são os que apresentam uma maior proporção de *outliers*, 79,6% e 60,6%, respetivamente. É também possível verificar que os dados relativos ao parâmetro CO e O<sub>3</sub> são os que apresentam menor quantidade de *outliers*, entre 0% e 0,2%, e entre 0 e 0,7%, respetivamente.

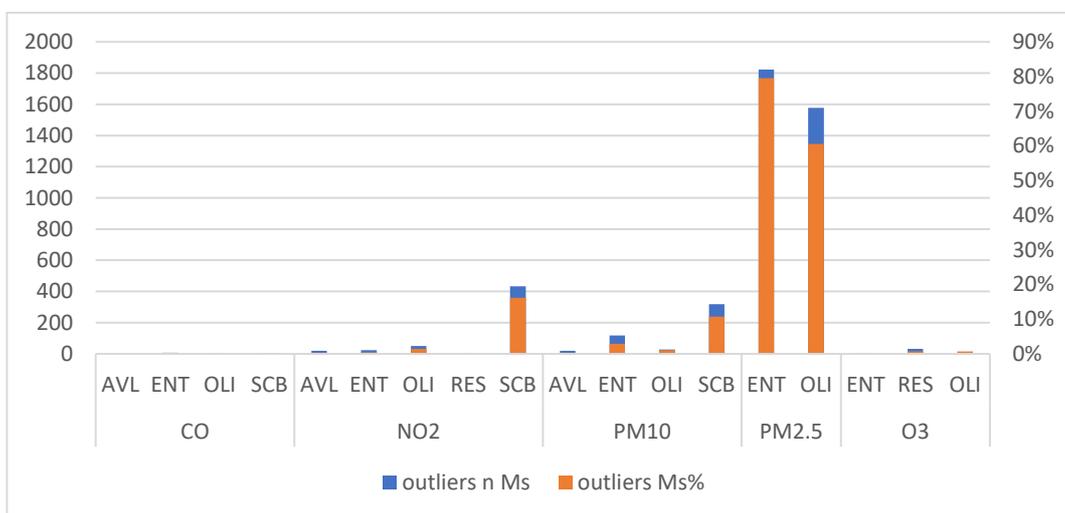


Figura 5.2- Contagem dos outliers identificados nos dados dos sensores por localização e poluente

Na Tabela 6.3 (em anexo) é possível observar a quantidade relativa e absoluta de *outliers* por tipologia, fora do domínio e diferença excessiva. Verifica-se que há uma maior quantidade de *outliers* por variação excessiva.

## 5.2 Estudo de qualidade dos dados

Uma vez que a descrição dos resultados seria muito repetitiva para as diferentes estações e localizações, optou-se por selecionar apenas um parâmetro de uma localização, como exemplo demonstrativo.

Para a discussão dos resultados, selecionou-se o parâmetro  $\text{NO}_2$ , na Avenida da Liberdade como exemplo demonstrativo do tipo de análise que foi elaborado para cada uma das combinações de poluente e localização. Embora Entrecampos seja a estação com melhor performance neste parâmetro — como será concluído com este estudo e respetivamente demonstrado ao longo dos próximos capítulos— selecionou-se a Avenida da Liberdade (também com boa performance neste parâmetro), para demonstrar algumas situações mais específicas que não são tão perceptíveis no estudo do sensor de Entrecampos.

Todos os restantes gráficos de caixas e histogramas de parâmetro e localização estão disponíveis em anexo.

### 5.2.1 Parâmetro CO

Na Figura 5.3 verifica-se que entre os dados dos sensores, o valor mínimo entre sensores não diverge significativamente. Por outro lado, os valores máximos divergem significativamente. Entre as medições de referência (Me), observa-se que os valores mínimos são todos iguais, e que os valores máximos são muito semelhantes entre os dados relativos a Entrecampos e a Santa Cruz de Benfica, e entre Avenida da Liberdade e Olivais.

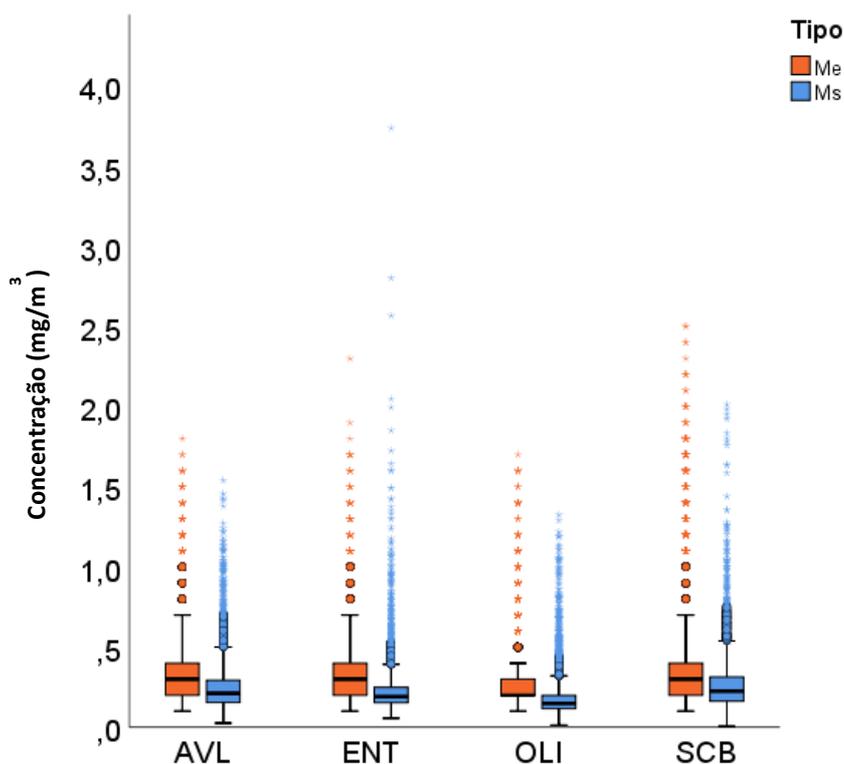


Figura 5.3- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro CO

No que concerne os desvios-padrões entre os dados das estações e dos sensores, por localização, é possível observar alguma homogeneidade, sendo que as Me, em regra, apresentam maior dispersão. Não obstante, e tendo em conta a regra prática, com base no desvio-padrão das subpopulações, explicado na metodologia, obteve-se uma razão  $S_{max}/S_{min}=3,53$ , pelo que os desvios padrões são considerados diferentes. Considerando os dados dos sensores, o sensor localizado em Entrecampos é o que apresenta maior variabilidade e o menor é o da estação de Olivais. No que concerne os dados das estações, a localização com maior variabilidade é a de Santa Cruz de Benfica, que apresentam uma diferença entre o valor máximo e mínimo superior às restantes. Tendo em conta a Tabela 5.2, verifica-se que as medianas se encontram próximas das médias respetivas.

No que toca à simetria, verifica-se que os dados dos sensores apresentam tendencialmente uma distribuição positiva e simétrica, com enviesamento para a esquerda e que os das estações apresentam uma distribuição negativa simétrica, com enviesamento para a direita, com exceção da de Olivais. Verifica-se que as medianas entre dados das estações e sensores são semelhantes, embora as dos sensores sejam sempre inferiores. Verifica-se também sobreposição entre as várias caixas.

Tabela 5.2- Resumo dos valores relativos aos gráficos de caixas, para o parâmetro CO. Todos os valores encontram-se com a unidade mg/m<sup>3</sup>, com exceção do N

		ENT		AVL		OLI		SCB	
		Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms
N	Omisso	0,2%	10,3%	0,2%	10,1%	2,9%	11%	0,2%	47,4%
Média		0,32	0,23	0,34	0,25	0,26	0,18	0,37	0,27
Mediana		0,31	0,19	0,32	0,21	0,20	0,15	0,31	0,23
Desvio-padrão		0,17	0,16	0,18	0,15	0,16	0,12	0,26	0,2

## 5.2.1 Parâmetro NO<sub>2</sub>

### Avenida da Liberdade

Na Figura 5.4, é possível observar os gráficos de caixas relativos ao parâmetro NO<sub>2</sub>, das medições de referência (Me) e das medições dos sensores (Ms), na Avenida da Liberdade. Verifica-se que o valor mínimo e máximo, para as Ms e para as Me, são 13 µg/m<sup>3</sup> e 239 µg/m<sup>3</sup>, e 1 µg/m<sup>3</sup> e 191 µg/m<sup>3</sup>, respectivamente — sendo que o gráfico de caixas das Ms apresenta uma maior dispersão do que o das Me. No que toca às medianas, observa-se que são díspares, sendo que a das Ms é 77 µg/m<sup>3</sup> e da Me é 46 µg/m<sup>3</sup>.

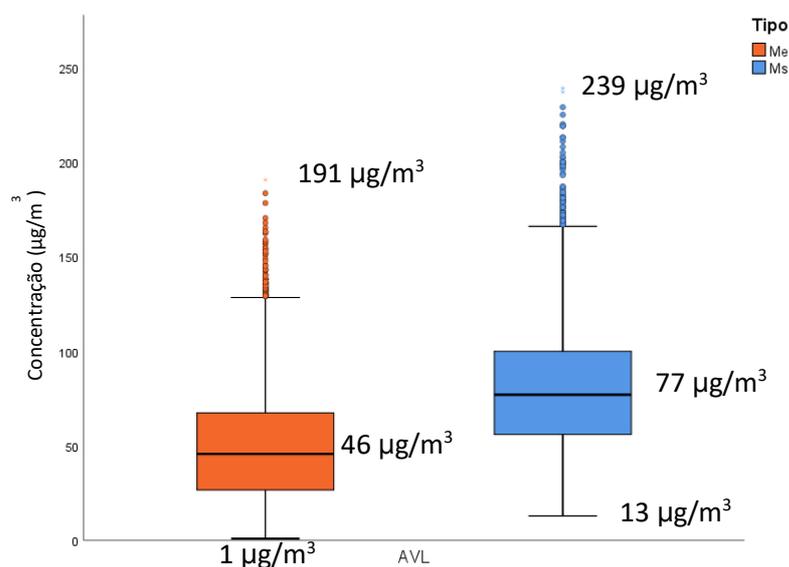


Figura 5.4- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro NO<sub>2</sub>, na Avenida da Liberdade

Completando a análise dos gráficos de caixas, com a observação dos histogramas relativos à frequência de dados das Ms e das Me (Figura 5.5 e Figura 5.6), verifica-se que as distribuições são simétricas positivas, podendo-se afirmar que apresentam uma distribuição praticamente normal.

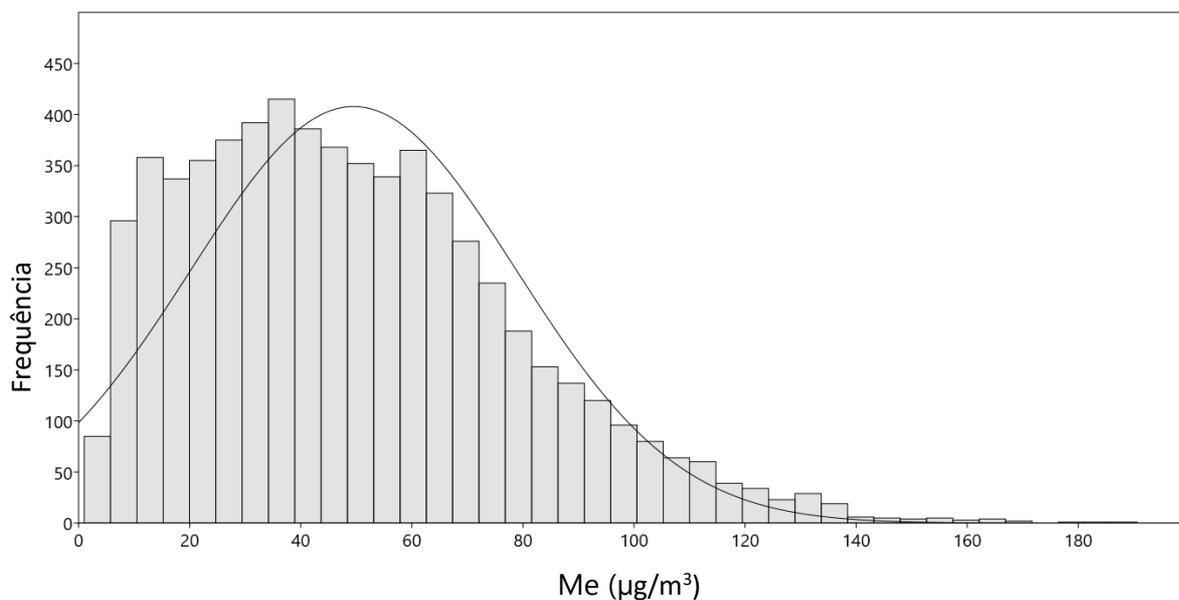


Figura 5.5- Histograma relativo ao parâmetro NO<sub>2</sub> das Me, na Avenida da Liberdade

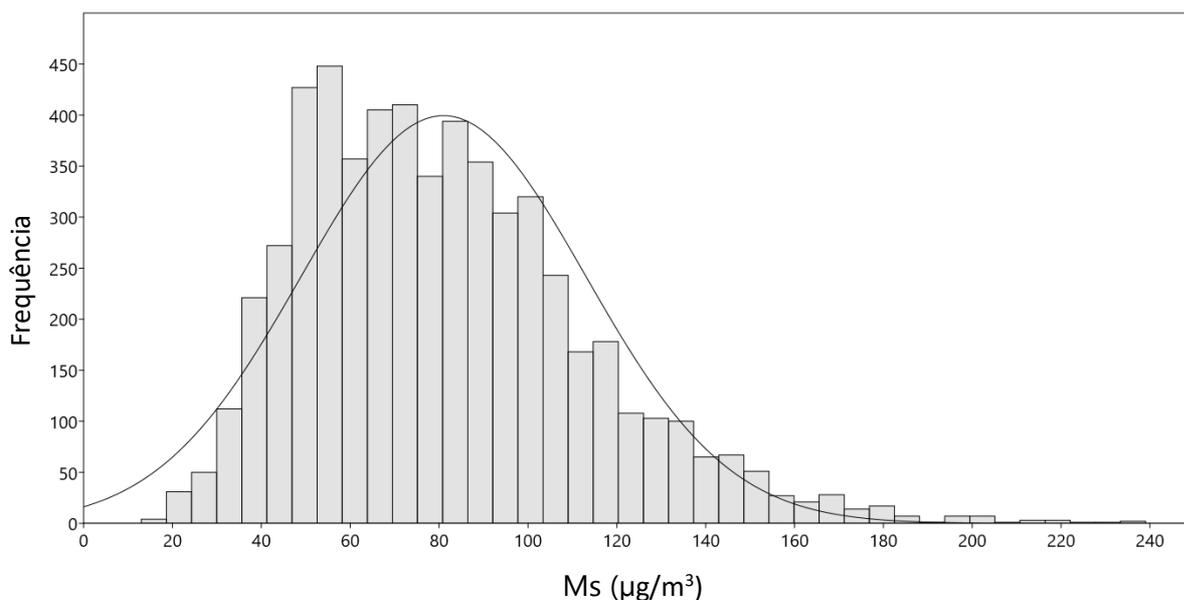


Figura 5.6- Histograma relativo ao parâmetro NO<sub>2</sub> das Ms, na Avenida da Liberdade

Analisando a Figura 5.7, pode-se concluir que o valor mínimo entre sensores é semelhante e que o máximo diverge significativamente. Observa-se que os valores máximos variam consideravelmente — à exceção do sensor de Santa Cruz de Benfica e Olivais, que são semelhantes, e os restantes também são entre si. Relativamente aos mínimos, são praticamente iguais.

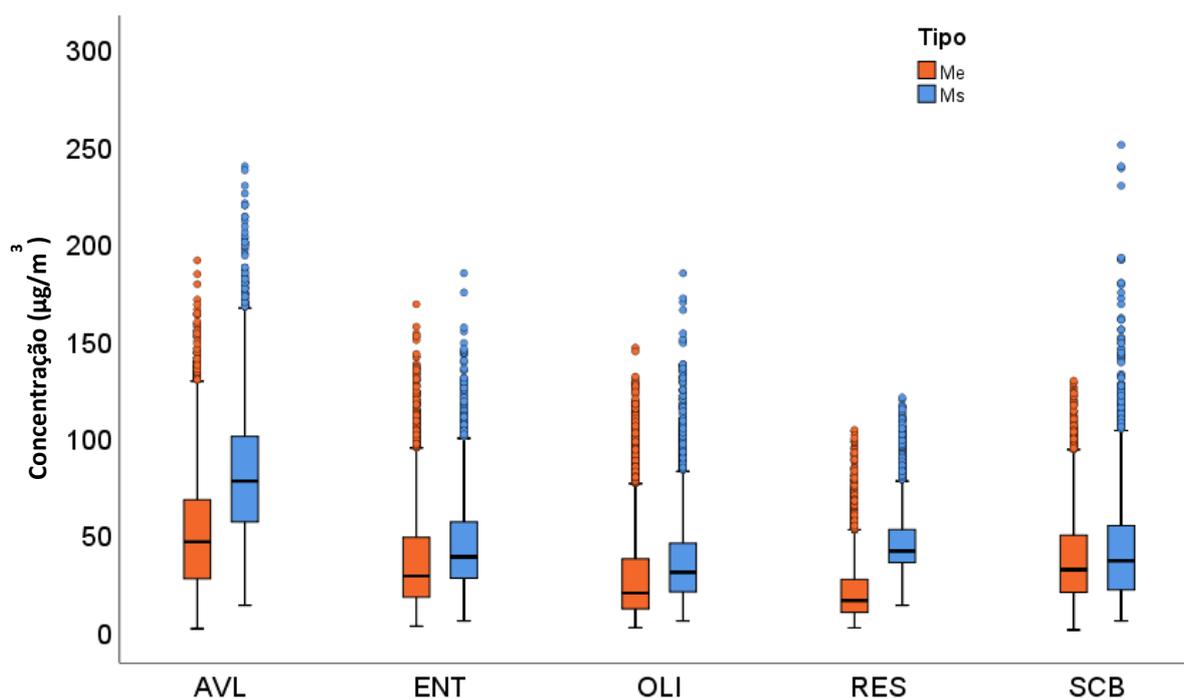


Figura 5.7- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro NO<sub>2</sub>

No que toca à simetria, verifica-se que todos os gráficos de caixas apresentam uma distribuição assimétrica positiva, com exceção do sensor da Avenida a Liberdade, que apresentam uma distribuição simétrica, aproximadamente normal. Verifica-se que só as medianas em Entrecampos e em Santa Cruz de Benfica entre estações e sensores são semelhantes. As restantes são díspares, sendo que para todos os casos, as medianas das medições dos sensores são normalmente superiores às medianas das medições de referência. Tendo em conta a Tabela 5.3, verifica-se que as medianas se encontram próximas das médias respetivas.

Em termos de dispersão, os dados dos sensores e de referência são distintos, denotando-se uma tendência para os dados dos sensores apresentarem maior frequência de medições para valores mais elevados. Considerando os dados dos sensores, verifica-se que dos sensores localizados em Santa Cruz de Benfica e na Avenida da Liberdade são os que apresentam maior dispersão. Já o sensor de Restelo é o que apresenta menor dispersão. No que concerne os dados de referência, a estação com superior dispersão e variabilidade é também na Avenida da Liberdade.

Tabela 5.3- Resumo dos gráficos de caixas relativo ao parâmetro NO<sub>2</sub>

		AVL		ENT		OLI		RES		SCB	
		Me	Ms								
<b>N</b>	<b>Omisso</b>	1,2%	11,6%	1,3%	11,8%	0,3%	11,8%	8,5%	24,5%	2,1%	58,3%
<b>Média</b>		49,5	81,0	35,2	43,6	27	35,6	20,5	45,8	36,1	41,5
<b>Mediana</b>		46	77	28	38	19	30	16	41	31	36
<b>Desvio-padrão</b>		29,3	32,0	24,5	23,1	21,6	22,4	15,9	16,9	21,9	29,8

## 5.2.2 Parâmetro PM<sub>10</sub>

Analisando a Figura 5.8, pode-se concluir que o valor mínimo entre sensores é semelhante e que os máximos divergem consideravelmente. Entre os dados das estações, observa-se que os valores máximos variam, mas que os mínimos são semelhantes. Entre os dados das estações e dos sensores, observa-se que os valores mínimos são semelhantes e que os máximos divergem entre si.

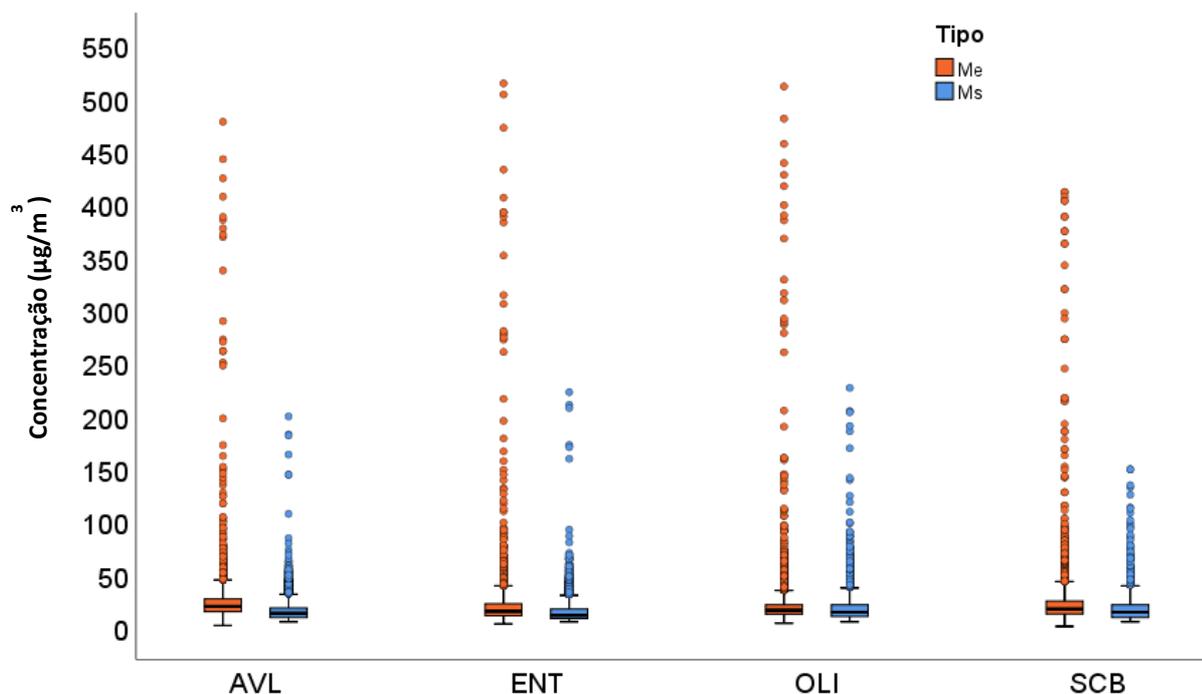


Figura 5.8- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM<sub>10</sub>

No que toca à simetria, verifica-se que os dados dos sensores e das estações apresentam tendencialmente uma distribuição assimétrica positiva, com enviesamento para a esquerda. Verifica-se que as medianas entre dados das estações são semelhantes e que há sobreposição das caixas. Por outro lado, as medianas dos dados dos sensores apresentam medianas ligeiramente distintas. Tendo em conta a Tabela 5.4, verifica-se que as medianas se encontram próximas das médias respectivas.

Pode-se verificar também que os dados das estações apresentam maior dispersão, relativamente aos dados dos sensores, sendo que as estações localizadas Entrecampos e Olivais são as que apresenta maior dispersão. As localizações com maior dispersão são também Entrecampos e Olivais.

Tabela 5.4- Resumo dos gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM<sub>10</sub>

		ENT		AVL		OLI		SCB	
		Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms
N	Omisso	1,9%	13,52%	1,9%	38,2%	0,3%	11,4%	0,6%	53,5%
Média		23,4	15,5	19,3	14,8	19,4	17,4	21,9	17,1
Mediana		20	13	15	11	16	14	17	14
Desvio-padrão		21,8	10,4	22,8	12,0	22,3	13,2	23,9	12,8

### 5.2.3 Parâmetro PM<sub>2.5</sub>

Analisando a Figura 5.9, verifica-se que entre os dados das estações, os valores máximos e mínimos não divergem significativamente. Entre os dados dos sensores, os valores mínimos são praticamente iguais, mas os máximos divergem significativamente. Entre os dados das estações e dos sensores, para a mesma localização, verifica-se que os valores máximos são significativamente diferentes, nomeadamente em Entrecampos.

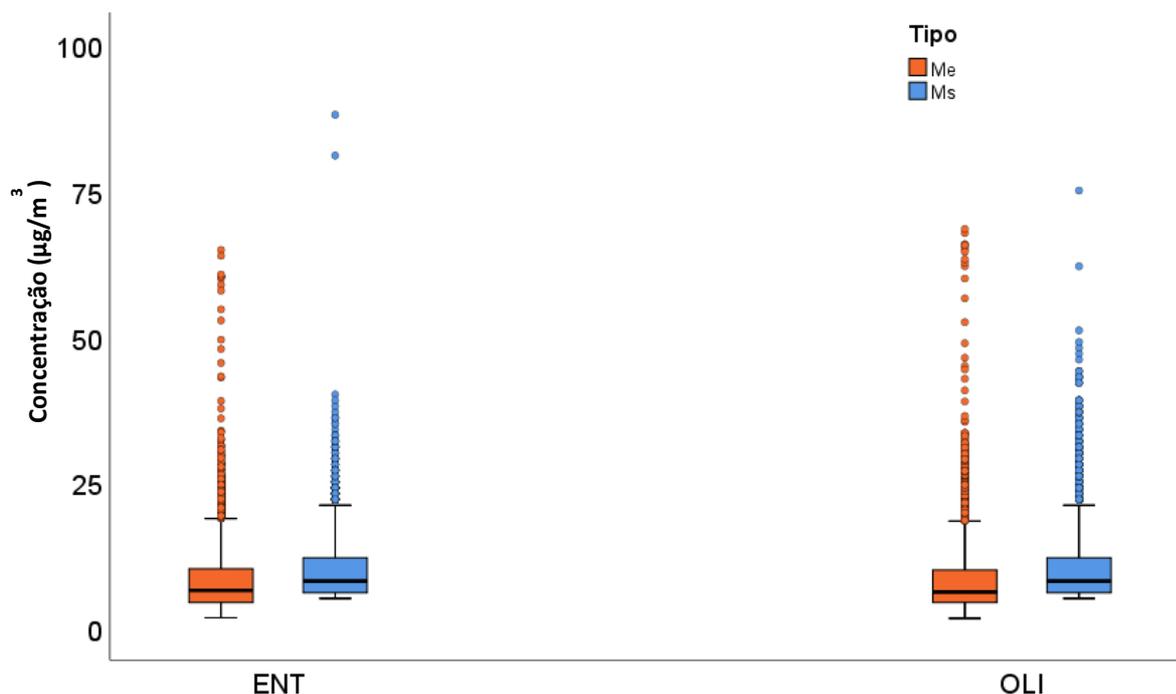


Figura 5.9- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM<sub>2.5</sub>

No que toca à simetria, verifica-se que os dados dos sensores e das estações apresentam uma distribuição positiva e assimétrica, com enviesamento para a esquerda. As medianas entre os dados dos sensores são iguais e entre os dados das estações são praticamente iguais. Tendo em conta a Tabela 5.5, as medianas encontram-se significativamente próximas das médias respetivas.

Através desta análise é possível observar que existe sobreposição entre as caixas, e que em termos de dispersão dos dados, o sensor localizado em Entrecampos é o que apresenta dispersão superior. No que concerne os dados das estações, a que apresenta maior dispersão de dados é a de Olivais.

Tabela 5.5- Resumo dos gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM<sub>2,5</sub>

		ENT		OLI	
		Me	Ms	Me	Ms
<b>N</b>	<b>Omisso</b>	3,2%	64,3%	0,9%	35,5%
<b>Média</b>		8,2	10,0	8,1	10,1
<b>Mediana</b>		6	8	6	8
<b>Desvio-padrão</b>		5,7	6,1	6,1	6,7

#### 5.2.4 Parâmetro O<sub>3</sub>

Analisando a Figura 5.10, pode-se concluir que o valor máximo entre sensores diverge significativamente. Entre os dados das estações, observa-se que os valores máximos divergem e que os mínimos são semelhantes. Entre os dados das estações e dos sensores, para a mesma localização, verifica-se uma diferença ligeira nos máximos e nos mínimos, — nomeadamente no Restelo— sendo que os dados dos sensores apresentam valores superiores aos das estações, em relação aos dados de referência, com a exceção do sensor da estação de Olivais, que apresenta um máximo inferior ao dos dados de referência.

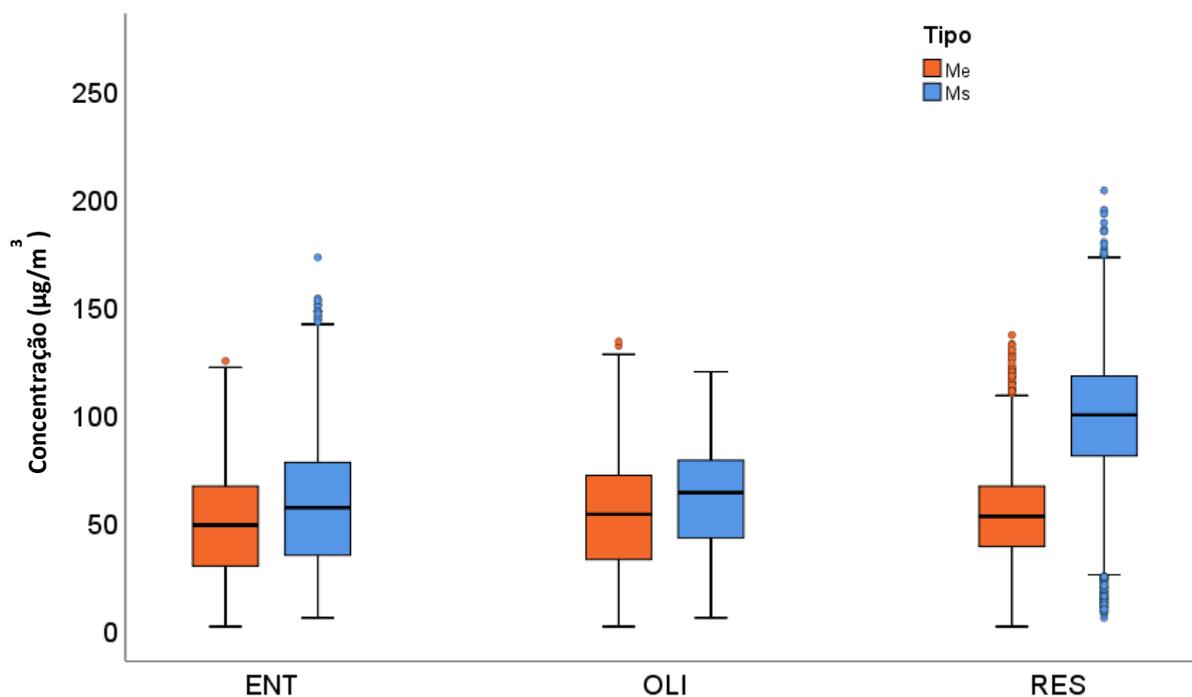


Figura 5.10-Gráficos de caixas relativos ao parâmetro O<sub>3</sub>

No que toca à simetria, verifica-se que os dados dos sensores e das estações apresentam uma distribuição praticamente simétrica, e com uma distribuição praticamente normal, à exceção da dos Olivais, que apresenta uma distribuição assimétrica e negativa, com enviesamento para a direita. Verifica-se que as medianas entre dados das estações são semelhantes e que há sobreposição das caixas. Por outro lado, as medianas dos dados dos sensores do Restelo apresentam medianas consideravelmente distintas dos restantes.

Pode-se verificar que os dados dos sensores apresentam maior dispersão, relativamente aos dados das estações, sendo que o sensor localizado no Restelo é o que apresenta maior dispersão. No que concerne os dados das estações, a localização com maior dispersão é a dos Olivais.

Tabela 5.6- Resumo dos gráficos de caixas relativos ao parâmetro O<sub>3</sub>

		ENT		RES		OLI	
		Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms
N	Omisso	4,0%	15,5%	0,2%	24,6%	0,6%	59,8%
Média		47,2	57,3	51,9	97,0	51	59,5
Mediana		48	56	52	99	53	63
Desvio-padrão		25,1	30,1	21,3	29,8	26,7	25,1

## 5.3 Análises estatísticas

### 5.3.1 Parâmetro CO

Tendo em conta a Tabela 5.7, relativa aos indicadores estatísticos para o parâmetro CO, os coeficientes de correlação entre os valores medidos pelos equipamentos de referência e os sensores demonstram uma relação moderada positiva, sendo que os coeficientes de determinação mais elevados são obtidos na Avenida da Liberdade e nos Olivais. Estes resultados são apoiados pelas parcelas de correlação (Figura 5.11).

Para os indicadores que permitem avaliar a tendência dos sensores para subestimar ou sobrestimar os dados de referência, nomeadamente o MBE, FOEX e FB, verifica-se que de uma forma geral este parâmetro está a ser subestimado em todas as estações, uma vez que se encontram com valores negativos. As estações de Olivais e da Avenida da Liberdade são as que se apresentam mais próximas de 0, o que indica uma superior medida do acordo entre os dados dos sensores e as medições de referência.

O sensor da Avenida da Liberdade apresenta o melhor desempenho para os indicadores estatísticos: R, R<sup>2</sup>, CRMSE, FB e NMB. Já o sensor dos Olivais, apresenta os melhores resultados para os indicadores MBE, NMSE, RMSE, FOEX e MAE. Os dois sensores apresentam assim um desempenho global semelhante.

O sensor de Santa Cruz de Benfica apresenta uma correlação baixa positiva, com um coeficiente de determinação de 28%, sendo este o coeficiente mais baixo. Este sensor é o que apresenta pior desempenho, em termos globais, uma vez que apresenta os resultados mais fracos para os indicadores R e R<sup>2</sup>, CRMSE, RMSE, MAE — que dão a indicação da magnitude do erro — FOEX, e MBE — que demonstram a forte tendência deste sensor para subestimar, em relação aos valores de referência.

Tabela 5.7- Indicadores estatísticos comparando os dados das Ms com os dados das Me, para o CO.

	Eficiência de recolha (%)	MBE (mg/m <sup>3</sup> )	R	R <sup>2</sup> (%)	CRMSE (mg/m <sup>3</sup> )	N	NMSE (%)	RMSE (mg/m <sup>3</sup> )	FB (mg/m <sup>3</sup> )	FOEX (%)	MAE (mg/m <sup>3</sup> )
AVL	89	-0,09	0,9	79%	0,13	5677	1,05	0,18	-0,62	-39	0,14
ENT	89	-0,09	0,7	49%	0,17	5675	1,40	0,21	-0,66	-43	0,15
OLI	89	-0,08	0,8	70%	0,13	5708	1,40	0,16	-0,72	-32	0,13
SCB	51	-0,10	0,53	28%	0,453	3298	2,57	0,53	-0,63	-50	0,51

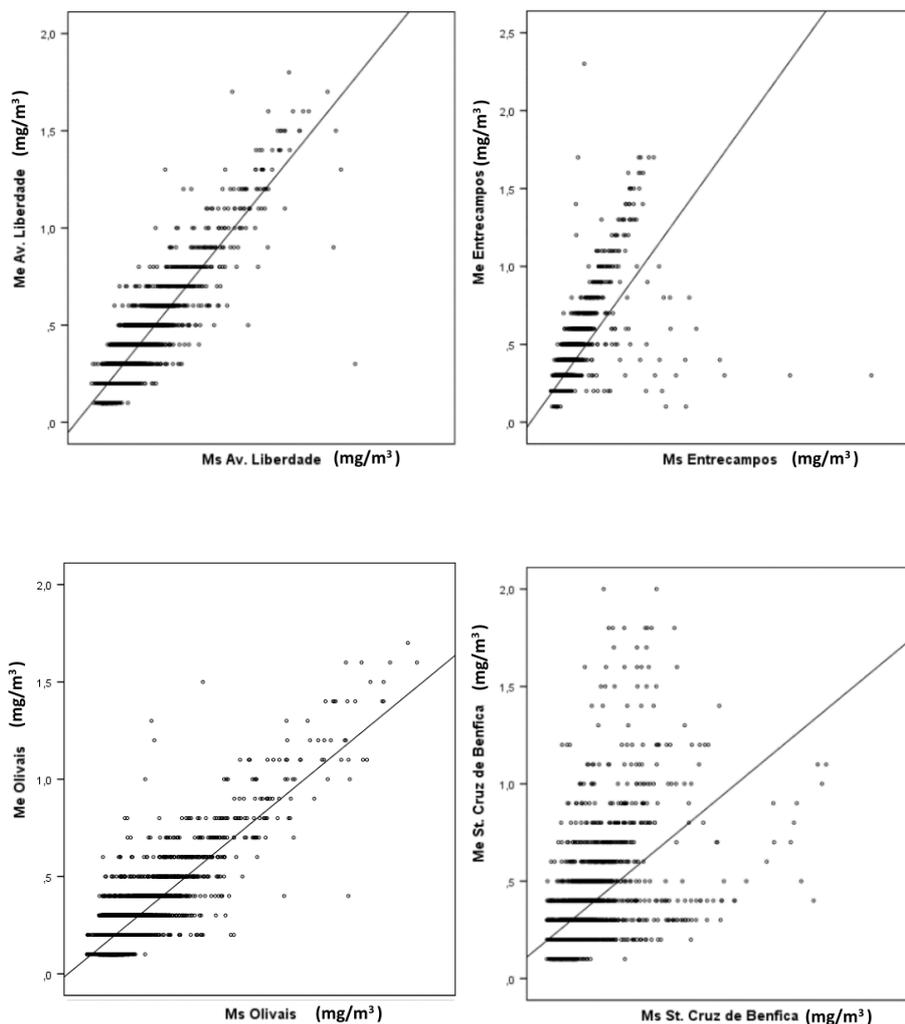


Figura 5.11- Medições dos sensores (Ms) vs. Medições das estações (Me) de referência para CO.

### 5.3.2 Parâmetro NO<sub>2</sub>

Tendo em conta a Tabela 5.8, relativa aos indicadores estatísticos para o parâmetro NO<sub>2</sub>, os coeficientes de correlação mais fortes são obtidos nos sensores de Entrecampos e da Avenida da Liberdade, com um  $R=0,9$ , o que significa que apresentam uma correlação forte positiva e um coeficiente de determinação alto, que indica que 80% da variância dos dados pode ser explicado pelo modelo linear ( $R^2=0,8$ ). Adicionalmente, o sensor de Entrecampos apresenta um MBE baixo, mas positivo. O sensor de Olivais demonstra uma correlação moderada positiva, com um coeficiente de determinação moderado, 51%.

Os sensores de Santa Cruz de Benfica e do Restelo apresentam uma correlação ínfima positiva, com um coeficiente de determinação de  $R^2=0,13$  e  $R^2=0,05$ , respetivamente. Os sensores da Avenida da Liberdade, Olivais e Restelo apresentam os valores FOEX mais elevados (acima de 35%), o que significa que estes sensores têm uma tendência superior para sobrestimar. O sensor de Santa Cruz de

Benfica apresenta o melhor indicador de FOEX (14%) e MBE (5,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), sugerindo a aproximação mais significativa com os dados de referência, no que toca à sobre/subestimação. Por outro lado, demonstra o pior desempenho em termos globais, uma vez que apresenta os valores absolutos mais altos para os indicadores estatísticos CRMSE, RMSE e MAE, que indicam o erro médio e qual o desvio relativamente aos dados de referência. O sensor da estação de Entrecampos, apresenta o melhor desempenho, visto que reúne os melhores resultados para o R,  $R^2$ , NMSE e NMB. De uma forma geral, e utilizando o FB, FOEX e MBE, é possível verificar que todos os sensores apresentam uma tendência global para a sobreestimação, uma vez que este conjunto de indicadores permitem estudar o enviesamento do erro, que neste caso é positivo.

Estes resultados são apoiados pelas parcelas de correlação (Figura 5.12) onde a Avenida da Liberdade e Entrecampos demonstram uma relação significativa com os dados das Me. Por outro lado, Olivais demonstra alguma dispersão dos valores, enquanto Santa Cruz de Benfica e o Restelo não demonstram praticamente nenhuma correlação, sugerindo possíveis não linearidades entre os dados dos sensores e os dados de referência.

Tabela 5.8- Indicadores estatísticos comparando os dados das Ms com os dados das Me, para o  $\text{NO}_2$

	<b>Eficiência de recolha (%)</b>	<b>MBE (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>R</b>	<b><math>R^2</math> (%)</b>	<b>CRMSE (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>N</b>	<b>NMSE (%)</b>	<b>RMSE (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>FB (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>FOEX (%)</b>	<b>MAE (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>
AVL	88	31,5	0,9	80	33,0	5666	0,85	39,86	0,91	49	37,52
ENT	88	8,4	0,9	80	21,7	5654	0,59	21,51	0,42	31	15,98
OLI	88	8,7	0,86	73	19,9	5654	0,59	19,98	0,54	36	15,55
RES	76	25,4	0,36	5	29,8	4839	1,16	33,38	1,33	43	29,48
SCB	42	5,3	0,23	13	61,8	2675	1,00	57,37	0,27	14	68,60

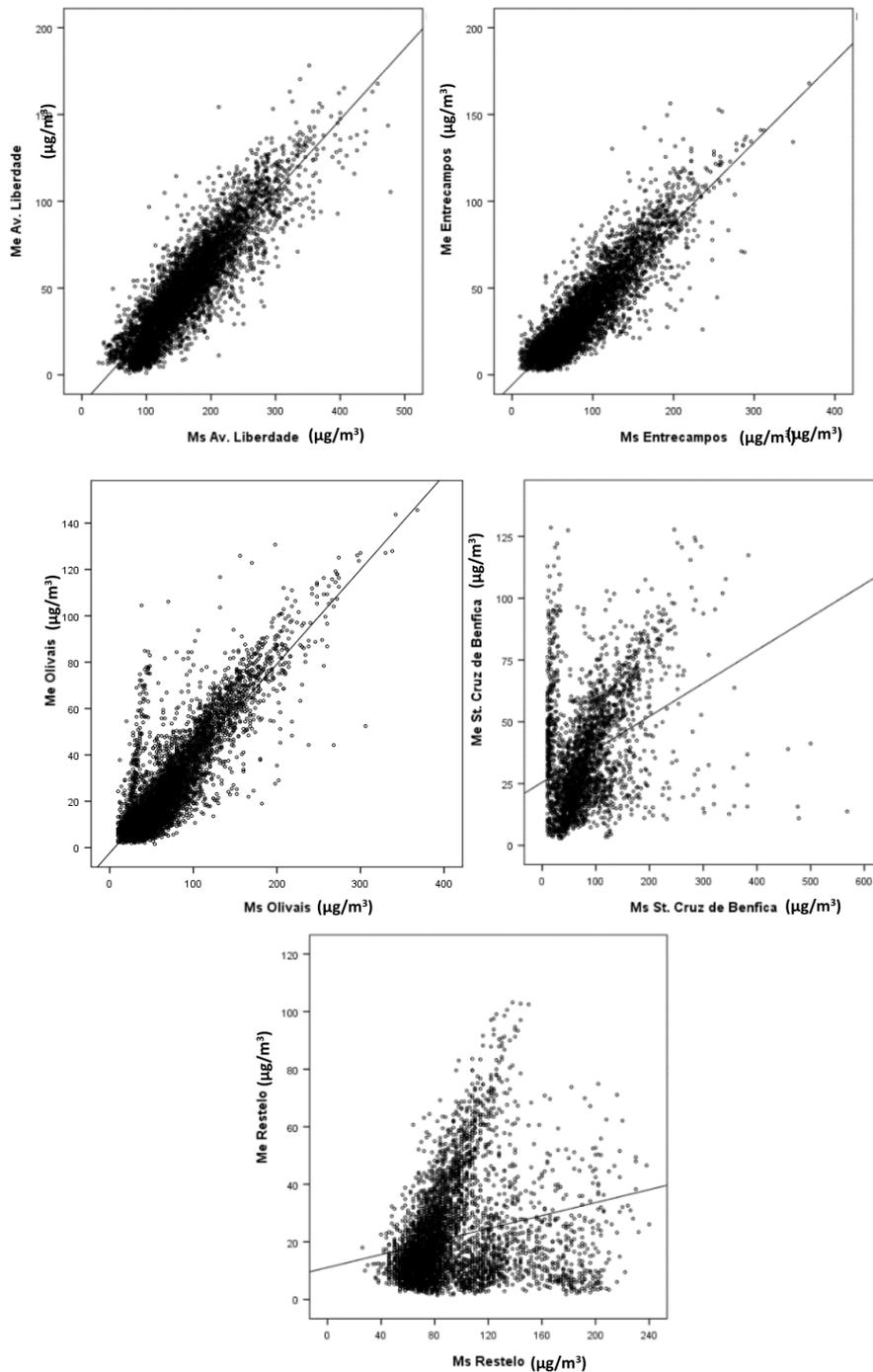


Figura 5.12- Medições dos sensores (Ms) vs. Medições das estações (Me) de referência para NO<sub>2</sub>

### 5.3.3 Parâmetro PM<sub>10</sub>

Tendo em conta a Tabela 5.9, relativa aos indicadores estatísticos para o parâmetro PM<sub>10</sub>, o sensor com o valor absoluto dos indicadores CRMSE, RMSE, MAE e NMB mais elevado é o sensor da estação de Santa Cruz do Benfica, o que evidencia a tendência deste sensor para a subestimação, com um erro significativo associado. No caso dos indicadores MBE, RMSE, NMSE, MAE e NMB, a situação foi melhor

com o sensor dos Olivais, que apresenta os melhores resultados nestes indicadores, evidenciando assim uma boa medida global do quão próximo os valores do sensor estão dos de referência. Deste modo, o sensor dos Olivais é o que apresenta melhor performance. É de notar que, apesar de Olivais apresentar de forma global a melhor performance, a Avenida da Liberdade apresenta os coeficientes de correlação e determinação mais elevados (0,8 e 0,64, respetivamente).

De uma forma geral, e utilizando o FB, FOEX e MBE, é possível verificar que todos os sensores apresentam uma tendência global para a subestimação, uma vez que este conjunto de indicadores permitem estudar o enviesamento do erro, que neste caso é negativo.

Os resultados são apoiados pela Figura 5.13, que apresenta as parcelas de correlação para as medições a for referida. O desempenho geral é visível através da dispersão dos valores e do seu desvio da linha de correlação.

Tabela 5.9- Indicadores estatísticos comparando os dados das Ms com os dados das Me, para o PM<sub>10</sub>

	Eficiência de recolha (%)	MBE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	R	R <sup>2</sup> (%)	CRMSE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	N	NMSE (%)	RMSE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	FB ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	FOEX (%)	MAE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
AVL	86	-7,85	0,8	64	22,89	5541	4,31	24,82	-0,78	-34	12,41
ENT	62	-4,46	0,78	61	30,55	3958	3,74	32,24	-0,51	-15	19,34
OLI	89	-1,93	0,67	43	25,46	5680	3,11	25,70	-0,21	-12	10,15
SCB	47	-4,77	0,67	45	38,59	2982	3,45	41,50	-0,48	-20	33,54

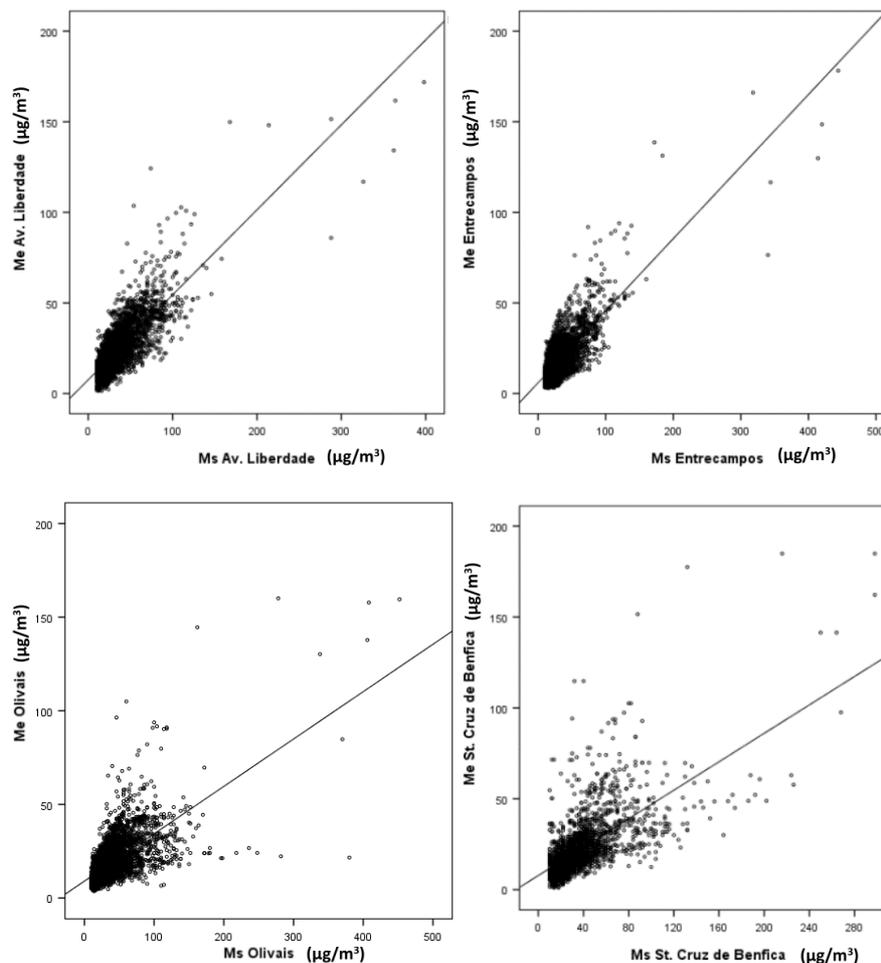


Figura 5.13- Medições dos sensores (Ms) vs. Medições das estações (Me) de referência para PM<sub>10</sub>

### 5.3.4 Parâmetro PM<sub>2.5</sub>

Tendo em conta a Tabela 5.10, relativa aos indicadores estatísticos para o parâmetro PM<sub>2.5</sub>, os resultados demonstram um coeficiente de correlação positivo médio, entre os dados das Me e os dados das Ms, sendo que ambos os coeficientes de determinação são inferiores a 50%, pelo que não apresentam robustez. Apesar do sensor da estação de Olivais apresentar os melhores resultados para os indicadores CRME, RMSE e MAE, o sensor da estação de Entrecampos apresenta o melhor desempenho em termos globais, uma vez que apresenta os indicadores NMSE e NMB mais baixos, e o MBE, FB e a FOEX mais próximos de zero, demonstrando uma superior medida de acordo com os dados de referência e indicando uma tendência muito ligeira para a sobrestimação. As duas estações apresentam valores muito idênticos de NMSE, MBE e FB, o que indica que, apesar da estação de Entrecampos apresentar um desempenho superior à de Olivais, as duas são tendencialmente semelhantes entre si.

Os resultados são apoiados pela Figura 5.14, que apresenta as parcelas de correlação para as medições a for referida. O desempenho geral é visível através da dispersão dos valores e do seu desvio da linha de correlação.

Tabela 5.10- Indicadores estatísticos comparando os dados das Ms com os dados das Me, para o PM<sub>2.5</sub>

	Eficiência de recolha (%)	MBE (µg/m <sup>3</sup> )	R	R <sup>2</sup> (%)	CRMSE (µg/m <sup>3</sup> )	N	NMSE (%)	RMSE (µg/m <sup>3</sup> )	FB (µg/m <sup>3</sup> )	FOEX (%)	MAE (µg/m <sup>3</sup> )
ENT	36	1,79	0,68	47	15,21	2290	0,83	13,39	0,39	7	16,08
OLI	64	1,99	0,58	33	10,08	4130	0,85	9,27	0,43	9	7,71

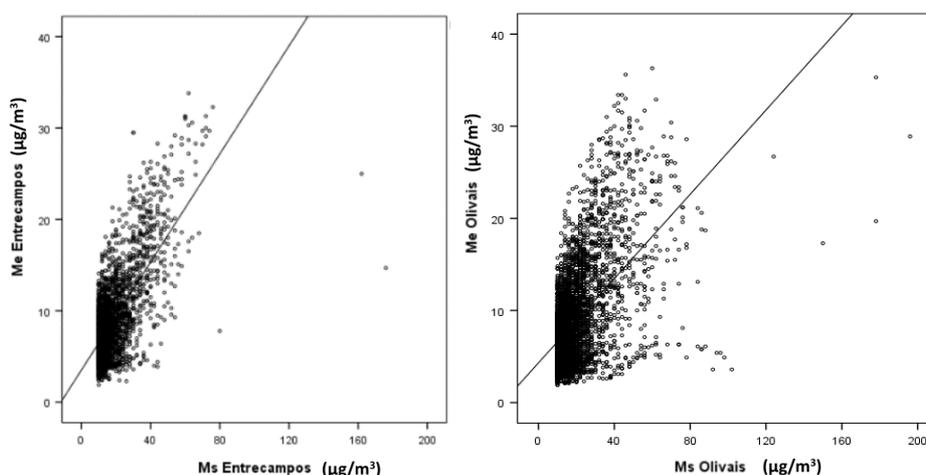


Figura 5.14- Medições dos sensores (Ms) vs. Medições das estações (Me) de referência para PM<sub>2.5</sub>

### 5.3.5 Parâmetro O<sub>3</sub>

Tendo em conta a Tabela 5.11, relativa aos indicadores estatísticos para o parâmetro O<sub>3</sub>, os resultados demonstram um coeficiente de correlação positivo forte, entre os dados das Me e os dados das Ms, relativos ao sensor da estação de Entrecampos e dos Olivais, com um coeficiente de determinação de 66% e 67%, respetivamente. Considerando os indicadores MBE, FB e FOEX, — que ajudam a identificar a tendência do enviesamento dos sensores, em relação aos dados de referência — todos os sensores deste parâmetro apresentam uma tendência para a sobrestimação, embora o sensor dos Olivais tenha uma tendência inferior para este enviesamento. Por outro lado, analisando os indicadores que permitem avaliar a magnitude do erro — CRMSE, NMSE, RMSE, MAE e NMB— o sensor de Entrecampos é o que apresenta uma maior aproximação dos valores de referência. Tendo esta análise em conta, o sensor de Entrecampos e dos Olivais apresentam as melhores performances para este parâmetro.

Os resultados são apoiados pela Figura 5.15, que demonstram a correlação entre dados das Me e Ms, das duas estações, sendo visível uma relação forte na estação de Entrecampos, e uma dispersão superior na do Restelo.

Tabela 5.11- Indicadores estatísticos comparando os dados das Ms com os dados das Me, para o O<sub>3</sub>

	Eficiência de recolha (%)	MBE (µg/m <sup>3</sup> )	R	R <sup>2</sup> (%)	CRMSE (µg/m <sup>3</sup> )	N	NMSE (%)	RMSE (µg/m <sup>3</sup> )	FB (µg/m <sup>3</sup> )	FOEX (%)	MAE (µg/m <sup>3</sup> )
ENT	82	10,08	0,81	66	30,96	5226	0,58	30,16	0,38	17	23,60
RES	75	45,11	0,23	6	68,15	4819	1,13	67,09	1,11	43	69,51
OLI	40	8,46	0,82	67	74,02	2574	0,71	64,59	0,30	8	77,29

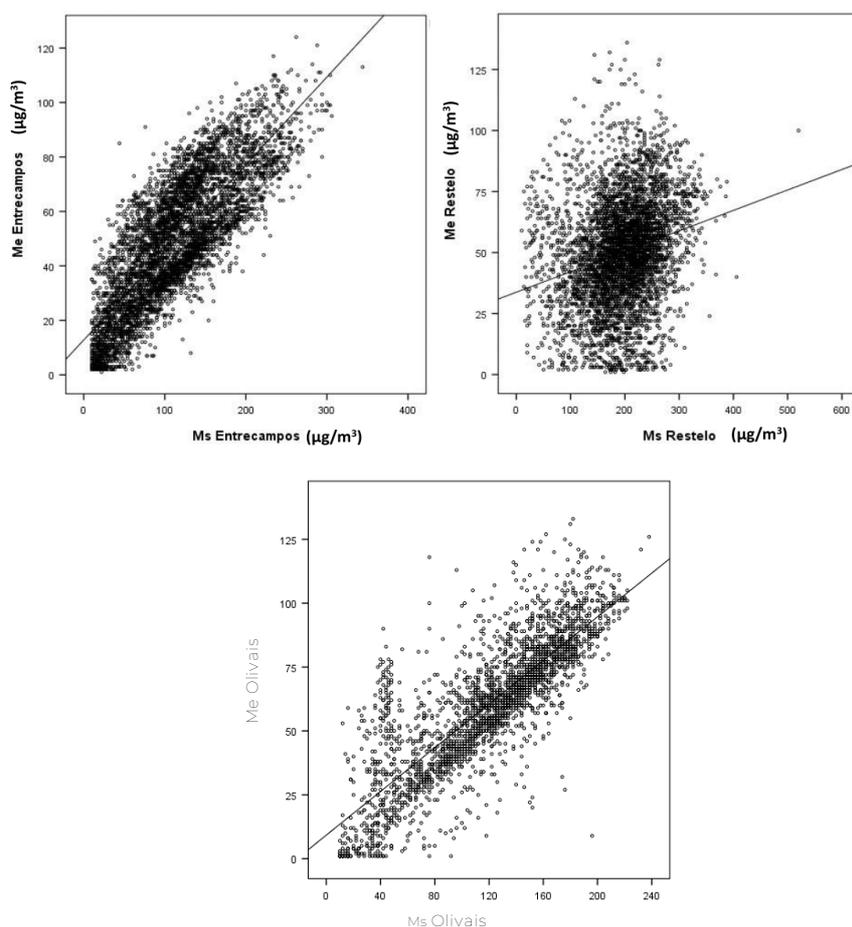


Figura 5.15- Medições dos sensores (Ms) vs. Medições das estações (Me) de referência para O<sub>3</sub>

### 5.3.6 Síntese

Com base na análise anterior, na Tabela 5.12, na Figura 5.16 e na Figura 5.17, que resume os índices estatísticos fracionais ou relativos utilizados, verifica-se que os sensores do parâmetro CO e PM<sub>10</sub> apresentam uma predominante tendência para subestimar e os restantes parâmetros para sobrestimar, sendo que o PM<sub>2.5</sub> apresenta uma tendência ligeira, pouco significativa. Considerando o indicador NMSE, o parâmetro CO é o que apresenta desvios globais superiores entre as medições dos sensores e as de referência. Por outro lado, o PM<sub>2.5</sub> e o O<sub>3</sub> são os que apresentam desvios globais mais baixos. Tendo em conta o coeficiente de determinação, é possível verificar que de uma forma geral, os dados apresentam correlações que, para o mesmo parâmetro, variam de forma inconsistente de local para local. Os sensores com coeficientes mais fortes estão localizados, em regra, em Entrecampos, na Avenida da Liberdade ou nos Olivais, e os mais fracos, no Restelo e em Santa Cruz do Benfica. Considerando a eficiência de recolha dos dados, verifica-se que para o parâmetro PM<sub>2.5</sub> as eficiências de recolha são baixas. Os sensores localizados em Santa Cruz de Benfica apresentam também eficiências de recolha de dados baixas, para qualquer um dos parâmetros.

Com base na análise anterior, os sensores com melhor e pior desempenho, relativamente ao parâmetro CO, foram respetivamente os da estação da Avenida da Liberdade, Olivais e a de Santa Cruz de Benfica. Tendo em conta o parâmetro NO<sub>2</sub>, a estação de Entrecampos foi a que obteve o melhor desempenho, de uma forma global e a de Santa Cruz do Benfica foi a que obteve pior desempenho. Para o parâmetro PM<sub>10</sub> os melhores desempenhos dos sensores foram na estação dos Olivais e pior desempenho foi o do sensor localizado em Santa Cruz de Benfica. Para o PM<sub>2.5</sub>, o melhor e o pior respetivamente foram os sensores de Entrecampos e de Olivais, respetivamente. Já para o O<sub>3</sub>, os sensores de Entrecampos e Olivais foram os que obtiveram melhores desempenhos e Restelo o pior.

Verificou-se uma tendência para melhores desempenhos por parte dos sensores das estações de Entrecampos, Olivais e Avenida da Liberdade — instalados pela MONITAR — e piores performances para as estações de Santa Cruz de Benfica e Restelo — instalados pela MONITAR e QART, respetivamente. Deste modo, não é possível verificar um padrão de qualidade entre as estações com influência de tráfego (Entrecampos, Avenida da Liberdade e Santa Cruz de Benfica) e as de fundo (Restelo e Olivais). Também não foi possível relacionar a performance dos sensores com a respetiva empresa. Não foi verificada nenhuma relação entre o tipo de sensor (eletroquímico ou ótico) e os resultados apresentados.

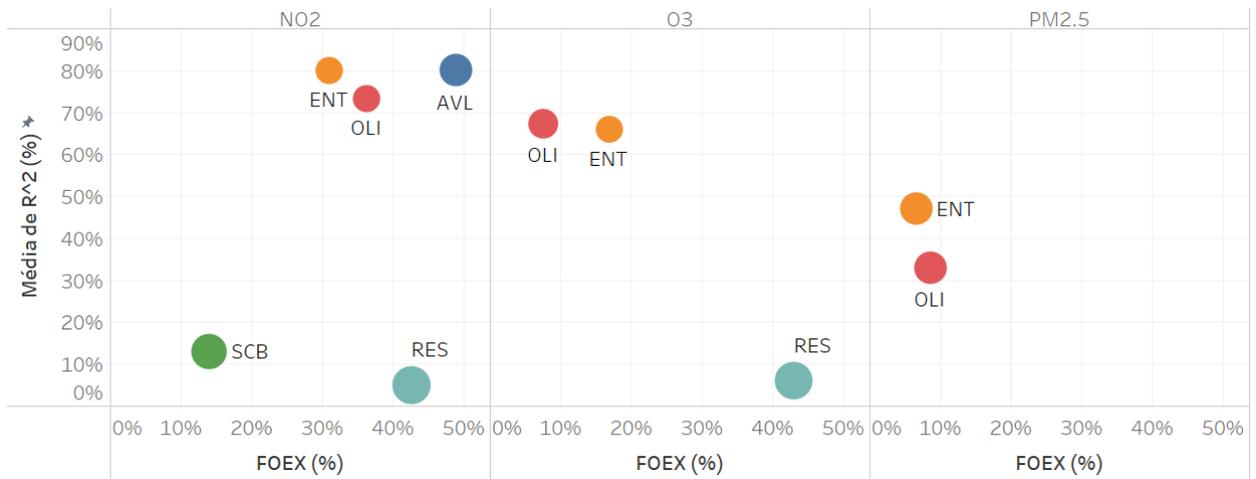


Figura 5.16- Resumo dos indicadores estatísticos (R<sup>2</sup>, FOEX e NMSE) para os parâmetros com tendência para sobrestimar (NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> e PM<sub>2.5</sub>)



Figura 5.17- Resumo dos indicadores estatísticos (R<sup>2</sup>, FOEX e NMSE) para os parâmetros com tendência para subestimar (CO e PM<sub>10</sub>)



Tabela 5.12- Indicadores estatísticos comparando os dados das Ms com os dados das Me, para todos os parâmetros em estudo, em todas as localizações

		Eficiência de recolha (%)	NMSE (%)	R <sup>2</sup> (%)	FB (%) *	NMB (%) *	FOEX (%) *
CO	AVL	89	1,05	79	-0,007	-35	-39
	ENT	89	1,40	49	-0,008	-36	-43
	OLI	89	0,01	70	-0,008	-37	-32
	SCB	51	0,03	28	-0,027	-62	-50
NO <sub>2</sub>	AVL	88	0,01	80	0,007	47	49
	ENT	88	0,01	80	0,002	11	31
	OLI	88	0,01	73	0,003	17	36
	RES	76	0,01	5	0,012	86	43
	SCB	42	0,01	13	-0,026	-51	14
PM <sub>10</sub>	AVL	86,5	0,04	64	-0,009	-40	-34
	ENT	62	0,04	61	-0,017	-51	-15
	OLI	88,6	0,03	43	-0,004	-20	-12
	SCB	47	0,03	45	-0,031	-63	-20
PM <sub>2.5</sub>	ENT	36	0,01	47	-0,009	-19	7
	OLI	64	0,01	33	-0,018	-53	9
O <sub>3</sub>	ENT	82	0,01	66	0,001	7	17
	RES	75	0,01	6	0,013	41	43
	OLI	40	0,01	67	-0,028	-53	8

Escala:



\*Escala:



## 5.4 Índice QualAr

Nesta secção será apresentada a matriz confusão relativa ao parâmetro NO<sub>2</sub>, na Avenida da Liberdade, como exemplo demonstrativo do tipo de análise que foi elaborado para cada uma das matrizes confusão. Todas as outras matrizes e tabelas com os indicadores da performance de classificação encontram-se em anexo.

### Avenida da Liberdade

A matriz de confusão das classes do índice QualAr é dada na Figura 5.18, e as probabilidades de confusão são dadas na Tabela 5.13. As principais células diagonais dão a percentagem de verdadeiros positivos, sendo que somatório dos valores das diagonais reflete o indicador da exatidão. As restantes células mostram a percentagem de classificações erradas com probabilidades de confusão relacionadas.

Tabela 5.13- Resumo dos indicadores de performance da classificação do parâmetro NO<sub>2</sub>, na Avenida da Liberdade

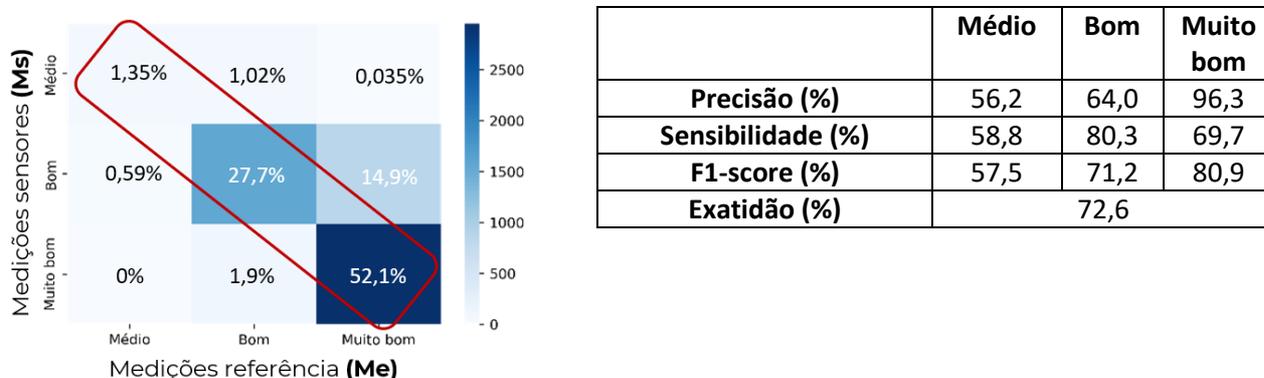


Figura 5.18-Matriz confusão do parâmetro NO<sub>2</sub>, na Avenida da Liberdade

A classe “Muito bom” foi detetada com sensibilidade intermédia (69,7%), mas com precisão forte (96,3%), o que significa que os erros foram na sua maioria falsos negativos. Analisando o F1-Score (80,9%), conclui-se que há um bom balanço entre a precisão e a sensibilidade e que não há grandes problemas de classificação desequilibrados.

A classe “Bom” foi detetada com sensibilidade muito boa (80,3%), mas com precisão intermédia fraca (64%), o que significa que os erros foram na sua maioria falsos positivos. Analisando o F1-Score (71,2%), conclui-se que há um balanço intermédio entre a precisão e a sensibilidade.

A classe “Médio” foi detetada com sensibilidade (58,8%) e com precisão fraca (56,2%), o que significa que os dados dos sensores classificaram muitos falsos negativos e que a classe tem um elevado número de falsos positivos. Analisando o F1-Score (57,5%), este não dá grande informação relativamente ao tipo de erro significativo, mas transmite uma performance baixa do modelo.

A exatidão da matriz (72,6%) é elevada, o que indica que o rácio entre os dados dos sensores classificados corretamente e a quantidade total de dados das estações e sensores é considerado bom.

Na Tabela 5.14, é possível observar o resumo dos indicadores de performance da classificação do parâmetro NO<sub>2</sub>.

Tabela 5.14- Resumo dos indicadores de performance da classificação do parâmetro NO<sub>2</sub>, em todas as localizações

	Precisão					Sensibilidade					F1-Score				
	AVL	ENT	OLI	SCB	RES	AVL	ENT	OLI	SCB	RES	AVL	ENT	OLI	SCB	RES
Nulls					12%			8%		86%					21%
Mé-dio	56%	25%	100%	12%	0%	59%	87%	44%	22%	0%	58%	39%	2%	16%	0%
Bom	64%	48%	5%	55%	24%	80%	58%	12%	25%	84%	71%	52%	7%	34%	37%
Muito Bom	96%	99%	98%	78%	98%	70%	14%	8%	30%	45%	81%	24%	15%	44%	62%

Escala: 0% 100%

Verifica-se que os melhores resultados de Precisão foram observados na classe "Muito bom", variando entre 78% (Santa Cruz de Benfica) e 99% (Entrecampos). No que diz respeito ao indicador da

Sensibilidade, a classe "Bom" foi a que teve um melhor desempenho, tendo variado entre 12% (Olivais) e 84% (Restelo). Relativamente ao F1-Score, a classe "Muito bom" foi a que obteve melhor desempenho, tendo variado entre 15% (Olivais) e 81% (Avenida da Liberdade). Por outro lado, os piores resultados de precisão, sensibilidade e F1-Score (desprezando os resultados dos "Nulls") foram obtidos na classe "Médio", "Muito Bom" e "Médio", respetivamente.

### 5.4.1 Parâmetro PM<sub>10</sub>

Tendo em conta a Tabela 5.15, os melhores resultados de precisão, sensibilidade e F1-Score foram observados na classe "Muito bom", variando entre 62% (Avenida da Liberdade) e 85% (Olivais), 43% (Santa Cruz de Benfica) e 86% (Avenida da Liberdade), 55% (Santa Cruz de Benfica) e 81% (Olivais), respetivamente. Por outro lado, os piores resultados de precisão, sensibilidade e F1-Score (desprezando os resultados dos "Nulls") foram obtidos na classe "Médio" e "Fraco", respetivamente.

Tabela 5.15- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM<sub>10</sub>, em todas as localizações

	Precisão				Sensibilidade				F1-Score			
	ENT	AVL	OLI	SCB	ENT	AVL	OLI	SCB	ENT	AVL	OLI	SCB
Nulls	2%	1%	0%	0%	31%	6%	0%	26%	3%	2%	0%	1%
Mau	83%	86%		56%	16%	17%		12%	26%	28%		20%
Fraco	68%	60%	6%	22%	17%	14%	9%	5%	28%	23%	7%	8%
Médio	35%	52%	29%	36%	16%	22%	25%	11%	22%	31%	27%	16%
Bom	45%	51%	44%	50%	18%	19%	33%	17%	26%	28%	38%	25%
Muito Bom	80%	62%	85%	75%	60%	86%	79%	43%	68%	72%	82%	55%

Escala:



### 5.4.2 Parâmetro PM<sub>2.5</sub>

Tendo em conta a Tabela 5.16, os melhores resultados de Precisão foram observados na classe "Muito bom", sendo que o sensor de Entrecampos apresentou o melhor desempenho (81%). No indicador Sensibilidade, os melhores resultados foram observados também na classe "Muito bom", caso seja desprezada a classe "Nulls", sendo que o sensor dos Olivais apresentou uma melhor performance (41%). No que toca ao F1-Score, os melhores resultados foram também observados na classe "Muito bom", com o sensor dos Olivais a apresentar novamente uma melhor performance (53%), em relação a Entrecampos (41%). Por outro lado, os piores resultados de Precisão, sensibilidade e F1-Score foram observados na classe "Médio".

Tabela 5.16- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM<sub>2.5</sub>, em todas as localizações

	Precisão		Sensibilidade		F1-Score	
	ENT	OLI	ENT	OLI	ENT	OLI
<i>Nulls</i>	3%	0%	82%	15%	5%	1%
Fraco	42%	13%	27%	6%	33%	8%
Médio	28%	26%	14%	17%	19%	20%
Bom	51%	46%	23%	32%	32%	38%
Muito Bom	81%	76%	28%	41%	41%	53%

Escala:



### 5.4.3 Parâmetro O<sub>3</sub>

Tendo em conta a Tabela 5.17, os melhores resultados de Precisão, sensibilidade e F1-Score foram observados na classe "Muito bom", variando entre 90% (Olivais) e 95% (Entrecampos), 23% (Entrecampos) e 46% (Restelo), 32% (Entrecampos) e 48% (Olivais), respetivamente. Por outro lado, os piores resultados de Precisão, sensibilidade e F1-Score foram observados na classe "*Nulls*".

Tabela 5.17- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro O<sub>3</sub>, em todas as localizações

	Precisão			Sensibilidade			F1-Score		
	ENT	RES	OLI	ENT	RES	OLI	ENT	RES	OLI
<i>Nulls</i>	7%	0%	1%	82%	0%	63%	5%	1%	1%
Médio	10%	1%	46%	27%	13%	26%	33%	8%	33%
Bom	21%	4%	53%	14%	26%	35%	19%	20%	48%
Muito Bom	95%	94%	90%	23%	46%	33%	32%	38%	48%

Escala:



### 5.4.4 Síntese

Na Tabela 5.18, é possível observar um resumo da exatidão para cada localização e poluente.

Tabela 5.18- Resumo da exatidão para cada localização e parâmetro em estudo

	Exatidão			
	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	O <sub>3</sub>
AVL	73%	53%		
ENT	41%	47%	28%	67%
OLI	9%	66%	38%	33%
SCB	29%	32%		
RES	51%			19%

Verifica-se que a estação da Avenida da Liberdade, para o parâmetro  $\text{NO}_2$  foi o sensor com melhor desempenho, obtendo uma exatidão de 73%, entre as classificações obtidas para os dados de referência e as classificações obtidas pelos dados dos sensores. Por outro lado, o parâmetro  $\text{NO}_2$ , nos Olivais apresenta o desempenho mais baixo, com uma exatidão de 9%. Relativamente ao  $\text{PM}_{10}$ , o sensor da estação dos Olivais é a localização com exatidão superior (66%) e a de Santa Cruz de Benfica, a que apresenta menor exatidão (32%). Para o parâmetro  $\text{PM}_{2.5}$ , os Olivais apresentam a maior exatidão (38%) e Entrecampos a menor exatidão (28%). Por fim, para o parâmetro  $\text{O}_3$ , a localização com exatidão superior é Entrecampos (67%) e o Restelo apresenta a exatidão mais baixa (19%).

Embora se consiga verificar que os sensores das estações de Entrecampos, Olivais e a Avenida da Liberdade tenham um desempenho superior relativamente aos restantes sensores, não foi possível verificar nenhuma relação entre as marcas dos sensores e o seu desempenho. Também não foi possível verificar uma relação entre o desempenho dos sensores e a influência predominante da estação (se de tráfego ou de fundo), e entre os tipos de sensores (eletroquímicos e óticos) com os resultados.

Verificou-se também que os melhores desempenhos dos indicadores estatísticos precisão, sensibilidade e F1-Score se deram predominantemente para a classe do IQualAr "Muito Bom". Por outro lado, os piores resultados de desempenho deram-se predominantemente na classe "Médio" e "Bom", respetivamente.

## 5.5 Ultrapassagens valores de referência

Nesta secção serão apresentadas as ultrapassagens relativas ao parâmetro  $\text{NO}_2$ , na Avenida da Liberdade, como exemplo demonstrativo do tipo de análise que foi elaborado para cada uma das combinações de parâmetros e localizações. Todas as restantes figuras com as séries temporais e estudo das ultrapassagens aos valores limites, bem como as tabelas com os respetivos valores médio horários, máximos horários, eficiência de recolha e incerteza, estão disponíveis em anexo.

### 5.5.1 Parâmetro $\text{NO}_2$

#### **Avenida da Liberdade**

Na Tabela 5.19, encontram-se os resultados obtidos para o parâmetro  $\text{NO}_2$ , na Avenida da Liberdade, durante o período de monitorização, para os dados de referência (Me) e para as medições obtidas através dos sensores (Ms) e ainda, os parâmetros estatísticos mencionados na legislação de qualidade do ar em vigor.

Tabela 5.19- Média horária, máximo horário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro NO<sub>2</sub>, na Avenida da Liberdade

	Média horária		Máximo horário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Ms	Ms
<b>AVL</b>	49	81	191	239	89%	120%

Na Figura 5.19 encontram-se representadas as variações médias horárias de concentração de NO<sub>2</sub>, para o período de monitorização, tanto das Me, como das Ms.

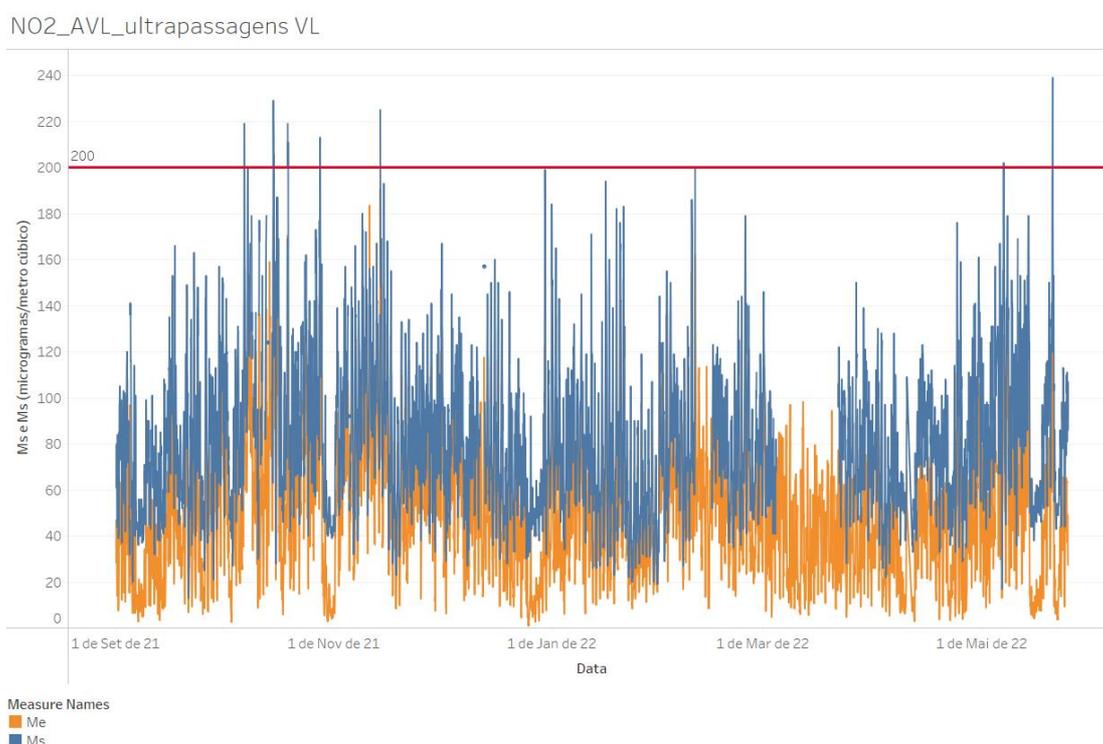


Figura 5.19- Série temporal do parâmetro NO<sub>2</sub>, na Avenida da Liberdade e estudo das ultrapassagens do valor limite (200 µg/m<sup>3</sup>), para um período de referência de uma hora

Foram registadas 12 ultrapassagens ao VLH (200 µg/m<sup>3</sup>), nas medições efetuadas pelo sensor e nenhuma no método de referência. Os valores médios horários de NO<sub>2</sub> das Me e das Ms foram 49 e 81 µg/m<sup>3</sup>, respetivamente, sendo inferiores ao valor limite de referência. No que concerne aos objetivos de qualidade de dados do Decreto-Lei nº102/2010, para as medições indicativas (Tabela 2.4), a taxa mínima de recolha e a incerteza da medição não estão em cumprimento com os limites definidos, pelo que este sensor não pode ser utilizado para este tipo de medição. No caso dos objetivos de qualidade para as estimativas objetivas, a incerteza de medição é superior ao estabelecido pelo que também não pode ser utilizado para este fim.

Apesar das discrepâncias entre dados dos sensores e dados de referência, é possível verificar um padrão não sistemático entre ambas as séries, com um viés inconstante. Verifica-se também que de forma geral, os dados das Ms encontram-se sobrestimados, em relação aos dados de referência.

## 5.5.2 Síntese

Na Tabela 5.20, é possível observar um resumo das ultrapassagens dos valores de referência, tendo em conta o legislado no Decreto-Lei nº. 102/2010.

Tabela 5.20-Resumo das ultrapassagens dos valores de referência horário e diário (Valor limite e valor alvo). Para o parâmetro O<sub>3</sub>, não foram contabilizadas as 4 ocorrências verificadas para as Ms, no que toca à excedência dos limiares de informação

	CO		NO <sub>2</sub>		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>		O <sub>3</sub>	
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms
ENT	0	0	0	0	7	1	1	1	0	23
AVL	0	0	0	12	7	2				
OLI	0	0	0	0	5	3	4	3	1	0
SCB	0	0	0	5	8	2				
RES			0	0					1	208

Relativamente ao parâmetro CO, não foram observadas excedências para os dados dos sensores. Esta inexistência de excedências pode dever-se à já verificada anteriormente tendência de os sensores de CO estarem tendencialmente a subestimar.

No que toca ao parâmetro NO<sub>2</sub>, observaram-se excedências por parte dos dados dos sensores para as estações da Avenida da Liberdade e Santa Cruz de Benfica — o que ajuda a confirmar a já verificada tendência deste sensor para sobrestimar, em relação aos dados de referência.

No caso do parâmetro PM<sub>10</sub>, observaram-se excedências por parte dos dados de referência, e em menor quantidade por parte dos dados dos sensores. No sensor de Entrecampos, a única excedência na série temporal ocorreu assincronamente dos dados de referência. No sensor da Avenida da Liberdade, dos Olivais e de Santa Cruz de Benfica, apenas uma das ultrapassagens ocorreu simultaneamente em ambas as séries temporais. Uma vez que ocorrem mais excedências por parte dos dados das estações da RMQA, pode-se afirmar que há uma tendência para os dados dos sensores estarem subestimados — para este parâmetro — como já tinha sido verificado anteriormente, no presente capítulo.

No que concerne o parâmetro PM<sub>2.5</sub>, foram observadas excedências para as medições em estudo e de referência. Em Entrecampos, apesar de o número de excedências ser igual, estas ocorreram em dias diferentes. Em Olivais, verificaram-se excedências por parte dos dados de referência e dos sensores, mas em horários distintos. Tendo isto em conta, verifica-se uma tendência para os dados dos sensores estarem ligeiramente subestimados.

Por fim, para o parâmetro  $O_3$ , observaram-se excedências por parte dos dados dos sensores e por parte das medições de referência. No Restelo, verifica-se uma quantidade significativa de ultrapassagens. Em menor quantidade, o sensor da estação de Entrecampos apresenta também diversas excedências. Deste modo, é possível verificar que os dados dos sensores deste parâmetro apresentam uma tendência para sobrestimar, em relação aos dados de referência, como já tinha sido demonstrado anteriormente.

Fazendo uma análise dos dados dos sensores por parâmetro, o poluente que apresenta maior número de excedências é o  $O_3$ . Por outro lado, o CO é o que apresenta menor número de ultrapassagens aos valores de referência. Tendo em conta os dados de referência, o que apresenta maior número de excedências é o parâmetro  $PM_{10}$ .

Fazendo uma análise semelhante, tendo em conta os dados dos sensores, mas por localização, Restelo é a que apresenta maior quantidade de ultrapassagens. No que toca aos dados das estações, Entrecampos, Olivais e Santa Cruz de Benfica são as que apresentam maior quantidade de excedências.

De uma forma global, verificou-se que não há um padrão sistemático nas séries temporais, entre dados de referência e dados dos sensores, o que significa que embora exista um enviesamento visível, este não é constante ao longo do tempo, chegando mesmo a mudar o sinal em alguns casos (passando de subestimação para sobrestimação). É exemplo disto o parâmetro  $O_3$  (Entrecampos e Olivais), CO (Entrecampos e Santa Cruz do Benfica),  $NO_2$  (Olivais, Restelo e Santa Cruz de Benfica),  $PM_{10}$  (Entrecampos, Olivais e Santa Cruz de Benfica),  $PM_{2.5}$  (Entrecampos e Olivais). Para o mesmo parâmetro, verificam-se diferentes magnitudes de erro e desvios inconstantes entre medições de referência e dos sensores, ao longo das séries temporais, o que comprova que, embora sejam sensores iguais ou semelhantes (no caso do Restelo, uma vez que são os únicos sensores da QART), para a mesma tecnologia de deteção dos gases ou partículas pelos sensores, estes encontram-se consideravelmente descalibrados.

Tendo em conta os objetivos de qualidade de dados do Decreto-Lei nº102/2010, para as medições indicativas (Tabela 2.4), apenas os dados relativos ao CO apresentam-se em cumprimento com o indicador estatístico associado à incerteza das medições (<25%). No que toca à eficiência de recolha, nenhum sensor se encontra em cumprimento total (pelo menos 90%), embora os sensores estejam a rondar os 89% de eficiência, encontrando-se assim muito próximos de estarem em cumprimento com os requisitos para medições indicativas. Considerando os objetivos de qualidade de dados para a modalidade de “estimativas objetivas”, só os seguintes sensores não se encontraram em cumprimento (Tabela 5.21):

- Sensor da Avenida da Liberdade e de Santa Cruz de Benfica, para o parâmetro  $NO_2$ ;
- Sensor dos Olivais para o parâmetro  $PM_{2.5}$ ;
- Sensor de Restelo e dos Olivais para o parâmetro  $O_3$ .

Tendo em conta o disposto na Tabela 2.9, pela EPA, só os sensores do parâmetro CO e dos sensores de Entrecampos, no parâmetro do  $NO_2$  e  $PM_{10}$ , apresentam potencial para serem

utilizados no âmbito da educação e informação/sensibilização (incerteza <50% e eficiência de recolha dos dados  $\geq$ 50%). Para identificar e caracterizar a origem dos poluentes (incerteza <30% e eficiência de recolha dos dados  $\geq$ 75%); utilizar como complemento de redes de monitorização existentes (incerteza <20% e eficiência de recolha dos dados  $\geq$ 80%); e ainda, como avaliação da monitorização da exposição pessoal (incerteza <30% e eficiência de recolha dos dados  $\geq$ 80%), só os sensores do CO (à exceção do localizado em Santa Cruz de Benfica) é que apresentam potencial para estes fins. Não obstante estes âmbitos de aplicação, não apresenta condições para os dados serem utilizados para monitorização regulatória.

Tabela 5.21- Resumo dos indicadores de objetivos de qualidade dos dados para a avaliação no ar ambiente, de todos os parâmetros e sensores das várias estações.

		<b>Eficiência de recolha</b>	<b>Incerteza</b>	<b>Medições indicativas</b>	<b>Estimativas objetivas</b>
CO	AVL	89%	6%	N	S
	ENT	89%	7%	N	S
	OLI	89%	6%	N	S
	SCB	51%	20%	N	S
NO <sub>2</sub>	AVL	88%	83%	N	N
	ENT	88%	46%	N	S
	OLI	88%	65%	N	S
	RES	76%	51%	N	S
	SCB	42%	135%	N	N
PM <sub>10</sub>	AVL	86%	66%	N	S
	ENT	62%	49%	N	S
	OLI	89%	87%	N	S
	SCB	47%	92%	N	S
PM <sub>2.5</sub>	ENT	36%	80%	N	S
	OLI	64%	200%	N	N
O <sub>3</sub>	ENT	82%	71%	N	S
	RES	75%	85%	N	N
	OLI	40%	85%	N	N

Nota: O "S" significa que está em cumprimento com os objetivos de qualidade dos dados da respetiva coluna (medições indicativas ou estimativas objetivas). O "N" significa o oposto.



## 6.1 Principais conclusões

Com o presente estudo foi possível produzir uma análise global do desempenho dos dados dos sensores de qualidade do ar da rede de monitorização de Lisboa, tendo como referência os dados das estações da rede oficial de monitorização de qualidade do ar, gerida pela CCDR.

Foram avaliados dados horários de 9 meses — de 1 de setembro de 2021 a 25 de maio de 2022 — de cinco parâmetros (CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> e PM<sub>2.5</sub>), relativos a cinco estações (Avenida da Liberdade, Entrecampos, Olivais Restelo, e Santa Cruz de Benfica). Foram estudados os dados dos sensores que foram instalados por duas empresas distintas — a QART e a MONITAR— e os dados das estações da rede oficial de monitorização de qualidade do ar, utilizados como dados de referência.

Para alcançar o principal objetivo desta dissertação, foram realizados três estudos distintos: um avaliando indicadores estatísticos (por exemplo: RMSE, FOEX, R<sup>2</sup>); um de correspondência com o Índice de Qualidade do Ar (IQualAr), através de matrizes de confusão e respetivos indicadores estatísticos (sensibilidade, precisão, F1-score e exatidão); e um terceiro de comparação do número de ultrapassagens aos valores-limite para a proteção da saúde humana, definidos no Decreto-Lei nº102/2010, de 23 de setembro.

Concluiu-se que os sensores com melhor desempenho foram predominantemente os localizados nas estações de Entrecampos, Olivais e Avenida da Liberdade. Por outro lado, os sensores com menor desempenho foram regularmente os localizados em Santa Cruz de Benfica e no Restelo. Não foi possível verificar nenhuma relação entre as influências predominantes das estações (tráfego e fundo) e o desempenho dos sensores. Relativamente às empresas dos sensores, também não foi possível estabelecer uma conexão entre este fator e o respetivo desempenho.

Relativamente às tendências para sobrestimar ou subestimar os dados de referência das respetivas estações, verificou-se que os sensores para os parâmetros CO e PM<sub>10</sub> apresentam uma tendência clara para a subestimação e os parâmetros O<sub>3</sub> e NO<sub>2</sub> apresentam uma tendência significativa para a sobrestimação. Já o PM<sub>2.5</sub> não apresenta uma tendência significativa de sobrestimação. Estas

tendências foram verificadas no estudo com os indicadores estatísticos e com a análise de ultrapassagens dos valores de referência legislados.

Relativamente às séries temporais estudadas no âmbito da análise das ultrapassagens, verificou-se de uma forma global, que não há um padrão sistemático nas séries temporais, entre dados de referência e dados dos sensores. Isto significa que, embora exista um enviesamento visível, este não é constante ao longo do tempo, chegando mesmo a mudar o sinal em alguns casos (passando de subestimação para sobrestimação), mais do que uma vez. Para o mesmo parâmetro, verificam-se diferentes magnitudes de erro e desvios inconstantes entre medições de referência e dos sensores, ao longo das séries temporais. Estes comportamentos que nem sempre acompanham a tendência das medições de referência, comprovam que, embora sejam sensores iguais ou semelhantes, para a mesma tecnologia de deteção (dos gases ou partículas) pelos sensores, estes encontram-se consideravelmente descalibrados.

Tendo em conta os objetivos de qualidade dos dados para avaliação dos poluentes no ar ambiente — definidos no Decreto-Lei nº2010/102— verificou-se que só o parâmetro CO se encontra quase em cumprimento para a categoria das “medições indicativas”. Para as “estimativas objetivas” só os seguintes sensores não se encontraram em cumprimento:

- Sensor da Avenida da Liberdade e de Santa Cruz de Benfica, para o parâmetro NO<sub>2</sub>;
- Sensor dos Olivais para o parâmetro PM<sub>2.5</sub>;
- Sensor de Restelo e dos Olivais para o parâmetro O<sub>3</sub>

Tendo em conta os exemplos de objetivos de desempenho sugeridos para sensores apresentados pela EPA, só os sensores do parâmetro CO e dos sensores de Entrecampos, no parâmetro do NO<sub>2</sub> e PM<sub>10</sub> apresentaram potencial para serem utilizados para fins educativos e de sensibilização. Só os sensores do CO (excetuando o localizado em Santa Cruz de Benfica) apresentaram potencial para outros fins, nomeadamente; identificação e caracterização de origem, complemento dos dados de monitorização existentes e monitorização da exposição pessoal.

Apesar deste ser um projeto com objetivos muito relevantes para a cidade de Lisboa (aumento da cobertura espacial dos dados de qualidade do ar e complemento da atual rede de monitorização existente), verificou-se que a qualidade dos sensores instalados não possibilita que estes sejam utilizados para o fim pretendido.

Relativamente a cada parâmetro, verificou-se que:

- Na análise do NO<sub>2</sub>, foi menos óbvio qual seria a localização com melhor desempenho, tendo em conta os diferentes estudos realizados. Para o estudo com recurso a indicadores estatísticos e de correspondência ao índice QualAr verificou-se que a estação da Entrecampos apresentava o melhor desempenho. Com recurso ao estudo das excedências, verificou-se que Entrecampos é a localização com melhor desempenho do sensor. Na determinação da pior

localização, verificou-se que todos os estudos apontavam para o sensor localizado em Santa Cruz de Benfica/ Restelo (estudo estatístico) e Olivais (estudo do índice QualAr).

- Para o O<sub>3</sub>, os sensores da estação de Entrecampos e de Olivais apresentaram o melhor desempenho e Restelo o pior;
- Para o PM<sub>2.5</sub>, os sensores da estação de Entrecampos e de Olivais apresentaram o melhor e pior desempenho, respetivamente.
- Para o PM<sub>10</sub>, o sensor da estação de Olivais apresentou o melhor desempenho e Santa Cruz de Benfica, o pior.
- Para o parâmetro CO não foi possível elaborar os três estudos uma vez que o índice QualAr não prevê este poluente. Considerando os restantes estudos, não foram verificadas ultrapassagens ao valor limite de referência, nem por parte dos sensores, nem por parte das estações de referência. Não obstante, o estudo com recurso aos indicadores estatísticos permitiu concluir que os sensores da estação da Avenida da Liberdade e dos Olivais apresentaram o melhor desempenho e Santa Cruz de Benfica o pior. Os sensores mencionados anteriormente, mais o sensor de Entrecampos, foram os únicos que, segundo as recomendações da EPA, poderiam ser utilizados para mais fins além dos educacionais.

Para tornar os dados úteis e adequados é necessário criar um algoritmo por parâmetro, que considere as condições ambientais e meteorológicas dos locais de instalação dos sensores e que considere medições que utilizem métodos de referência. É também importante que os dados dos sensores, antes de serem disponibilizados ao público, sejam alvo de um pré-processamento automatizado, de forma a limpar as irregularidades mais óbvias. Para garantir a qualidade deste serviço público de informação e de dados acessíveis, deve existir uma equipa que vá, periodicamente, validando os dados que são disponibilizados na plataforma Lisboa Aberta, garantindo que estes são fidedignos e que podem ser utilizados para a monitorização e gestão da qualidade do ar em Lisboa, em formato de complemento às estações da RMQA.

Em retrospectiva, verificou-se o cumprimento dos objetivos delineados para esta dissertação, nomeadamente o principal: a avaliação da qualidade dos dados dos sensores de qualidade do ar da nova rede de monitorização da cidade de Lisboa, com recurso a sensores de baixo custo, através dos dados das estações da RMQA enquanto método de referência.

Para o cumprimento deste objetivo, foi fundamental aprofundar e enquadrar o caso de estudo, que permitiu que fosse feita uma análise da qualidade do ar de Lisboa, das últimas duas décadas, com um moderado nível de detalhe. Foi igualmente realizado um ponto de situação das políticas e medidas de gestão que estão ou deveriam estar a ser aplicadas. Desta análise conclui-se que Lisboa, apesar da concretização de parte das medidas propostas, ainda tem um longo percurso a percorrer no planeamento e gestão de qualidade do ar para atingir os níveis que garantam a proteção da saúde humana, do ambiente e do património. Não foi elaborado o Programa de Execução do PMQA LVT, onde

deveriam ter sido definidas as medidas de execução obrigatória, a cumprir até 2020. Entre as várias P&M, salienta-se a necessidade e a importância de atualizar a única ZER existente em Portugal, que atualmente tem efeitos praticamente nulos, devido à sua desatualização em termos de exigências e ausência de fiscalização eficaz.

Como passos futuros e urgentes, Lisboa deve apostar na atualização da sua ZER e na definição de um plano de ação para a melhoria da atual rede de monitorização instalada, tendo por base este estudo, os casos de estudo internacionais apresentados, e, ainda, o conjunto de recomendações que menciona na secção abaixo.

## 6.2 Recomendações para melhorar a rede de sensores de Lisboa

De modo a melhorar a rede de sensores de qualidade do ar de Lisboa, e cumprir os objetivos associados a este projeto, é necessário delinear um conjunto de medidas e ações, nomeadamente:

- Elaborar um estudo para avaliar com maior detalhe os sensores de cada parâmetro. Neste estudo devem ser selecionadas duas localizações que tenham também uma estação pertencente à rede de monitorização oficial da qualidade do ar, sendo que uma deve ser uma estação influenciada predominantemente por tráfego e outra de fundo. Nestas duas localizações devem ser instaladas duas estações de cada marca (QART e MONITAR), que devem ser alvo de uma calibração *in situ*, sendo que cada uma deve monitorizar os vários parâmetros de qualidade do ar, ao longo de um período de pelo menos 6 meses. Com este estudo devem ser analisados alguns fatores, como:
  - A sensibilidade cruzada entre poluentes, ou seja, estudar se um sensor de um determinado poluente poderá ter sensibilidade para um poluente que não o previsto;
  - As interferências tendo em conta dados meteorológicos, para averiguar a sensibilidade dos sensores relativamente às condições ambientais;
  - Ao fim de quanto tempo, é necessário voltar a calibrar os sensores, para que se perceba de quanto em quanto tempo é preciso haver esta manutenção da rede de sensores;
  - Analisar discrepâncias sistemáticas e tentar averiguar as possíveis causas associadas.
- Após a proposta de estudo mencionada anteriormente, e conforme as conclusões retiradas, deverá ser considerada a uniformização da marca dos sensores, bem como a definição de uma equipa multidisciplinar para o estudo e investigação de um algoritmo que processe, calibre e

valide os dados de forma praticamente automática. No seguimento da formação desta equipa, e conforme os resultados obtidos, deve ser averiguada a viabilidade e a importância científica de estruturar uma guia de boas práticas para o pré-processamento, calibração e manutenção dos sensores. Esta publicação deve ser aberta e gratuita, para aumentar o conhecimento científico nesta área de estudo, e permitir que estudos que sejam feitos com estes dados, tenham uma incerteza associada inferior.

- A curto-prazo, a autarquia deve prever também a uniformização das classes do índice de qualidade do ar criado pela CML com as classes do índice QualAr, para não gerar confusão por parte da sociedade civil. Deve também facilitar o processo de *download* dos dados gerados pelos sensores para o público comum, com opções de filtragem para a localização e parâmetro, e em que seja possível selecionar o formato do ficheiro. Além disso, é importante que se proceda à atualização do documento dos metadados relativos à rede de monitorização por sensores, evidenciando de forma mais clara, que os dados disponibilizados não se encontram calibrados e validados. Esta clarificação deve também ser evidenciada no site do Lisboa Aberta e ainda, no *Power BI*, onde é possível aceder a várias visualizações dos dados recolhidos pelos sensores. No documento dos metadados, deve também ser evidenciada a hiperligação para alcançar o *Power BI*, visto que só é possível alcançar esse site de forma indireta, através de fontes alternativas. Enquanto os dados não estão calibrados, deve ser ponderada a disponibilização de um conjunto de vídeos tutoriais que expliquem de que forma os dados podem ser descarregados e pré-processados através da API, de modo a democratizar o acesso à informação.
- A curto/médio prazo, a autarquia de Lisboa deveria prever a realização de relatórios técnicos periódicos e públicos, com novidades e atualizações relativamente à rede de sensores, com o objetivo de informar sobre possíveis alterações que foram realizadas às calibrações, quais os sensores que se encontram com problemas, sensores que foram alvo de manutenção, entre outros assuntos relacionados que poderão ser do interesse do público geral e científico.
- Após a calibração e normalização desta rede de monitorização, a câmara deverá apostar no planeamento de uma campanha de *marketing* e comunicação para dar a conhecer esta rede, com o objetivo de informar e sensibilizar o público geral para os problemas de qualidade do ar em Lisboa. Esta campanha poderá prever também a criação de mais momentos de debate público sobre a temática da qualidade do ar e, ainda, o planeamento e criação de uma aplicação *mobile* para facilitar o acesso em tempo real aos dados dos sensores. No âmbito da aplicação, poderia ser utilizada como base a *app* já existente *Lisboa 24*, e integrados os dados da rede de monitorização. Esta *app* poderia incluir também um sistema de aviso e alerta, com o

objetivo de apoiar as decisões dos cidadãos relativamente aos locais onde preferem deslocar-se.

- Para o desenvolvimento de todas estas sugestões é crucial que haja um envolvimento da comunidade, desde a sensibilização do cidadão, à criação de parcerias com entidades públicas, privadas, faculdades e centros de investigação. É evidente a necessidade de gerar mais dados, que possam traduzir em conhecimento; dados com mais qualidade, devidamente calibrados e validados; e consequentemente decisões políticas para a eficaz gestão da qualidade do ar, metas e estratégias cada vez mais ambiciosas; cidadãos mais informados e sensibilizados para a problemática da qualidade do ar e, ainda, melhor qualidade do ar e menos problemas de saúde e ambientais na cidade de Lisboa.

### 6.3 Limitações do estudo

Na realização desta dissertação recorreu-se a dados não validados por parte da CCDR-LVT, pelo que os dados de referência utilizados apresentam esta limitação. Adicionalmente, não foi possível o acesso aos processos de calibração prévios, nem aos estudos dos possíveis testes laboratoriais dos sensores em estudo, de ambas as marcas (MONITAR e QART).

### 6.4 Desenvolvimentos futuros

Após a realização desta dissertação, existem vários tópicos com potencial para serem aprofundados, nomeadamente:

- Efetuar uma análise estatística mais profunda, onde seriam isolados episódios de poluição atmosférica. Com este estudo, seria possível perceber de melhor forma o funcionamento dos micro sensores, bem como quais são as condições ideais a que podem ser submetidos;
- Analisar a qualidade dos dados dos sensores das restantes localizações;
- Efetuar um estudo semelhante a este, mas para os outros parâmetros ambientais da rede de monitorização da CML (ruído, meteorologia e mobilidade);
- Numa vertente mais social, seria interessante efetuar um estudo que tivesse como âmbito compreender a perceção do público comum sobre índices de qualidade do ar, bem como as ações tomadas aquando do conhecimento de determinado índice, para um determinado local, com enfoque na cidade de Lisboa;
- Criar uma *Application Programming Interface* (API), que através da localização da pessoa, e respetivamente sincronizado com os dados da rede de monitorização, faça uma estimativa da exposição pessoal à poluição atmosférica.

- Aleixandre, M., & Gerboles, M. (2012). *Review of Small Commercial Sensors for Indicative Monitoring of Ambient Gas*. 30. [www.aidic.it/cet](http://www.aidic.it/cet)
- AML. (2018). *Volume I - Definição do cenário base de adaptação para a AML*. [https://www.aml.pt/susProjects/susWebBackOffice/uploadFiles/wt1wwpgf\\_aml\\_sus\\_pt\\_site/componentPdf/SUS5BD0A09029884/PMAAC\\_AML\\_P021\\_VOL1\\_CENARIO\\_BASE\\_ADAPTACAO](https://www.aml.pt/susProjects/susWebBackOffice/uploadFiles/wt1wwpgf_aml_sus_pt_site/componentPdf/SUS5BD0A09029884/PMAAC_AML_P021_VOL1_CENARIO_BASE_ADAPTACAO)
- AML. (2022). *Assembleia Municipal de Lisboa: AM de Lisboa recomenda implementação da Zona de Emissões Reduzidas na Avenida, Baixa e Chiado*. <https://www.am-lisboa.pt/101000/1/017612,032022/index.htm>
- Amorim, M. T. (2015). *Avaliação de Sensores de Baixo Custo e de Métodos de Referência para a Monitorização da Qualidade do Ar* [Dissertação de Mestrado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro]. <http://hdl.handle.net/10773/15875>
- APA. (2021a). *Índice de Qualidade do Ar | Relatório do Estado do Ambiente*. <https://rea.apambiente.pt/content/%C3%ADndice-de-qualidade-do-ar>
- APA. (2021b). *Poluição atmosférica por dióxido de azoto | Relatório do Estado do Ambiente*. <https://rea.apambiente.pt/content/polui%C3%A7%C3%A3o-atmosf%C3%A9rica-por-di%C3%B3xido-de-azoto>
- APA. (2022a). *Poluentes | Agência Portuguesa do Ambiente*. <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/polu-entes>
- APA. (2022b). *QualAr - Qualidade do AR*. <https://qualar.apambiente.pt/indices>
- APA. (2022c). *Redes de medição | Agência Portuguesa do Ambiente*. <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/redes-de-medicao>
- Bajaj, A. (2019). *What does your classification metric tell about your data? | by Aayush Bajaj | Towards Data Science*. What Does Your Classification Metric Tell about Your Data? <https://towardsdatascience.com/what-does-your-classification-metric-tell-about-your-data-4a8f35408a8b>
- Baker, T., Green, D., Grieve, A., & Barratt, B. (2022). *Breathe London network report October –December 2021*. 11.
- Banerjee, A., Chitnis, U. B., Jadhav, S. L., Bhawalkar, J. S., & Chaudhury, S. (2009). Hypothesis testing, type I and type II errors. *Industrial Psychiatry Journal*, 18(2), 127. <https://doi.org/10.4103/0972-6748.62274>
- Boogaard, H., Patton, A. P., Atkinson, R. W., Brook, J. R., Chang, H. H., Crouse, D. L., Fussell, J. C., Hoek, G., Hoffmann, B., Kappeler, R., Kutlar Joss, M., Ondras, M., Sagiv, S. K., Samoli, E., Shaikh, R.,

- Smargiassi, A., Szpiro, A. A., van Vliet, E. D. S., Vienneau, D., ... Forastiere, F. (2022). Long-term exposure to traffic-related air pollution and selected health outcomes: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 164. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2022.107262>
- 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 micro-sensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment*, 147, 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 micro-sensors versus reference methods: The EuNetAir Joint Exercise – Part II. *Atmospheric Environment*, 193, 127–142. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2018.08.028>
- Breathe London. (2022). *About The Network* — Breathe London. <https://www.breathelondon.org/about>
- Carslaw, D. C., & Ropkins, K. (2012). Openair - An r package for air quality data analysis. *Environmental Modelling and Software*, 27–28, 52–61. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2011.09.008>
- CCDR LVT. (2022a). *Avaliação da Qualidade do Ar na RLVT - CCDR LVT*. <https://www.ccdr-lvt.pt/ambiente/qualidade-do-ar/avaliacao-da-qualidade-do-ar-na-rlvt/>
- CCDR LVT. (2022b). *Planos e Programas para Melhoria da Qualidade do Ar - CCDR LVT*. <https://www.ccdr-lvt.pt/ambiente/qualidade-do-ar/planos-e-programas-para-melhoria-da-qualidade-do-ar/>
- Censos. (2021). *INE - Plataforma de divulgação dos Censos 2021 – Resultados Provisórios*. [https://www.ine.pt/scripts/db\\_censos\\_2021.html](https://www.ine.pt/scripts/db_censos_2021.html)
- Clarity. (2022). *Bloomberg funds one of the densest air monitoring networks with Clarity in Paris, France*. <https://www.clarity.io/blog/bloomberg-funds-one-of-the-densest-air-monitoring-networks-with-clarity-in-paris-france>
- CML. (2011). *Folheto informativo 1ª fase da ZER Lisboa*. [https://www.lisboa.pt/fileadmin/cidade\\_temas/mobilidade/documentos/FolhetoZER1\\_fase.pdf](https://www.lisboa.pt/fileadmin/cidade_temas/mobilidade/documentos/FolhetoZER1_fase.pdf)
- CML. (2012). *Folheto informativo 2ª fase da ZER Lisboa*. 2012. [https://www.lisboa.pt/fileadmin/cidade\\_temas/mobilidade/documentos/FolhetoZER2\\_fase.pdf](https://www.lisboa.pt/fileadmin/cidade_temas/mobilidade/documentos/FolhetoZER2_fase.pdf)
- CML. (2014). *3º Suplemento ao Boletim Municipal nº 1081*. [https://bmpjesquisa.cm-lisboa.pt/pls/OKUL/app\\_bm.download\\_my\\_file?p\\_file=2062](https://bmpjesquisa.cm-lisboa.pt/pls/OKUL/app_bm.download_my_file?p_file=2062)
- CML. (2015). *REOT 2015- Relatório do Estado do Ordenamento do Território (Volume I)*. [https://www.lisboa.pt/fileadmin/cidade\\_temas/urbanismo/planeamento\\_urbano/estudos\\_planos/REOT/REOT\\_2015\\_marco\\_2016.pdf](https://www.lisboa.pt/fileadmin/cidade_temas/urbanismo/planeamento_urbano/estudos_planos/REOT/REOT_2015_marco_2016.pdf)

- CML. (2020). *Zona de Emissões Reduzidas- Sumário Executivo*. [https://lisboaparapessoas.pt/wp-content/uploads/2021/11/zerabc\\_sumario.pdf](https://lisboaparapessoas.pt/wp-content/uploads/2021/11/zerabc_sumario.pdf)
- CML. (2021a). *Câmara Municipal de Lisboa, Ambiente, Qualidade Ambiental, Ar - Município de Lisboa*. <https://www.lisboa.pt/cidade/ambiente/qualidade-ambiental/ar>
- CML. (2021b). *Metainformação relativa à Monitorização de Parâmetros Ambientais da Cidade de Lisboa*.
- CML. (2021c). *Rede de sensores monitoriza a qualidade do ar, níveis de ruído e trânsito - MUNICÍPIO de LISBOA*. <https://www.lisboa.pt/atualidade/noticias/detalhe/rede-de-sensores-monitoriza-a-qualidade-do-ar-niveis-de-ruído-e-transito>
- Comissão Europeia. (2013). *Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões um Programa Ar Limpo para a Europa*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52013DC0918&from=EN>
- Cui, Y., Lin, J., Song, C., Liu, M., Yan, Y., Xu, Y., & Huang, B. (2016). Rapid growth in nitrogen dioxide pollution over Western China. *Atmos. Chem. Phys*, 16, 2005–2013. <https://doi.org/10.5194/acp-16-6207-2016>
- Das, C., Sahoo, A. K., & Pradhan, C. (2022). Multicriteria recommender system using different approaches. *Cognitive Big Data Intelligence with a Metaheuristic Approach*, 259–277. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85117-6.00011-X>
- DEC NY. (2021). *2021 ANNUAL MONITORING NETWORK PLAN-New York State Ambient Air Monitoring Program*. [www.dec.ny.gov](http://www.dec.ny.gov)
- Deng, X., Liu, Q., Deng, Y., & Mahadevan, S. (2016). An improved method to construct basic probability assignment based on the confusion matrix for classification problem. *Information Sciences*, 340–341, 250–261. <https://doi.org/10.1016/J.INS.2016.01.033>
- DRE. (2008). *Portaria n.º 715/2008 do Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas*. Diário da República, 2.ª série — N.º 151 — 6 de Agosto de 2008. <https://dre.pt/dre/detalhe/portaria/715-2008-454517>
- DRE. (2009). *Despacho n.º 20763/2009 do Presidência do Conselho de Ministros e Ministérios da Administração Interna, do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, da Economia e da Inovação e das Obras Públicas, Transportes e Comunicações* (Diário da República, 2.ª série — N.º 180 — 16 de Setembro de 2009). Diário da República, 2.ª série — N.º 151 — 6 de Agosto de 2008.
- DRE. (2010). *Portaria n.º 961/2010 de 23 de Setembro do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território*. Diário da República, 1.ª série — N.º 186 — 23 de Setembro de 2010. <https://dre.pt/dre/detalhe/portaria/961-2010-342113>
- DRE. (2015). *Decreto-Lei n.º 43/2015 de 27 de março do Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia*. Diário da República, 1.ª série — N.º 61 — 27 de março de 2015. <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/43-2015-66863795>

- DRE. (2016). *Resolução do Conselho de Ministros n.º 46/2016 da Presidência do Conselho de Ministros*. Diário da República, 1.ª série — N.º 164 — 26 de agosto de 2016. [https://dre.pt/dre/detalhe/resolucao-conselho-ministros/46-2016-75207497?\\_ts=1656633600034](https://dre.pt/dre/detalhe/resolucao-conselho-ministros/46-2016-75207497?_ts=1656633600034)
- DRE. (2017). *Decreto-Lei n.º 47/2017 de 10 de maio do Ministério do Ambiente*. Diário da República, 1.ª série — N.º 90 — 10 de maio de 2017. <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/47-2017-106982550>
- DRE. (2019). *Portaria n.º 116-A/2019 do Finanças, Administração Interna, Adjunto e Economia, Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, Saúde, Planeamento e Infraestruturas, Ambiente e Transição Energética e Mar - Gabinetes dos Ministros das Finanças, da Administração Interna, Adjunto e da Economia e da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, da Ministra da Saúde, do Ministro do Ambiente e da Transição Energética, da Ministra do Mar e dos Secretários de Estado das Autarquias Locais e das Infraestruturas*. Diário da República, 2.ª série — N.º 24 — 4 de fevereiro de 2019. <https://dre.pt/dre/detalhe/portaria/116-a-2019-119190178>
- EEA. (2013). *Every breath we take: improving air quality in Europe*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2800/82831>
- EEA. (2018). *Air quality in Europe - 2018 report*. <https://doi.org/10.2800/777411>
- EEA. (2021). *Air pollution sources — European Environment Agency*. <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-sources-1>
- EEA. (2022a). *Air pollution: how it affects our health — European Environment Agency*. <https://www.eea.europa.eu/themes/air/health-impacts-of-air-pollution>
- EEA. (2022b). *Europe's air quality status 2022 — European Environment Agency*. <https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe-2022>
- Emery, C., Liu, Z., Russell, A. G., Odman, M. T., Yarwood, G., & Kumar, N. (2017). *Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance*. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027>
- EUR-Lex. (1996). *Directiva 96/62/CE do Conselho de 27 de Setembro de 1996 relativa à avaliação e gestão da qualidade do ar*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:31996L0062&from=PT>
- EUR-Lex. (1999). *Directiva 1999/30/CE do Conselho de 22 de Abril de 1999, relativa a valores-limite para o dióxido de enxofre, dióxido de azoto e óxidos de azoto, partículas em suspensão e chumbo no ar ambiente*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/86046325-3a2a-4d4a-bd7d-ff505a40ab5b/language-pt>
- EUR-Lex. (2000). *Directiva 2000/69/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Novembro de 2000, relativa a valores-limite para o benzeno e o monóxido de carbono no ar ambiente*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0069&from=PT>
- EUR-Lex. (2004). *Directiva 2004/107/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 15 de Dezembro de 2004, relativa ao arsénio, ao cádmio, ao mercúrio, ao níquel e aos hidrocarbonetos aromáticos*

- policíclicos no ar ambiente.* <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:023:0003:0016:PT:PDF>
- EUR-Lex. (2008). *Directiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 21 de Maio de 2008, relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa.* <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=PT>
- Fachinger, F., Drewnick, F., & Borrmann, S. (2021). How villages contribute to their local air quality – The influence of traffic- and biomass combustion-related emissions assessed by mobile mappings of PM and its components. *Atmospheric Environment*, 263. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2021.118648>
- Faria, T., Martins, V., Correia, C., Canha, N., Diapouli, E., Manousakas, M., Eleftheriadis, K., & Almeida, S. M. (2020). Children’s exposure and dose assessment to particulate matter in Lisbon. *Building and Environment*, 171, 106666. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.106666>
- Farias, M., Segatelli, A., Lima, A., Okada, V., & Feliciano, M. (2019). *Análise das Concentrações de Dióxido de Azoto (NO2) no Concelho de Lisboa* (E. E. and T. P. CIEEMAT’19- Entrepreneurship, Ed.). Politécnico de Portalegre.
- Feijão, J. C. N. (2021). *Avaliação da 3ª fase da zona de emissões reduzidas de Lisboa e perspetivas futuras* [Dissertação de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente]. Universidade NOVA de Lisboa- Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Ferreira, F. (2020). *Química da atmosfera.*
- Ferreira, F., Gomes, P., Tente, H., Carvalho, A. C., Pereira, P., & Monjardino, J. (2015). Air quality improvements following implementation of Lisbon’s Low Emission Zone. *Atmospheric Environment*, 122, 373–381. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2015.09.064>
- Ferreira, F., Monjardino, J., Tente, H., Maciel, H., Rodrigues, J., Duarte, C., Mendes, L., Teixeira, S., Pereira, P., Barros, N., Manso, C., Fontes, T., Nogueira, L., & Mesquita, S. (2017). [CCDR LVT, FCT/UNL, UFP] *Plano de Melhoria da Qualidade do Ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo para os Poluentes Partículas PM10 e NO2 nas Aglomerações da Área Metropolitana de Lisboa Norte e Área Metropolitana de Lisboa Sul.* <https://www.ccdr-lvt.pt/wp-content/uploads/2022/02/Segundo-Plano-Melhoria-Qar-RLVT-PoluentesParticulas-DioxidoAzoto.pdf>
- Gijbels, I., & Hubert, M. (2009). Robust and Nonparametric Statistical Methods. *Comprehensive Chemometrics*, 1, 189–211. <https://doi.org/10.1016/B978-044452701-1.00093-4>
- Giordano, M. R., Malings, C., Pandis, S. N., Presto, A. A., McNeill, V. F., Westervelt, D. M., Beekmann, M., & Subramanian, R. (2021). From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors. *Journal of Aerosol Science*, 158. <https://doi.org/10.1016/J.JAEROSCI.2021.105833>
- Gressent, A., Malherbe, L., Colette, A., Rollin, H., & Scimia, R. (2020). Data fusion for air quality mapping using low-cost sensor observations: Feasibility and added-value. *Environment International*, 143. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2020.105965>

- Hanna, S., Britter, R. E., & Hanna, S. R. (2003). Flow and dispersion in urban areas. *Article in Annual Review of Fluid Mechanics*, 35, 469–496. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161147>
- ICL. (2022). *Breathe London Node | Imperial College London Online Store*. ICL. <https://estore.imperial.ac.uk/product-catalogue/faculty-of-medicine/school-of-public-health/breathe-london-node>
- INE. (2021). *Portal do INE*. [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_unid\\_territorial&menuBOUI=13707095&contexto=ut&selTab=tab3](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_unid_territorial&menuBOUI=13707095&contexto=ut&selTab=tab3)
- IPMA. (2015). *PORTAL DO CLIMA*. <http://portaldoclima.pt/pt/>
- IPMA. (2022a). *Instituto Português do Mar e da Atmosfera*. <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1981-2010/>
- IPMA. (2022b). *IPMA - Clima Normais*. <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>
- IPMA. (2022c). *IPMA - Glossário Meteorológico*. [https://www.ipma.pt/pt/educativa/glossario/meteorologico/index.jsp?page=glossario\\_mn.xml&print=true](https://www.ipma.pt/pt/educativa/glossario/meteorologico/index.jsp?page=glossario_mn.xml&print=true)
- Jiang, Y. X., Zhou, L. X., Yang, L. L., Huang, Q. S., Xiao, H., Li, D. W., Zhou, Y. M., Hu, Y. G., Tang, E. J., Li, Y. F., Ji, A. L., Luo, P., & Cai, T. J. (2022). The association between short-term exposure to ambient carbon monoxide and hospitalization costs for bronchitis patients: A hospital-based study. *Environmental Research*, 210. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.112945>
- Johnson, E. B., & Gregory, S. (2019). Huntington’s disease: Brain imaging in Huntington’s disease. *Progress in Molecular Biology and Translational Science*, 165, 321–369. <https://doi.org/10.1016/BS.PMBTS.2019.04.004>
- Karagulian, F., Gerboles, M., Barbiere, M., Kotsev, A., Lagler, F., Karagulian, F., & Gerboles, M. (2019). *Review of sensors for air quality monitoring*. <https://doi.org/10.2760/568261>
- Kuula, J., Timonen, H., Niemi, J. v, Manninen, H. E., Rönkkö, T., Hussein, T., Fung, P. L., Tarkoma, S., Laakso, M., Saukko, E., Ovaska, A., Kulmala, M., Karppinen, A., Johansson, L., & Petäjä, T. (2022). Opinion: Insights into updating Ambient Air Quality Directive 2008/50/EC. *Atmos. Chem. Phys*, 22, 4801–4808. <https://doi.org/10.5194/acp-22-4801-2022>
- Lead, C.-O., Ehhalt, D., Lead, M. P., Dentener, F., Derwent, R., Dlugokencky, E., Holland, E., Isaksen, I., Katima, J., Kirchhoff, V., Matson, P., Midgley, P., Wang, M., Authors, C., Berntsen, T., Bey, I., Brasseur, G., Buja, L., Collins, W. J., ... Yantosca, R. (2018). *Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases 4 Contents*.
- Li, S., He, H., Zhao, P., & Cheng, S. (2022). Data cleaning and restoring method for vehicle battery big data platform. *Applied Energy*, 320, 119292. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.119292>
- Li Vigni, M., Durante, C., & Cocchi, M. (2013). Exploratory Data Analysis. *Data Handling in Science and Technology*, 28, 55–126. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59528-7.00003-X>
- Li, Y., Yuan, Z., Chen, L. W. A., Pillarisetti, A., Yadav, V., Wu, M., Cui, H., & Zhao, C. (2022). From air quality sensors to sensor networks: Things we need to learn. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 351, 130958. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2021.130958>

- Lisboa Aberta. (2022). *Conjuntos dos Dados*. <https://lisboaaberta.cm-lisboa.pt/index.php/pt/dados/conjuntos-de-dados>
- Marques da Costa, E. (2016). *Atlas Digital da AML- Socio Economia*. [https://www.aml.pt/index.php?cp=COMPONENT\\_TEXT&sr=SUS57FCBBEE58CA4&item=](https://www.aml.pt/index.php?cp=COMPONENT_TEXT&sr=SUS57FCBBEE58CA4&item=)
- Marques Da Costa, N. (2016). *Atlas Digital da AML- Acessibilidade e Transportes*. [https://www.aml.pt/index.php?cp=COMPONENT\\_TEXT&sr=SUS57FCBBEE58CA4&item=](https://www.aml.pt/index.php?cp=COMPONENT_TEXT&sr=SUS57FCBBEE58CA4&item=)
- Martins, J. L. (2017). *Measuring Air Quality with Low-Cost Sensors in Citizen Science Applications* [[Dissertação para obtenção do Grau de Mestre de Ciência em Tecnologias Geoespaciais, Universidade NOVA de Lisboa- Information Management School]. <http://hdl.handle.net/10362/34459>
- Mead, M. I., Popoola, O. A. M., Stewart, G. B., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi, J. J., Mcleod, M. W., Hodgson, T. F., Dicks, J., Lewis, A., Cohen, J., Baron, R., Saffell, J. R., & Jones, R. L. (2012). *The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks Atmospheric Environment Atmospheric Environment 70 (2013) 186e203*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.060>
- Miskell, G., Salmond, J., & Williams, D. E. (2017). Low-cost sensors and crowd-sourced data: Observations of siting impacts on a network of air-quality instruments. *Science of The Total Environment, 575*, 1119–1129. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.09.177>
- Mukherjee, A., & Hafner, H. (2021). *Watts Rising Air Quality Monitoring Study Report*. <https://www.wattsrising.org/data/cleanair>
- Nikunja Sundaray, S. K., & Rai Bhardwaj, S. (2019). *NCAP National Clean Air Programme*. Ministry of Environment, Forest & Climate Change. [www.moef.nic.in](http://www.moef.nic.in)
- Nisbet, R., Elder, J., & Miner, G. (2009). *Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications* (Elsevier's Science & Technology, Ed.). [www.RexerAnalytics.com](http://www.RexerAnalytics.com)
- Nogueira, L., & Mesquita, S. (2017). [CCDR-LVT] *Avaliação da Qualidade do Ar ambiente na região de Lisboa e Vale do Tejo em 2016*. [https://www.ccdr-lvt.pt/wp-content/uploads/2022/02/Relatorio\\_Avaliacao\\_QualidadeAr-2016.pdf](https://www.ccdr-lvt.pt/wp-content/uploads/2022/02/Relatorio_Avaliacao_QualidadeAr-2016.pdf)
- Nogueira, L., & Mesquita, S. (2020). [CCDR-LVT] *Avaliação da qualidade do ar ambiente na região de Lisboa e Vale do Tejo em 2019*. [https://www.ccdr-lvt.pt/wp-content/uploads/2022/02/Relatorio\\_Avaliacao\\_QualidadeAr-2019.pdf](https://www.ccdr-lvt.pt/wp-content/uploads/2022/02/Relatorio_Avaliacao_QualidadeAr-2019.pdf)
- Nogueira, L., & Mesquita, S. (2021). [CCDR-LVT] *Avaliação da qualidade do ar ambiente na região de Lisboa e Vale do Tejo em 2020*. [https://www.ccdr-lvt.pt/wp-content/uploads/2022/02/Relatorio\\_Avaliacao\\_QualidadeAr-2020.pdf](https://www.ccdr-lvt.pt/wp-content/uploads/2022/02/Relatorio_Avaliacao_QualidadeAr-2020.pdf)
- Okafor, N. U., Alghorani, Y., & Delaney, D. T. (2020). Improving Data Quality of Low-cost IoT Sensors in Environmental Monitoring Networks Using Data Fusion and Machine Learning Approach. *ICT Express, 6(3)*, 220–228. <https://doi.org/10.1016/J.ICTE.2020.06.004>
- Oladini, D., Ho, H., Kheirbek, I., Jakubek, M., & Chafe, Z. (2022). *C40 Cities (2022) Sensing Change (2)*.

- Ottosen, T.-B., & Kumar, P. (2019). *Outlier detection and gap filling methodologies for low-cost air quality measurements*. <https://doi.org/10.1039/c8em00593a>
- Pierre, S. (2021). Ground-level ozone over time: An observation-based global overview. Em *Current Opinion in Environmental Science and Health* (Vol. 19). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.100226>
- PORDATA. (2015). *PORDATA - Ambiente de Consulta*. <https://www.pordata.pt/DB/Municipios/Ambiente+de+Consulta/Tabela>
- PORDATA. (2022). *PORDATA - Base de Dados dos Municípios*. <https://www.pordata.pt/Municipios>
- QualAr. (2022). *QualAR - Qualidade do AR*. <https://qualar.apambiente.pt/node/metodo-calculo-indices>
- Rachelle Duvall, B. M., Clements, A. L., Hagler, G., Kamal, A., Kilaru, V., Goodman, L., Frederick, S., Barkjohn, K. K., VonWald, I., Greene, D., & Dye, T. (2021). *Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors Use in Ambient, Outdoor, Fixed Site, Non-Regulatory Supplemental and Informational Monitoring Applications*.
- Rodrigues, A. (2013). *Avaliação da Qualidade do Ar a longo prazo da cidade de Lisboa* [Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Universidade NOVA de Lisboa-Faculdade de Ciências e Tecnologia]. <http://hdl.handle.net/10362/9937>
- Rodrigues Teixeira, A. C., Borges, R. R., Machado, P. G., Mouette, D., & Dutra Ribeiro, F. N. (2020). PM emissions from heavy-duty trucks and their impacts on human health. *Atmospheric Environment*, 241. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2020.117814>
- Rodrigues, V., Gama, C., Ascenso, A., Oliveira, K., Coelho, S., Monteiro, A., Hayes, E., & Lopes, M. (2021). Assessing air pollution in European cities to support a citizen centered approach to air quality management. *Science of The Total Environment*, 799, 149311. <https://doi.org/10.1016/J.SCI-TOTENV.2021.149311>
- Rovira, J., Domingo, J. L., & Schuhmacher, M. (2020). Air quality, health impacts and burden of disease due to air pollution (PM10, PM2.5, NO2 and O3): Application of AirQ+ model to the Camp de Tarragona County (Catalonia, Spain). *Science of the Total Environment*, 703. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.135538>
- Samad, A., Nuñez, D. R. O., Castillo, G. C. S., Laquai, B., & Vogt, U. (2020). Effect of relative humidity and air temperature on the results obtained from low-cost gas sensors for ambient air quality measurements. *Sensors (Switzerland)*, 20(18), 1–29. <https://doi.org/10.3390/s20185175>
- Santana, P., Almeida, A., Mariano, P., Correia, C., Martins, V., & Almeida, S. M. (2021). Air quality mapping and visualisation: An affordable solution based on a vehicle-mounted sensor network. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128194. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128194>
- Santos, F. M., Gómez-Losada, Á., & Pires, J. C. M. (2019). Impact of the implementation of Lisbon low emission zone on air quality. *Journal of Hazardous Materials*, 365, 632–641. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2018.11.061>

- Sengupta, A., Govardhan, G., Debnath, S., Yadav, P., Kulkarni, S. H., Parde, A. N., Lonkar, P., Dhangar, N., Gunwani, P., Wagh, S., Nivdange, S., Jena, C., Kumar, R., & Ghude, S. D. (2022). Probing into the wintertime meteorology and particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) forecast over Delhi. *Atmospheric Pollution Research*, *13*(6). <https://doi.org/10.1016/J.APR.2022.101426>
- Sgobba, F., Sampaolo, A., Patimisco, P., Giglio, M., Menduni, G., Ranieri, A. C., Hoelzl, C., Rossmadl, H., Brehm, C., Mackowiak, V., Assante, D., Ranieri, E., & Spagnolo, V. (2022). Compact and portable quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensor for carbon monoxide environmental monitoring in urban areas. *Photoacoustics*, *25*. <https://doi.org/10.1016/J.PACS.2021.100318>
- Simon, H., Baker, K. R., & Phillips, S. (2012). Compilation and interpretation of photochemical model performance statistics published between 2006 and 2012. *Atmospheric Environment*, *61*, 124–139. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2012.07.012>
- SIST. (2012a). *EN 14211:2012- Ambient air - Standard method for the measurement of the concentration of nitrogen dioxide and nitrogen monoxide by chemiluminescence*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/31489/a3ffc4b4f2f84e5ba16915016a2c9c0e/SIST-EN-14211-2012.pdf>
- SIST. (2012b). *EN 14626:2012- Ambient air - Standard method for the measurement of the concentration of carbon monoxide by non-dispersive infrared spectroscopy*. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/cbcbdbf2-8284-4062-99d5->
- SIST. (2014). *EN 12341:2014- Ambient air - Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM<sub>10</sub> or PM<sub>2.5</sub> mass concentration of suspended particulate matter*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/29133/5dca9312c2084eeaab0957f0f98e4cb7/SIST-EN-12341-2014.pdf>
- WHO. (2013). *Review of evidence on health aspects of air pollution-REVIHAAP Project Technical Report*. <http://www.euro.who.int/pubrequest>
- Wilcox, R. R. (2003). SUMMARIZING DATA. *Applying Contemporary Statistical Techniques*, 55–91. <https://doi.org/10.1016/B978-012751541-0/50024-9>
- Williams, R., Kilaru, V., Snyder, E., Kaufman, A., Dye, T., Rutter, A., Russell, A., & Hafner, H. (2014). *Air Sensor Guidebook*. [www.epa.gov/ord](http://www.epa.gov/ord)



## A.1 Análise embrionária dos dados

Tabela 6.1-Contagem dos valores impossibilitados de serem registrados ou que se encontravam indisponíveis (-99), em absoluto e relativo

		Contagem "-99"		% "-99"	
		Ms	Me	Ms	Me
CO	AVL		14	0,0%	0,2%
	ENT		11	0,0%	0,2%
	OLI		176	0,0%	2,9%
	SCB		8	0,0%	0,1%
NO <sub>2</sub>	AVL		8	0,0%	0,1%
	ENT	1	12	0,0%	0,2%
	OLI	3	11	0,1%	0,2%
	RES		161	0,0%	2,7%
	SCB	129	62	4,8%	1,0%
PM <sub>10</sub>	AVL		160	0,0%	2,6%
	ENT		118	0,0%	1,9%
	OLI		20	0,0%	0,3%
	SCB		35	0,0%	0,5%
PM <sub>2.5</sub>	ENT		134	0,0%	2,2%
	OLI		54	0,0%	0,8%
O <sub>3</sub>	ENT	143	256	2,6%	4,2%
	RES	13	14	0,3%	0,2%
	OLI	40		1,6%	

Tabela 6.2-Contagem dos valores sem registo (*nulls*), em absoluto e relativo, antes do tratamento dos dados

		<i>nulls</i>		<i>nulls (%)</i>	
		Ms	Me	Ms	Me
CO	AVL	648	69	11,4%	1,1%
	ENT	648	70	11,4%	1,1%
	OLI	549	68	9,6%	1,1%
	SCB	3031	71	91,8%	1,1%
NO <sub>2</sub>	AVL	648	69	11,4%	1,1%
	ENT	648	70	11,4%	1,1%
	OLI	549	69	9,7%	1,1%
	RES	1159	386	23,8%	6,6%
	SCB	3097	70	115,6%	1,1%
PM <sub>10</sub>	AVL	696	1	12,2%	0,0%
	ENT	2251	1	55,7%	0,0%
	OLI	593	293	10,4%	4,8%
	SCB	3080	1	102,4%	0,0%
PM <sub>2,5</sub>	ENT	2202	70	95,2%	1,1%
	OLI	593	1	14,4%	0,0%
O <sub>3</sub>	ENT	697	1	12,5%	0,0%
	RES	1521	1	31,4%	0,0%
	OLI	5	39	0,2%	0,6%

Tabela 6.3-Contagem dos outliers identificados, em absoluto e relativo e por tipologia

		outliers			outliers (%)		
		n Ms	fora do domínio	variação excessiva	Ms%	fora do domínio	variação excessiva
CO	AVL		0		0,0%		
	ENT	8	8		0,1%	0%	100%
	OLI	0	0	0	0,1%		
	SCB	6	6		0,2%	0%	100%
NO <sub>2</sub>	AVL	19	0	19	0,3%	100%	0%
	ENT	23	21	2	0,4%	9%	91%
	OLI	51	45	6	1,5%	12%	88%
	RES	1	0	1	0,0%	100%	0%
	SCB	433	430	3	16,2%	1%	99%
PM <sub>10</sub>	AVL	19	19		0,3%	0%	100%
	ENT	117	104	13	3,0%	11%	89%
	OLI	28	28		1,0%	0%	100%
	SCB	319	319		10,7%	0%	100%
PM <sub>2,5</sub>	ENT	1822	1807	15	79,6%	1%	99%
	OLI	1578	1575	3	60,6%	0%	100%
O <sub>3</sub>	ENT	1	0	1	0,0%	100%	0%
	RES	32	32		0,7%	0%	100%
	OLI	5	5		0,7%	0%	100%

## A.2 Caso de estudo: Cidade de Lisboa

### Caracterização da área de estudo

#### Instrumentos de melhoria da qualidade do ar

##### Primeira fase da ZER

Dando cumprimento à Deliberação Camarária n.º 247/CM/2011, publicada no 3.º Suplemento ao Boletim Municipal n.º 900, de 19 de maio, a 1ª fase entrou em vigor em 4 de julho de 2011, no eixo Marquês de Pombal/Terreiro do Paço, tendo sido caracterizada pela restrição de circulação de veículos que não cumprissem a norma de emissão “EURO 1” -veículos construídos antes de julho de 1992 (pré-EURO) e que não dispusessem de catalisador-, no período das 8h às 20h, em dias úteis, sendo contudo admitidas algumas exceções, tendo em conta a função da natureza da atividade ou titularidade dos veículos. Alguns exemplos de exceções são: residentes em Lisboa, veículos de emergência, especiais e de pessoas com mobilidade reduzida, veículos de interesse histórico (devidamente certificado) e transportes públicos. Apesar das restrições, a ZER poderia ser atravessada por qualquer tipo de veículo, entre a Rua das Pretas e a Praça da Alegria e entre a Rua da Conceição e a Calçada de São Francisco.

Na Figura 6.1 é possível observar a área abrangida pela 1ª fase da ZER e a respetiva sinalização.



Figura 6.1- Área abrangida pela 1ª fase da ZER e sinalização, respetiva.

Fonte:(CML, 2011)

##### Segunda fase da ZER

Dando cumprimento à Deliberação Camarária n.º 105/CM/2012, publicada no 3.º Suplemento ao Boletim Municipal n.º 941, de 1 de março, a 2ª fase da ZER foi aprovada em Reunião de Câmara no dia 29 de fevereiro de 2012, tendo entrado em vigor a 1 de abril de 2012. Esta segunda fase foi caracterizada pelo alargamento da área afeta à 1ª fase da ZER, bem como o aumento da exigência ambiental e a redução das exceções, passando a existir duas zonas com restrições à circulação(CML, 2012, 2014):

- Zona 1, relativo ao Eixo Marquês do Pombal/Terreiro do Paço- limitado a norte pela Rua Alexandre Herculano e a Sul pela Praça do Comércio- em que é restringida à circulação de veículos que não respeitem as normas de emissão EURO 2 (veículos ligeiros fabricados antes de janeiro de 1996 e pesados antes de outubro de 1996);

- Zona 2 - limitada pela Avenida de Ceuta, Eixo Norte-Sul (IP7), Avenida das Forças Armadas, Avenida dos Estados Unidos da América, Avenida General António Spínola, Avenida Infante D. Henrique- em que é restringida à circulação de veículos que não respeitem as normas de emissão EURO 1 (veículos fabricados antes de janeiro de 1992).

O período de funcionamento da ZER foi alargado, passando a condicionar o tráfego nos dias úteis entre as 7h e as 21h. No que toca às exceções, foram mantidas as da 1ª fase, tendo-se adicionado a exceção de todos os residentes de Lisboa poderem circular na zona 2, sem limitações(CML, 2012).

Pela mesma altura em que a 2ª fase da ZER foi implementada, o eixo rodoviário constituído pela Praça Marquês de Pombal e pela Avenida da Liberdade sofreu alterações significativas no seu modelo de circulação de trânsito, com o objetivo de reduzir o volume de tráfego de passagem, limitando o tráfego automóvel nas faixas laterais e reduzindo os lugares de estacionamento disponíveis. Outra medida adotada foi a instalação de uma rotunda na praça Marques de Pombal para aliviar o congestionamento do trânsito e a poluição atmosférica. Como resultado, o tráfego de veículos rodoviários começou a ser direcionado através de duas vias de rede concêntrica: a rotunda interior que direcionava o tráfego para as principais vias rodoviárias, e a rotunda exterior que direcionava o tráfego para as outras vias (Ferreira et al., 2015).

Segundo Ferreira et al. (2015), só quando esta 2ª fase foi implementada é que as limitações começaram a ter um impacto substancial nos regulamentos de composição da frota e de emissões, e foram avaliadas melhorias na qualidade do ar.

Na Figura 6.2 e na Figura 6.3, é possível observar a área abrangida pela 2ª fase da ZER e as respetivas sinalizações adotadas, para identificar a zona 1 e zona 2, respetivamente.

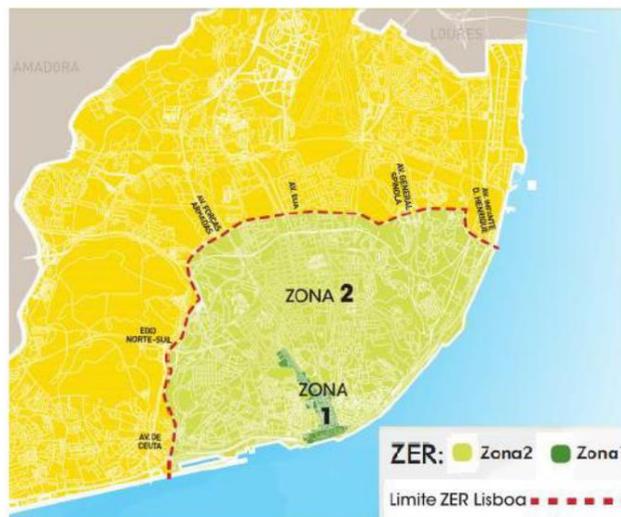


Figura 6.2- Área abrangida pela 2ª fase da ZER.  
Retirado de: (Feijão, 2021)



Figura 6.3- Sinalização adotada na 2ª fase da ZER.  
Retirado de:(Feijão, 2021)

### Terceira fase da ZER

Embora os resultados atingidos sejam positivos, face à implementação das duas fases da ZER de Lisboa, no que toca à qualidade do ar, os valores da estação da Avenida da Liberdade continuavam a exceder os limites máximos estabelecidos, pelo que, justificou-se a implementação de uma nova etapa da ZER.

Dando cumprimento à Deliberação Camarária n.º 642/CM/2014, publicada no 3.º Suplemento ao Boletim Municipal n.º 1081, de 29 de outubro, a 3ª fase entrou em vigor no dia 15 de janeiro de 2015, ocupando a mesma área geográfica delimitante da fase anterior da ZER, bem como o mesmo período de aplicação das restrições. A alteração que se verifica nesta 3ª fase prende-se apenas nas restrições aplicadas, em que:

- Zona 1 –apenas têm autorização para circular veículos que respeitem as normas de emissão Euro 3 (posteriores a 2000);
- Zona 2 –apenas têm autorização para circular veículos que respeitem as normas de emissão Euro 2 (posteriores a 1996).

Na Figura 6.4, é possível observar a sinalização adotada na 3ª fase da ZER.



Figura 6.4- Sinalização adotada na 3ª fase da ZER.

Retirado de:(Feijão, 2021)

Relativamente às exceções, nesta 3ª fase aplicam-se as verificadas nas duas anteriores fases. Não obstante disso, e devido às dificuldades que alguns profissionais do setor do transporte em táxi, aplicaram-se alterações a este setor, tendo sido considerada uma moratória entre 1 de julho de 2015 e 30 de junho de 2017, relativamente aos veículos ligeiros afetos a este setor. A moratória aplicável foi constituída por 3 fases: a primeira, a partir 1 de julho de 2015, a segunda, a partir de 1 de julho de 2016 e a terceira, a partir de 1 de julho de 2017 (CML, 2014).

### ZER Baixa-Chiado (ZER ABC)

O projeto da Zona de Emissões Reduzidas para a baixa de Lisboa foi uma proposta apresentada no início de 2020 por Fernando Medina, à data presidente da Câmara Municipal de Lisboa. A implementação da ZER ABC tinha início previsto para o verão de 2020, mas a pandemia da covid-19 fez com que o anterior executivo, presidido por Fernando Medina (PS), decidisse adiar o processo de forma indefinida. O executivo atual da Câmara Municipal de Lisboa, presidido por Carlos Moedas (PSD), não pretendeu avançar com o projeto, pelo que este se encontra suspenso por tempo indeterminado(AML, 2022).

Para esta nova ZER ABC estavam previstos três níveis de atuação(CML, 2020):

- Intervenções de qualificação do espaço público a montante, nas Avenida da Liberdade e Avenida Almirante Reis, que melhorem o acesso à Baixa em transportes públicos e de bicicleta;
- Criação de uma nova ZER, com acessos regulados na Baixa e Chiado, onde seriam privilegiados os acessos e a circulação de residentes, comerciantes e transporte público;
- Alargamento das Zonas de Acesso Automóvel Condicionado (ZAAC) da Bica e Castelo e alterações no modelo de circulação e na política de estacionamento, eliminação o tráfego de atravessamento e aumento das bolsas para viaturas de residentes, eliminação do estacionamento de rotação à superfície e aumento das áreas pedonais.

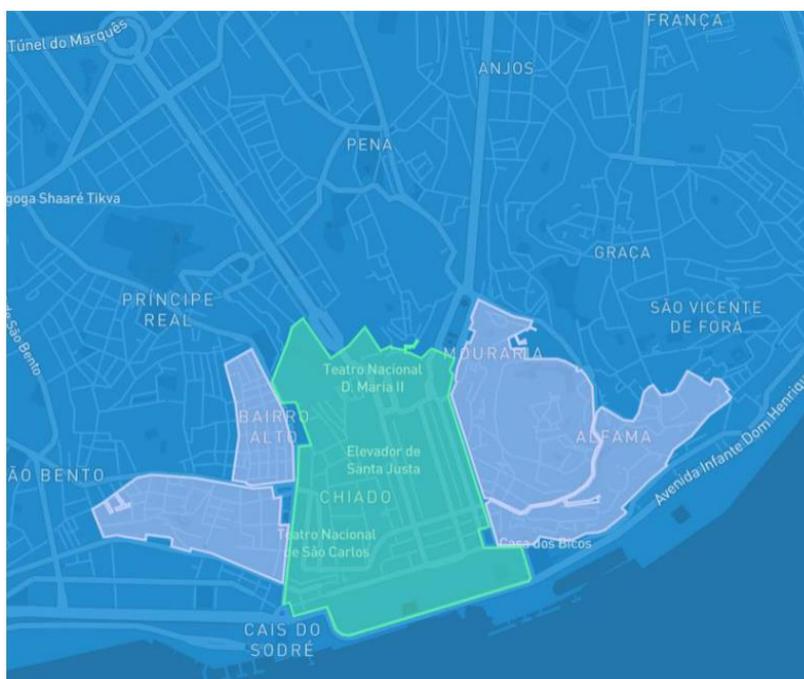


Figura 6.5- Mapa das áreas de intervenção do projeto ZER ABC  
Retirado de: Feijão, 2021

## A.3 Metodologia

### Construção do *Dataset*

Iniciou-se o processamento dos dados através da exportação dos dados dos sensores da plataforma online da Câmara Municipal de Lisboa, Lisboa Aberta. Utilizando a nomenclatura disponível no documento relativo aos Metadados, e adaptando o URL que remete para a consulta de dados históricos de um determinado período, e de uma determinada localização e poluente, foi possível exportar os vários conjuntos de dados diretamente para o Excel. Para isto, utilizou-se a ferramenta "obter dados a partir da Web" (disponível na aba "Dados"), que sucessivamente permite utilizar o editor do *Power Query*. Neste editor, é possível passar a lista de valores para uma tabela e sucessivamente de uma coluna, selecionar as que estão disponíveis ("*id*", "*avg*", "*date*", "*value*", "*unit*"). Neste caso, selecionou-se a "*id*", "*date*", "*value*" e "*unit*". De seguida, renomeou-se a coluna "*id*" para "Localização"; a "*date*" para "Data e hora"; a "*value*" para "Ms" (medições sensores); a "*unit*" para "unidade". Acrescentou-se uma coluna "Poluente". Tendo elaborado isto para todos os conjuntos de dados dos sensores (17 conjuntos), compactou-se os dados dos sensores por poluente, ficando-se assim com cinco "pré *datasets*", um para cada poluente.

No caso dos dados das estações fixas, inicialmente compactou-se os dados por poluente e localização, e de seguida, apenas por poluente, ficando-se igualmente com cinco "pré *datasets*". Para cada *dataset*, selecionaram-se as seguintes colunas, devidamente renomeadas: "Localização", "Data e Hora", "Poluente" e "Me" para os valores das Medições das estações. Tendo elaborado este processo para os vários poluentes, ficou-se com cinco *datasets*. Estes cinco *datasets*, são então unidos num único, resultando assim o *dataset* embrionário deste estudo.

### **Remoção dos erros de detecção**

Tendo o *dataset* preparado, começou-se por eliminar os erros recorrentes de detecção dos dados, neste caso, representados por um "-99". Foram ainda detetados uma quantidade significativa de omissão de dados. Todos os "-99" foram substituídos por células vazias.

Tabela 6.4- Métricas usadas para comparar dados de sensores. A inicial M, indica os dados dos sensores e o RM indica as medições de referência

Métricas de comparação	Sigla	Fórmulas matemáticas	Características	Notas
Erro de preconceito médio	MBE	$MBE = \overline{Ms} - \overline{Me}$	Estimativa da magnitude das diferenças entre a estimativa dos sensores e os valores de referência médios, durante todo o período de amostragem.	Unidades de concentração
Coefficientes de correlação	R	$\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Ms_i - \overline{Ms})(Me_i - \overline{Me})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Ms_i - \overline{Ms})^2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Me_i - \overline{Me})^2}}$	Mede a força e a direção de uma relação linear entre duas variáveis e recebe um valor entre -1 e 1; é independente da diferença na variação (var) de M e RM, assim se $r=1$ e $\text{var}(M) < \text{var}(RM)$ , então pode ser necessária correção de variação.	
Erro quadrado médio de raiz centrado	CRMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(Ms_i - \overline{Ms}) - (Me_i - \overline{Me})]^2}$	Utilizado para a decomposição quadrática do RMSE como soma de Erro de Viés Médio e Erro Médio de Raiz Centrado; é um indicador do erro aleatório do sensor. Pode ser normalizado com o desvio padrão das observações do instrumento de referência.	Unidades de concentração
Erro quadrado de raiz média	RMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Ms_i - Me_i)^2}$	Indica a magnitude do erro e mantém a unidade da variável; é sensível a valores extremos e a valores mais distantes; tende a variar em função do desvio padrão do RM.	Unidades de concentração
Erro quadrado de raiz média	NMSE	$\frac{\sum_{i=1}^n (Ms_i - Me_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Ms_i - \overline{Ms})^2} = \frac{\mu^2_{Ms-Me}}{\mu^2_{Ms}}$ <small>onde <math>\mu</math> indica o valor médio</small>	Estimativa dos desvios globais entre medições de referência e sensores; sensível a valores extremos.	%
Viés Fracional	FB	$\frac{\mu^2_{Ms-Me}}{\mu^2_{Ms}}$	Representa uma medida do acordo entre as concentrações médias medidas e as medições de referência. Um acordo perfeito implicaria que $FB=NMSE=0$	$-200\% \leq FB \leq +200\%$
Fator de Excedência	FOEX	$100 \times \left[ \frac{N(Ms_i > Me_i)}{N_{total}} - \frac{1}{2} \right]$	Mede a estimativa superior ou inferior das medições estudadas em relação aos dados de referência. A melhor condição seria que $FOEX = 0$ . $FOEX = -50$ resulta da subestimação completa das medições, enquanto $FOEX = 50$ significa sobrestimação completa.	%
Erro Absoluto Médio	MAE	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  Ms_i - Me_i $	Indica a média da magnitude dos erros; não indica a direção do erro, mas apenas a sua magnitude e a sua sensibilidade a <i>outliers</i> . Pode ser	Unidades de concentração

			normalizado com o desvio padrão das observações do instrumento de referência.	
Viés médio normalizado	NMB	$100\% \times \frac{\sum(Ms_i - Me_i)}{\sum Me_i}$	Reporta a média, emparelhando diferenças de previsão-observação normalizadas pela observação média	%

## A.4 Estudo de qualidade dos dados

### Parâmetro CO

#### Avenida da Liberdade

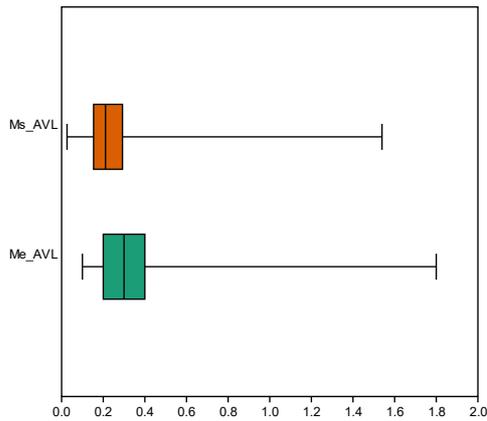


Figura 6.6- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro CO, na Avenida da Liberdade

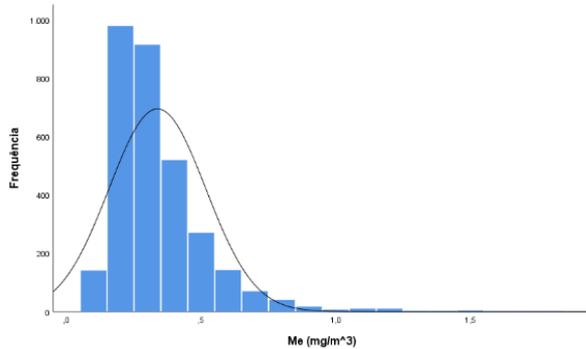
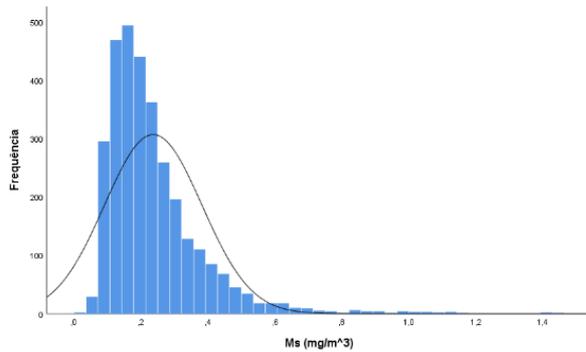


Figura 6.7- Histogramas relativos ao parâmetro CO, na Avenida da Liberdade.

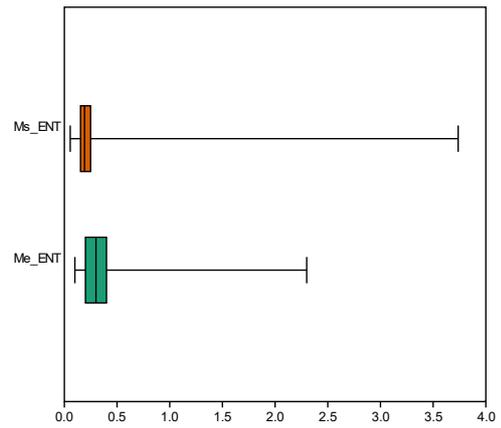


Figura 6.8- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro CO, em Entrecampos

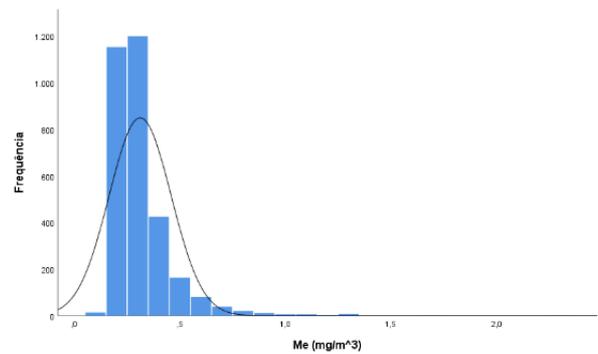
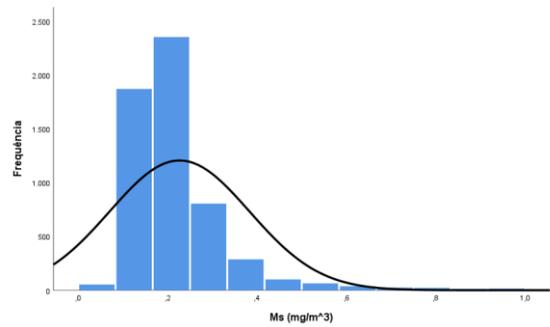


Figura 6.9- Histogramas relativos ao parâmetro CO, em Entrecampos.

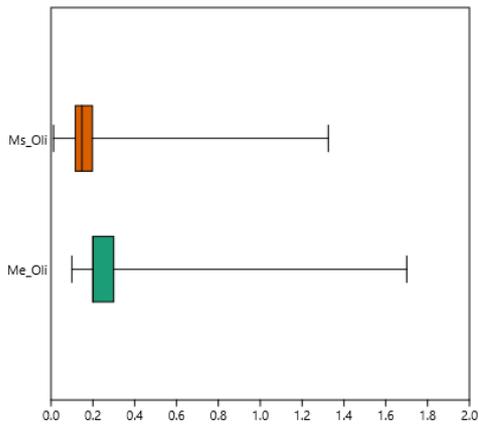


Figura 6.10- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro CO, nos Olivais

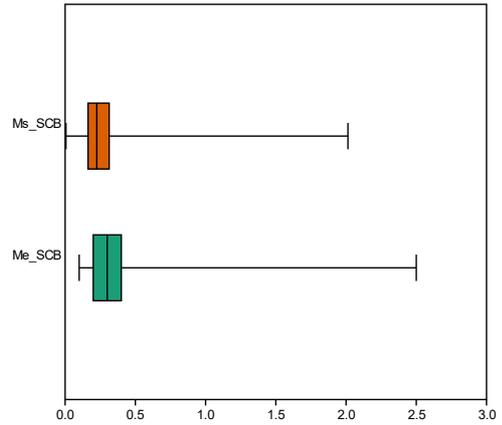


Figura 6.12- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro CO, em Santa Cruz de Benfica

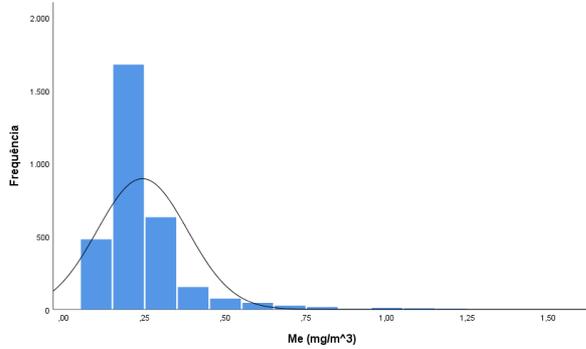
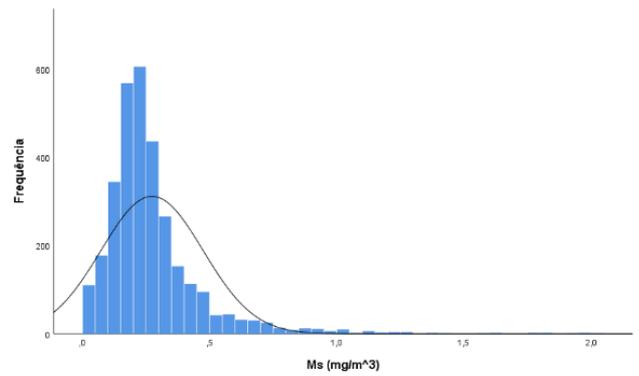
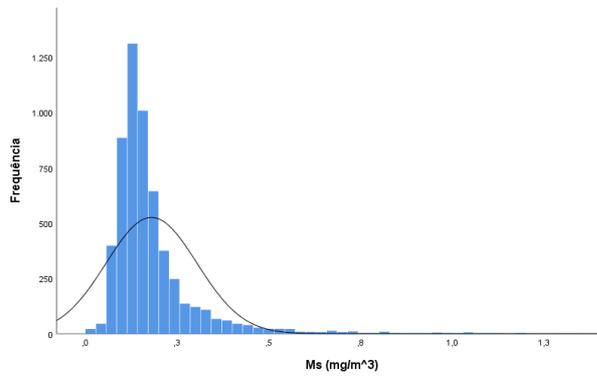


Figura 6.11- Histogramas relativos ao parâmetro CO, em Olivais.

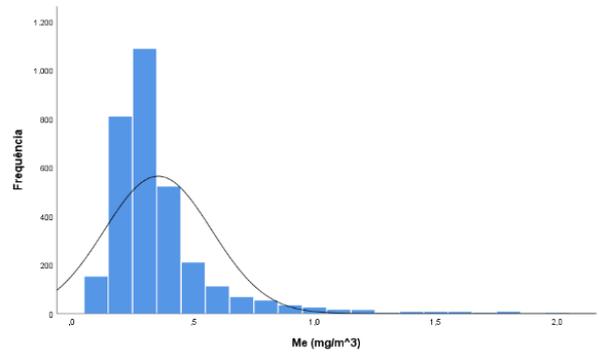


Figura 6.13- Histogramas relativos ao parâmetro CO, em Santa Cruz de Benfica.

## Parâmetro NO<sub>2</sub>

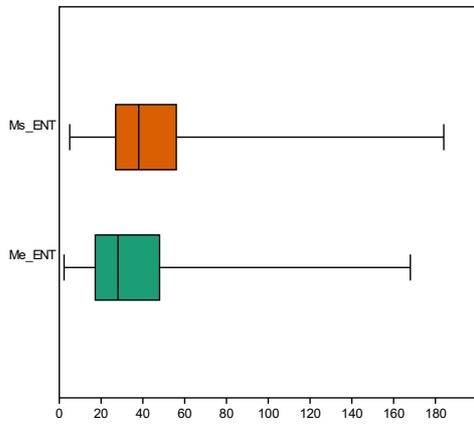


Figura 6.14- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro NO<sub>2</sub>, em Entrecampos

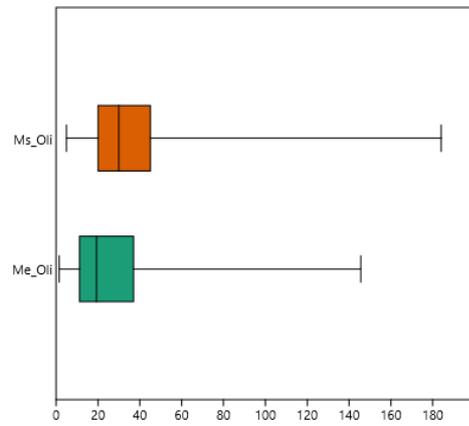


Figura 6.16- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro NO<sub>2</sub>, nos Olivas

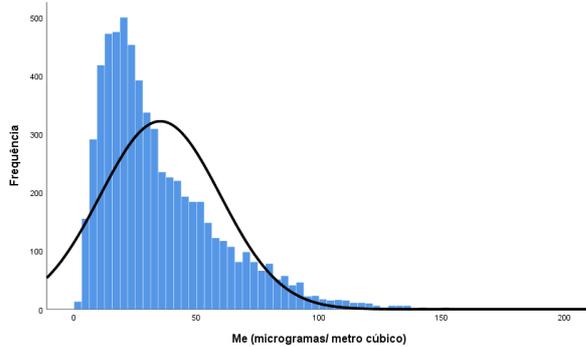
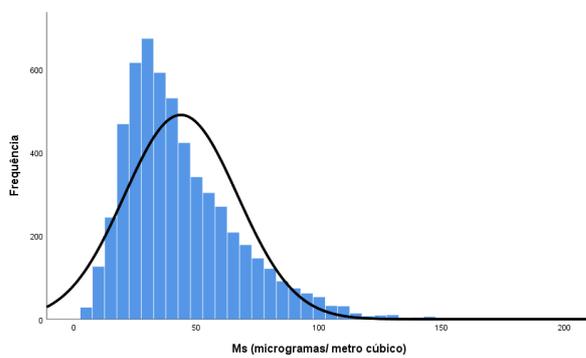


Figura 6.15- Histogramas relativos ao parâmetro NO<sub>2</sub>, em Entrecampos.

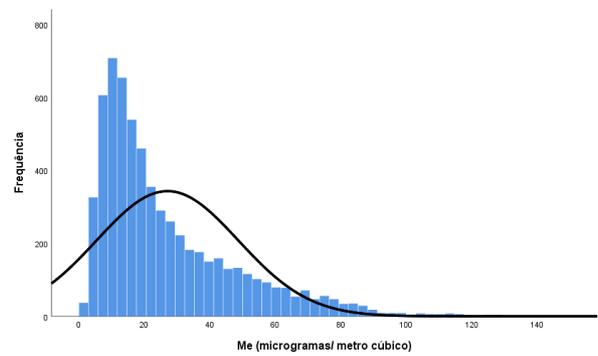
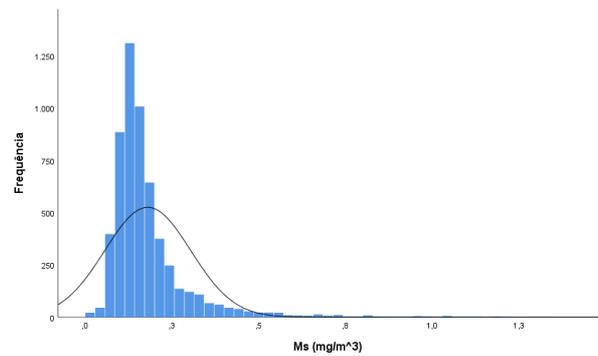


Figura 6.17- Histogramas relativos ao parâmetro NO<sub>2</sub>, nos Olivas.

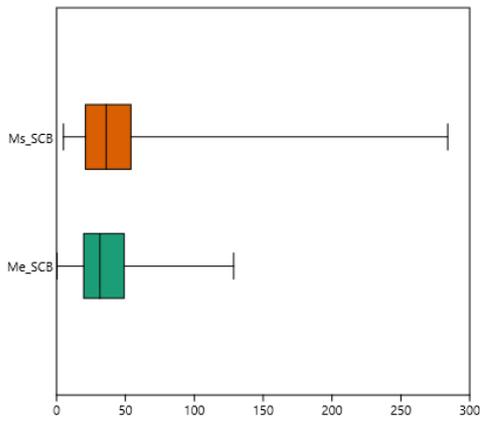


Figura 6.18- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro NO<sub>2</sub>, em Santa Cruz de Benfica

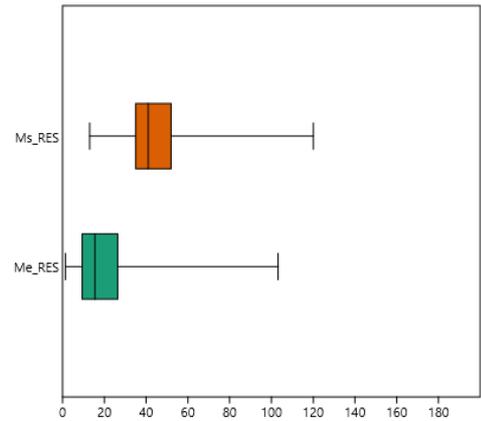


Figura 6.20- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro NO<sub>2</sub>, no Restelo

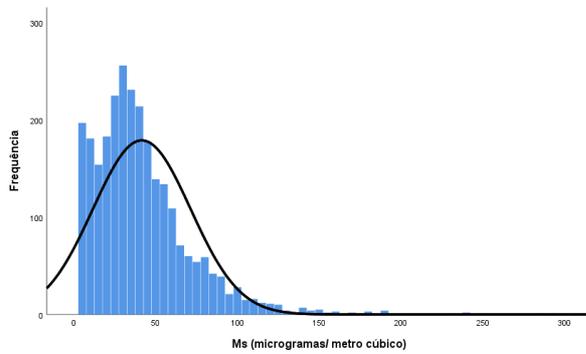


Figura 6.19- Histogramas relativos ao parâmetro NO<sub>2</sub>, em Santa Cruz de Benfica.

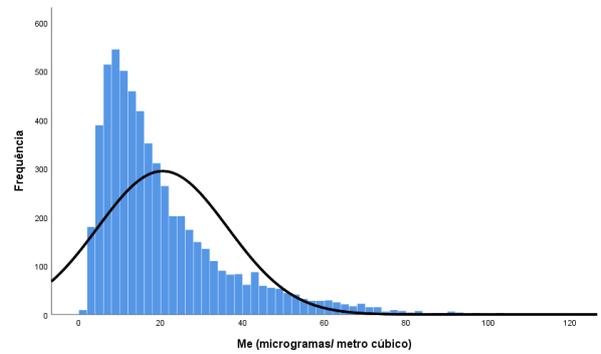


Figura 6.21- Histogramas relativos ao parâmetro NO<sub>2</sub>, nos Restelo.

## Parâmetro PM<sub>10</sub>

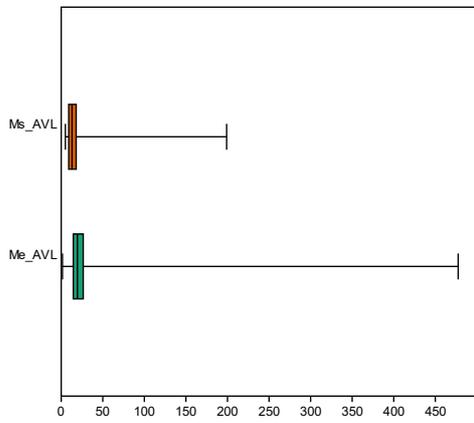


Figura 6.22- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM<sub>10</sub>, na Avenida da Liberdade

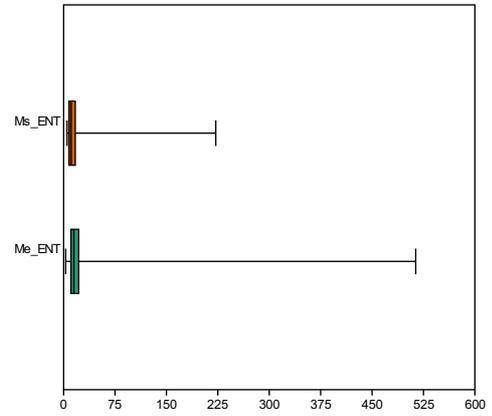


Figura 6.24- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM<sub>10</sub>, em Entrecampos

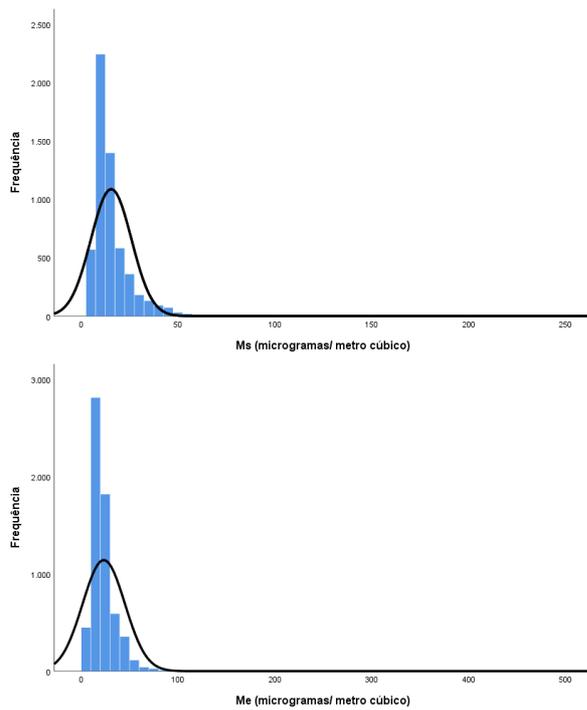


Figura 6.23- Histogramas relativos ao parâmetro PM<sub>10</sub>, na Avenida da Liberdade.

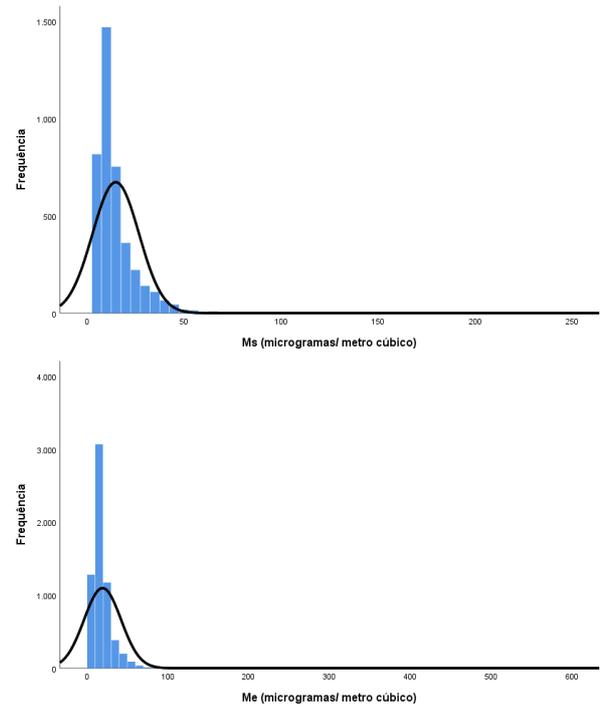


Figura 6.25- Histogramas relativos ao parâmetro PM<sub>10</sub>, em Entrecampos.

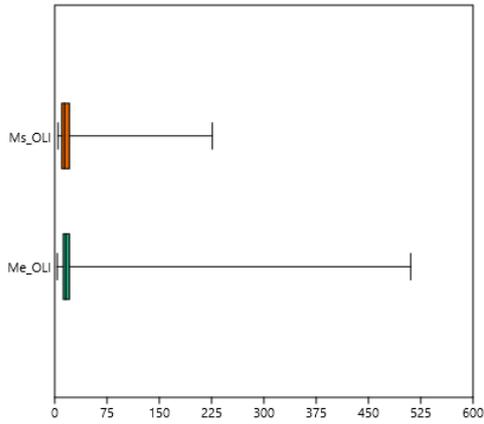


Figura 6.26- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM<sub>10</sub>, nos Olivais

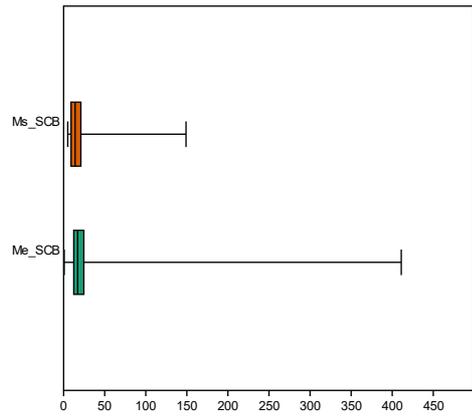


Figura 6.28- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM<sub>10</sub>, em Santa Cruz de Benfica

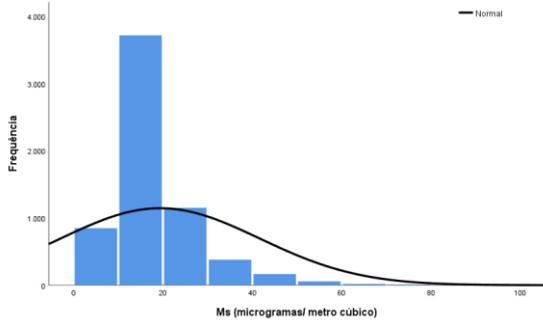
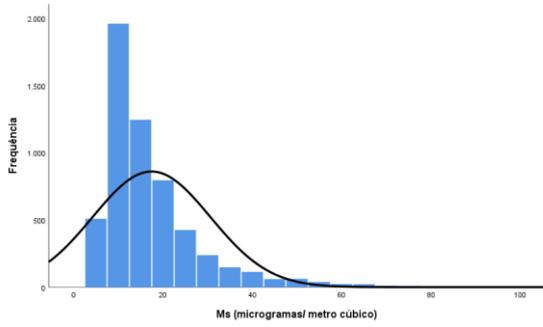


Figura 6.27- Histogramas relativos ao parâmetro PM<sub>10</sub>, nos Olivais.

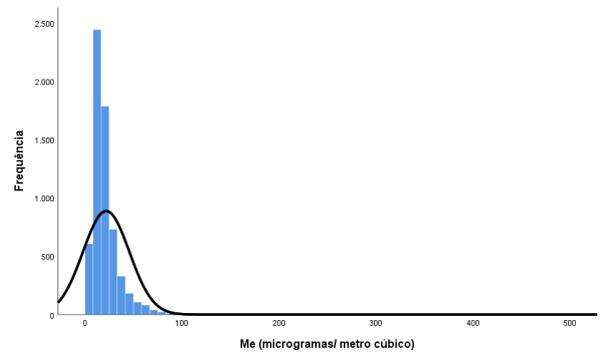
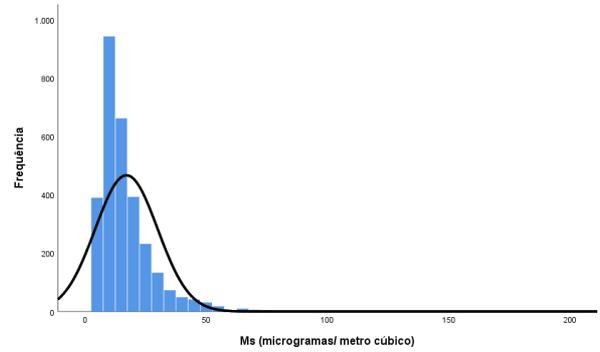


Figura 6.29- Histogramas relativos ao parâmetro PM<sub>10</sub>, em Santa Cruz de Benfica.

## Parâmetro PM<sub>2.5</sub>

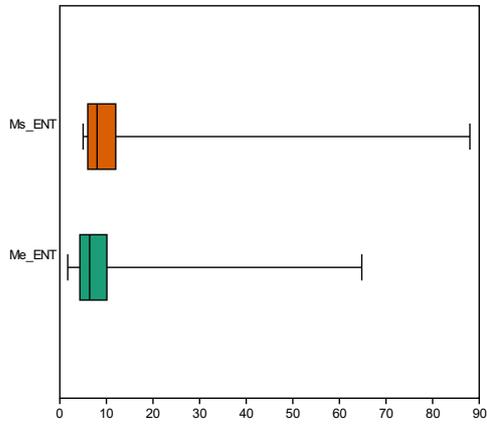


Figura 6.30- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM<sub>2.5</sub>, em Entrecampos

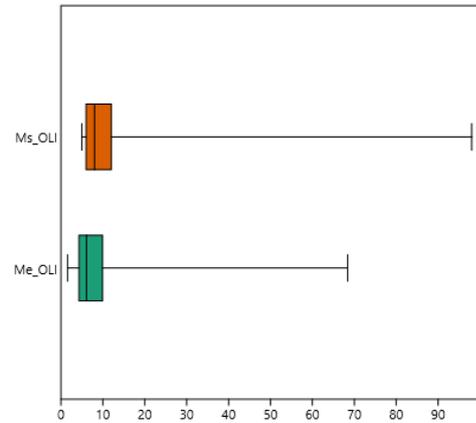


Figura 6.32- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro PM<sub>2.5</sub>, nos Olivais

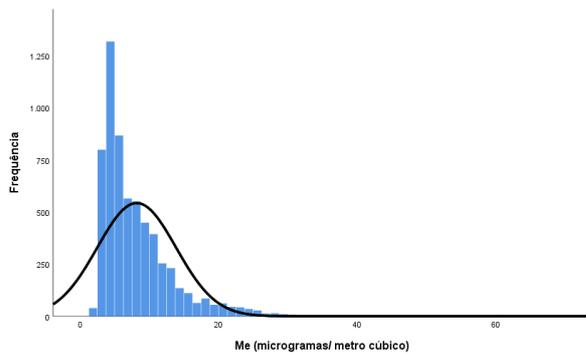
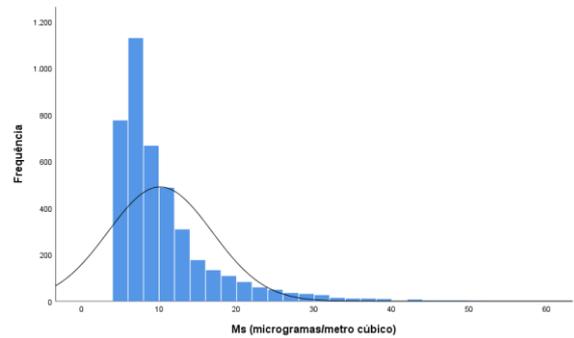
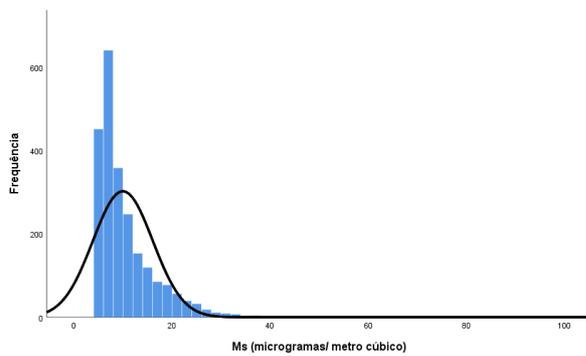


Figura 6.31- Histogramas relativos ao parâmetro PM<sub>2.5</sub>, em Entrecampos.

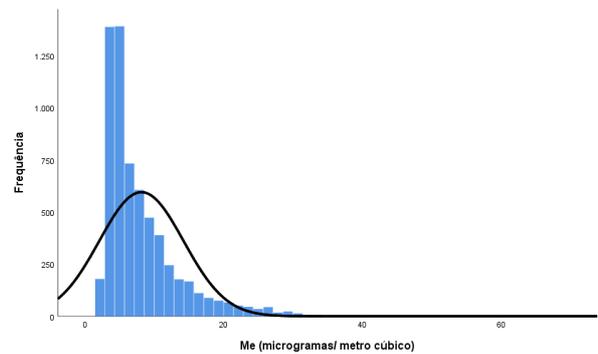


Figura 6.33- Histogramas relativos ao parâmetro PM<sub>2.5</sub>, nos Olivais.

## Parâmetro O<sub>3</sub>

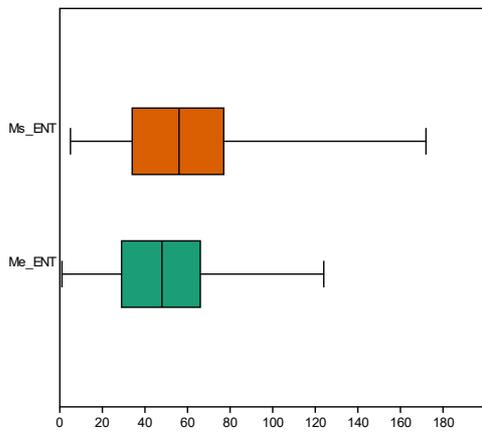


Figura 6.34- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro O<sub>3</sub>, em Entrecampos

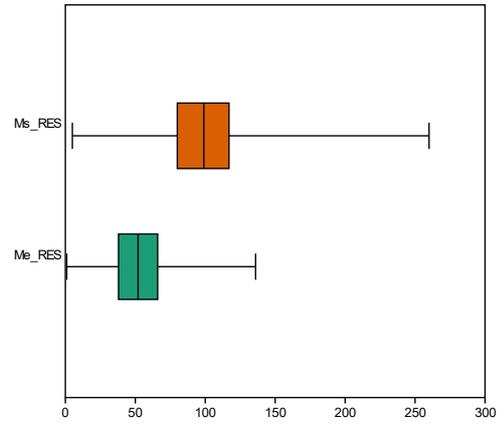


Figura 6.36- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro O<sub>3</sub>, no Restelo

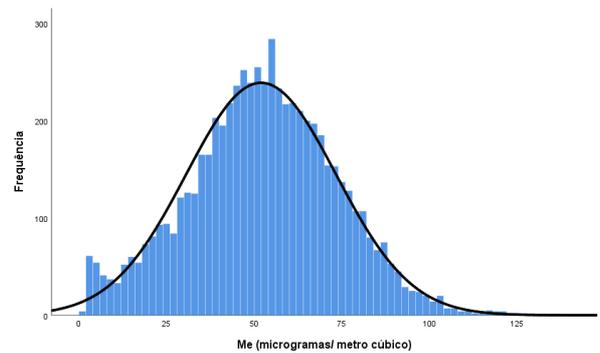
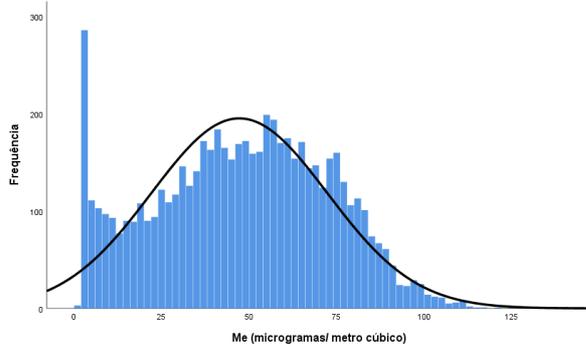
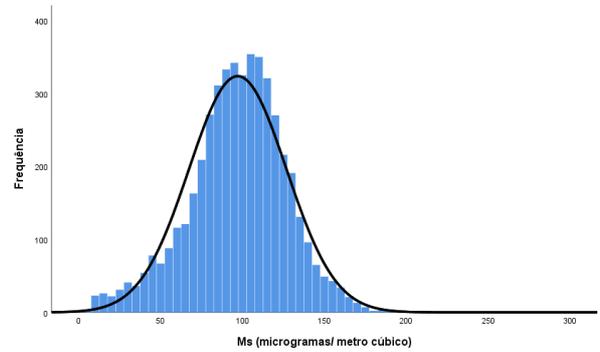
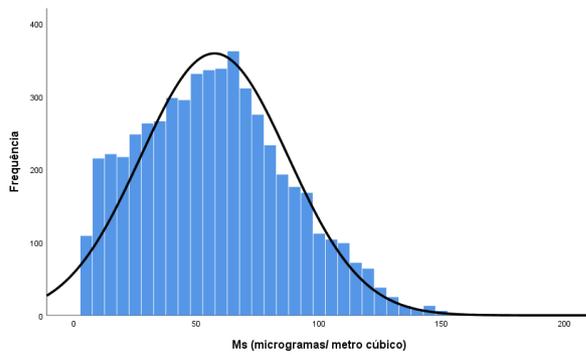


Figura 6.35- Histogramas relativos ao parâmetro O<sub>3</sub>, em Entrecampos

Figura 6.37- Histogramas relativos ao parâmetro O<sub>3</sub>, no Restelo

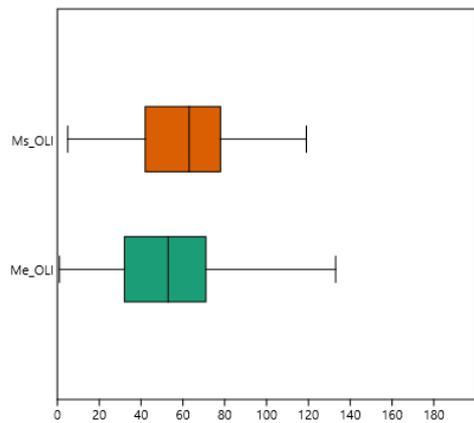


Figura 6.38- Gráficos de caixas relativos ao parâmetro  $O_3$ , nos Olivais

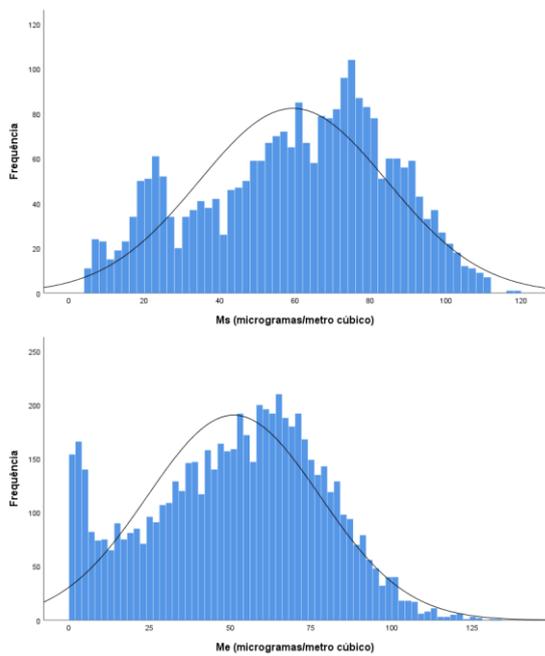


Figura 6.39- Histogramas relativos ao parâmetro  $O_3$ , nos Olivais

## A.5 Índice QualAr

### Parâmetro NO<sub>2</sub>

Tabela 6.5- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro NO<sub>2</sub>, em Entrecampos

	Médio	Bom	Muito bom
<b>Precisão</b>	25,0%	47,7%	99,2%
<b>Sensibilidade</b>	86,8%	57,9%	13,7%
<b>F1-score</b>	38,9%	52,3%	24,1%
<b>Exatidão</b>	40,8%		

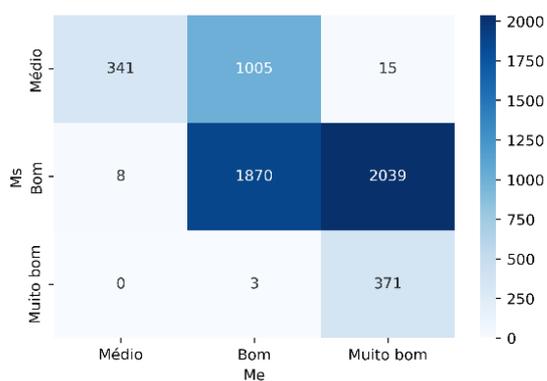


Figura 6.40-Matriz confusão do parâmetro NO<sub>2</sub>, em Entrecampos

Tabela 6.6- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro NO<sub>2</sub>, nos Olivais

	nan	Médio	Bom	Muito bom
<b>precisão</b>	0%	1%	5%	98%
<b>sensibilidade</b>	8%	44%	12%	8%
<b>f1-score</b>	0%	2%	7%	15%
<b>exatidão</b>	9%			

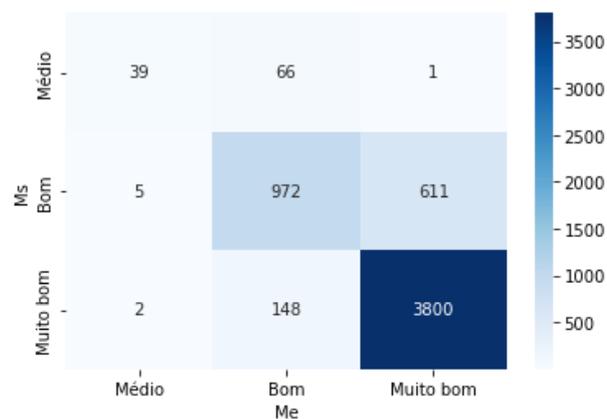


Figura 6.41-Matriz confusão do parâmetro NO<sub>2</sub>, nos Olivais

Tabela 6.7- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro NO<sub>2</sub>, em Santa Cruz de Benfica

	Médio	Bom	Muito bom
<b>precisão</b>	12,1%	55,2%	77,8%
<b>sensibilidade</b>	22,0%	25,0%	30,4%
<b>f1-score</b>	15,7%	34,4%	43,7%
<b>exatidão</b>	29,1%		

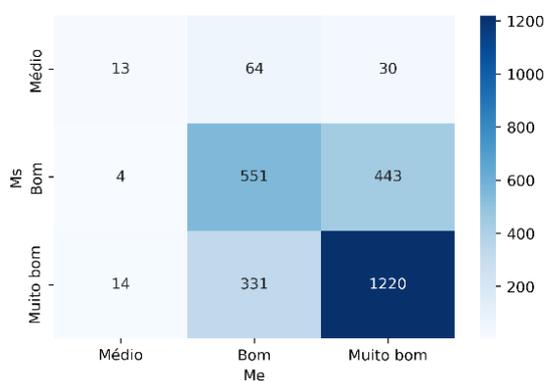


Figura 6.42-Matriz confusão do parâmetro NO<sub>2</sub>, em Santa Cruz de Benfica

Tabela 6.8- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro NO<sub>2</sub>, no Restelo

	<i>Nulls</i>	Médio	Bom	Muito bom
<b>precisão</b>	11,9%	0,0%	24,0%	97,8%
<b>sensibilidade</b>	85,7%	0,0%	84,0%	45,3%
<b>f1-score</b>	20,9%	0,0%	37,3%	62,0%
<b>exatidão</b>	50,8%			

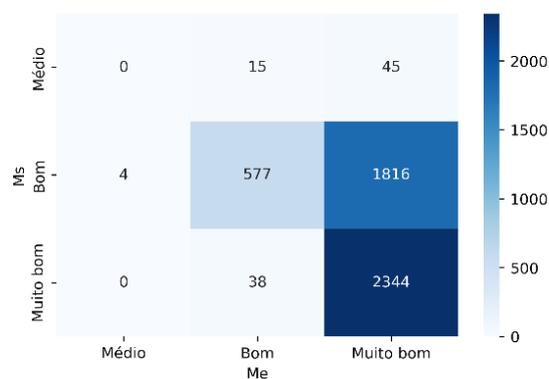


Figura 6.43-Matriz confusão do parâmetro NO<sub>2</sub>, no Restelo

## Parâmetro PM<sub>10</sub>

Tabela 6.9- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM<sub>10</sub>, na Avenida da Liberdade

	nan	Mau	Fraco	Médio	Bom	Muito bom
<b>precisão</b>	1,3%	85,7%	60,0%	51,8%	51,3%	61,8%
<b>sensibilidade</b>	5,6%	16,7%	14,1%	21,7%	19,1%	86,4%
<b>f1-score</b>	2,1%	27,9%	22,8%	30,6%	27,9%	72,0%
<b>exatidão</b>	53,3%					

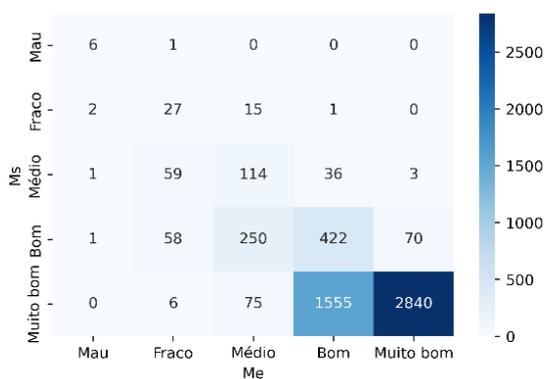


Figura 6.44-Matriz confusão do parâmetro PM<sub>10</sub>, na Avenida da Liberdade

Tabela 6.10- Resumo dos indicadores da performance da classificação para o parâmetro PM<sub>10</sub>, em Entrecampos

	Nulls	Mau	Fraco	Médio	Bom	Muito bom
<b>precisão</b>	1,6%	83,3%	68,4%	35,4%	45,3%	79,6%
<b>sensibilidade</b>	31,4%	15,6%	17,3%	16,4%	18,0%	59,8%
<b>f1-score</b>	3,0%	26,3%	27,7%	22,4%	25,8%	68,3%
<b>exatidão</b>	46,6%					

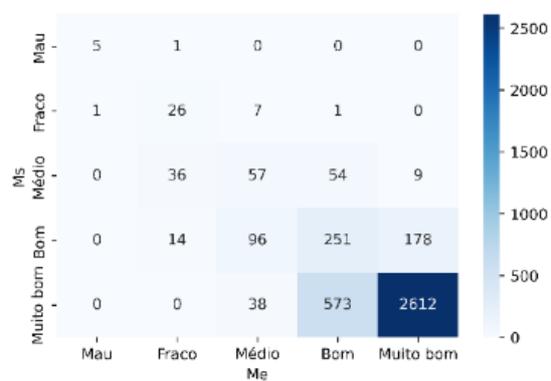


Figura 6.45-Matriz confusão do parâmetro PM<sub>10</sub>, em Entrecampos

Tabela 6.11- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM<sub>10</sub> nos Olivais

	nan	Fraco	Médio	Bom	Muito bom
<b>precisão</b>	0%	6%	29%	44%	85%
<b>sensibilidade</b>	0%	9%	25%	33%	79%
<b>f1-score</b>	0%	7%	27%	38%	82%
<b>exatidão</b>	65%				

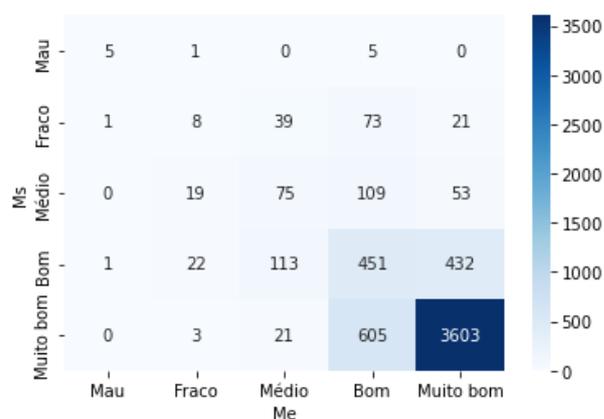


Figura 6.46-Matriz confusão do parâmetro PM<sub>10</sub>, nos Olivais

Tabela 6.12- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM<sub>10</sub> em Santa Cruz de Benfica

	nan	Mau	Fraco	Médio	Bom	Muito bom
<b>precisão</b>	0,3%	55,6%	21,5%	35,5%	50,4%	75,2%
<b>sensibilidade</b>	25,7%	12,2%	5,2%	10,6%	16,8%	42,7%
<b>f1-score</b>	0,5%	20,0%	8,4%	16,3%	25,2%	54,5%
<b>exatidão</b>	32,0%					

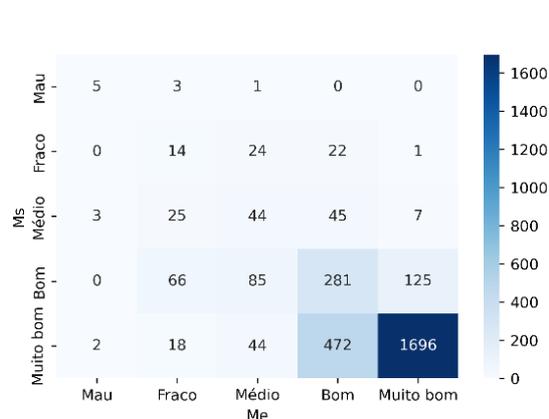


Figura 6.47-Matriz confusão do parâmetro PM<sub>10</sub>, em Santa Cruz de Benfica

## Parâmetro PM<sub>2.5</sub>

### Entrecampos

Tabela 6.13- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM<sub>2.5</sub>, em Entrecampos

	nan	Fraco	Mé- dio	Bom	Muit o bom
<b>precisão</b>	2,7%	41,8 %	28,0%	51,1 %	81,1%
<b>sensibilidade</b>	82,1 %	26,7 %	13,8%	22,9 %	27,8%
<b>f1-score</b>	5,3%	32,6 %	18,5%	31,7 %	41,4%
<b>exatidão</b>	27,5%				

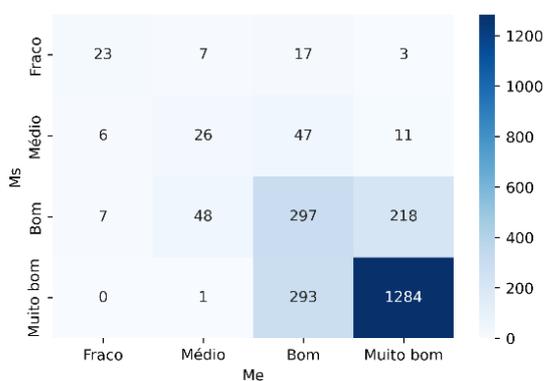


Figura 6.48-Matriz confusão do parâmetro PM<sub>2.5</sub>, em Entrecampos

Tabela 6.14- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro PM<sub>2.5</sub>, nos Olivais

	nan	Fraco	Mé- dio	Bom	Muito bom
<b>precisão</b>	0,30%	13,30%	26,10%	46,00%	75,90%
<b>sensibilidade</b>	14,80%	5,90%	16,50%	32,30%	41,20%
<b>f1-score</b>	0,60%	8,20%	20,20%	38,00%	53,40%
<b>exatidão</b>	37,70%				

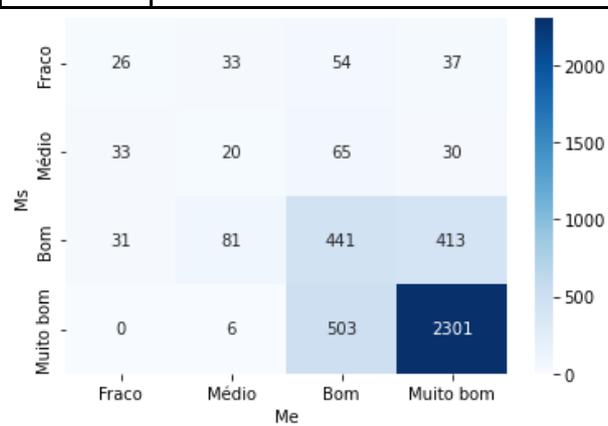


Figura 6.49-Matriz confusão do parâmetro PM<sub>2.5</sub>, em Olivais

## Parâmetro O<sub>3</sub>

Tabela 6.15- Resumo dos indicadores da performance da classificação do parâmetro O<sub>3</sub>, em Entrecampos

	nan	Médio	Bom	Muito bom
<b>precisão</b>	7,1%	10,3%	20,7%	94,9%
<b>sensibilidade</b>	27,7%	90,9%	28,1%	72,0%
<b>f1-score</b>	11,3%	18,5%	23,9%	81,9%
<b>exatidão</b>	66,9%			

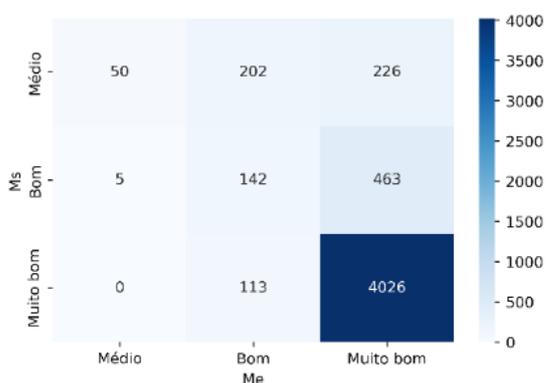


Figura 6.50-Matriz confusão do parâmetro O<sub>3</sub>, em Entrecampos

Tabela 6.16- Resumo dos indicadores da performance da classificação parâmetro O<sub>3</sub>, no Restelo

	nan	Médio	Bom	Muito bom
<b>precisão</b>	0,1%	1,0%	3,6%	94,2%
<b>sensibilidade</b>	7,1%	29,5%	10,0%	19,7%
<b>f1-score</b>	0,1%	1,9%	5,3%	32,6%
<b>exatidão</b>	19,1%			

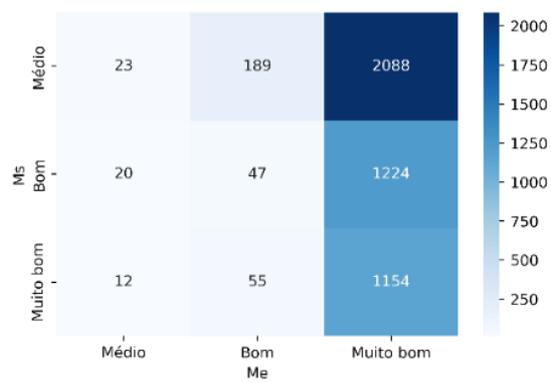


Figura 6.51-Matriz confusão do parâmetro O<sub>3</sub>, no Restelo

Tabela 6.17- Resumo dos indicadores da performance da classificação parâmetro O<sub>3</sub>, nos Olivais

	nan	Médio	Bom	Muito bom
<b>precisão</b>	1%	46%	53%	90%
<b>sensibilidade</b>	63%	26%	35%	33%
<b>f1-score</b>	1%	33%	48%	48%
<b>exatidão</b>	33%			

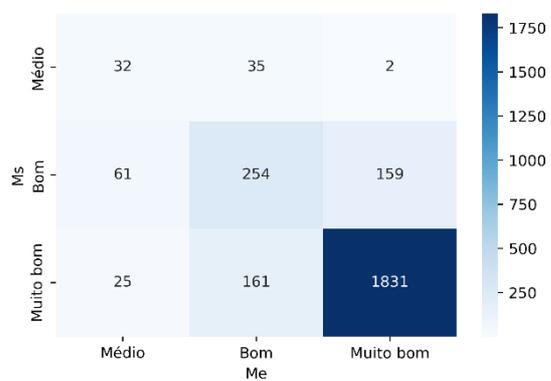


Figura 6.52-Matriz confusão do parâmetro O<sub>3</sub>, nos Olivais

## A.6 Ultrapassagens dos valores de referência

### Parâmetro CO

#### Entrecampos

Tabela 6.18- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição do parâmetro CO, em Entrecampos

	Média horária (mg/m <sup>3</sup> )		Máximo horário (mg/m <sup>3</sup> )		Máximo octohorário (mg/m <sup>3</sup> )		Eficiência de recolha (%)	Incerteza (%)
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Ms	Ms
<b>ENT</b>	0,32	0,23	2,30	3,74	1,13	1,01	86%	7,3%

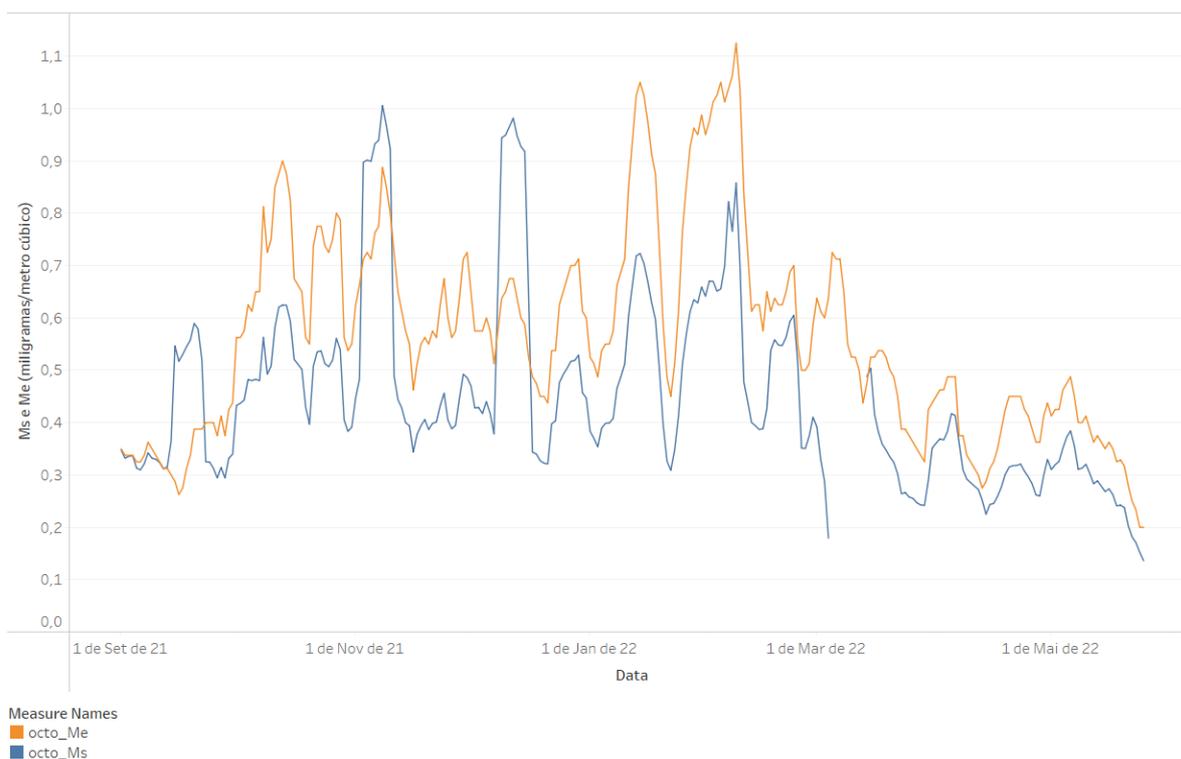


Figura 6.53- Série temporal do parâmetro CO, em Entrecampos e estudo das ultrapassagens do valor limite (10 mg/m<sup>3</sup>), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas

## Avenida da Liberdade

Tabela 6.19- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição do parâmetro CO, na Avenida da Liberdade

	Média horária (mg/m <sup>3</sup> )		Máximo horário (mg/m <sup>3</sup> )		Máximo octohorário (mg/m <sup>3</sup> )		Eficiência de recolha (%)	Incerteza (%)
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Ms	Ms
<b>AVL</b>	0,34	0,25	1,80	1,54	1,24	0,97	89%	5,8%

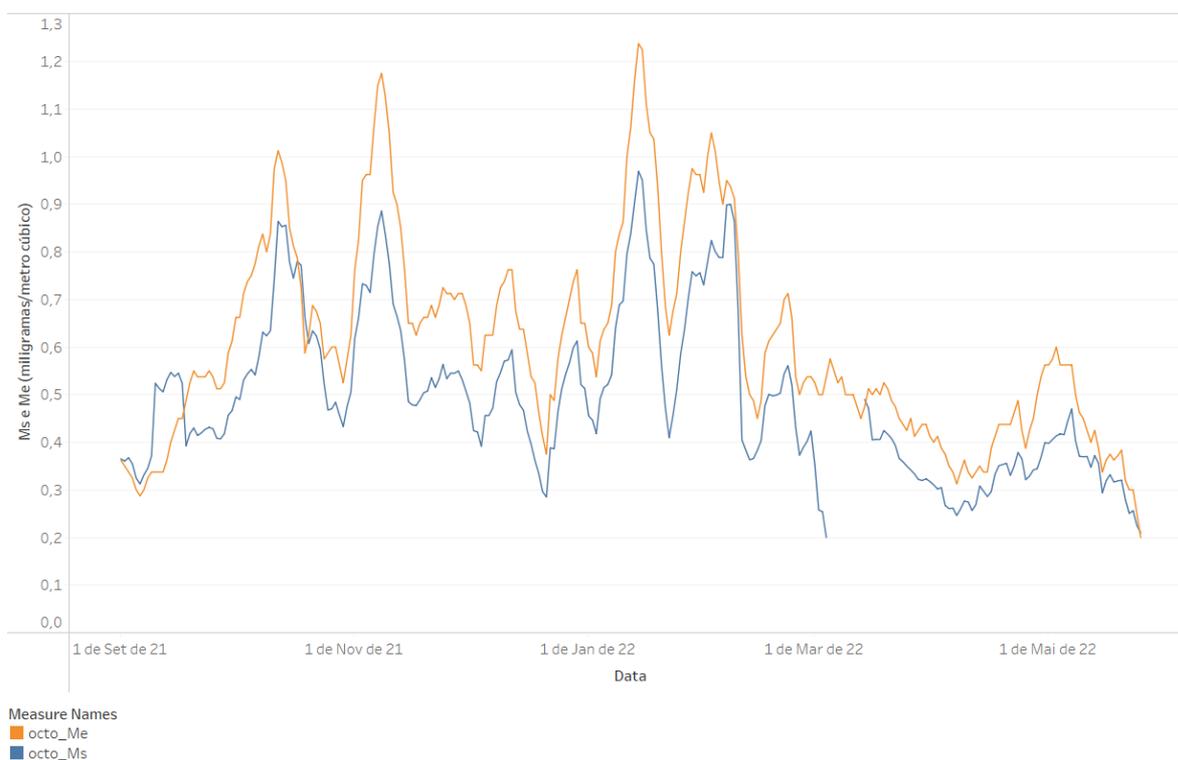


Figura 6.54- Série temporal do parâmetro CO, na Avenida da Liberdade e estudo das ultrapassagens do valor limite (10 mg/m<sup>3</sup>), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas

## Olivais

Tabela 6.20- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição do parâmetro CO, nos Olivais

	Média horária		Máximo horário		Máximo octohorário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Ms	Ms
<b>Oli</b>	0,26	0,18	1,70	1,32	1,11	0,84	89%	6,4%

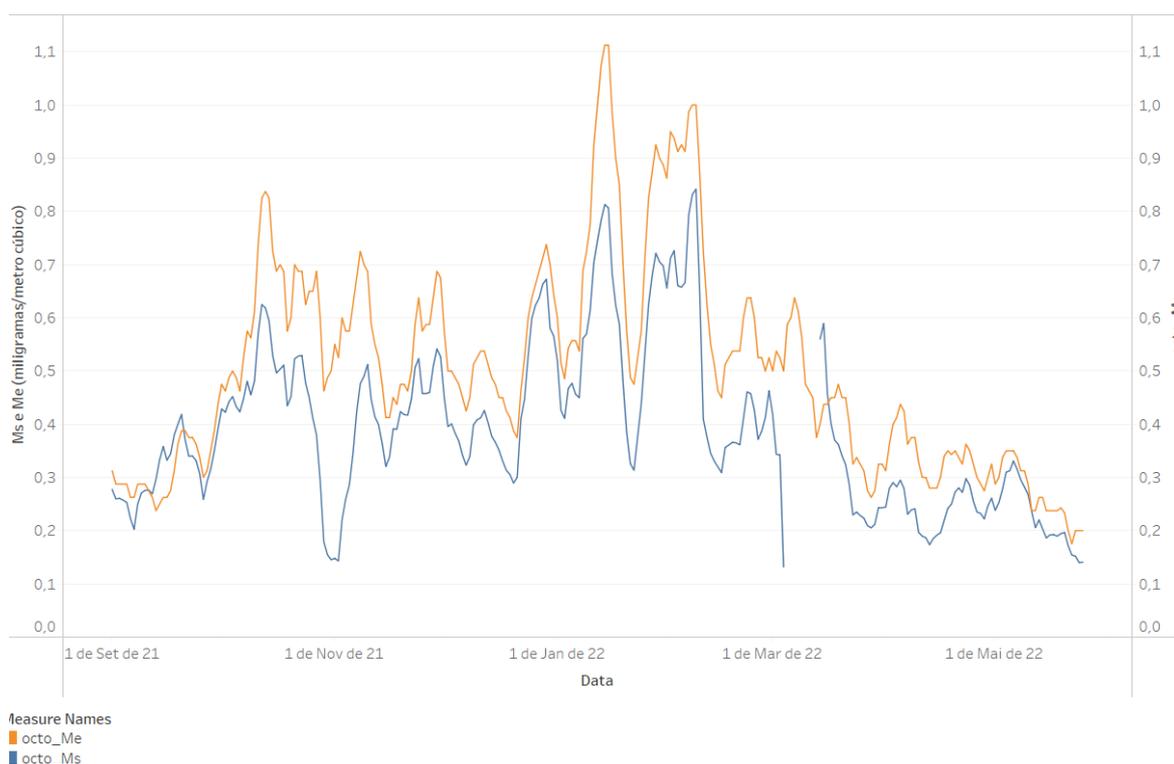


Figura 6.55- Série temporal do parâmetro CO, nos Olivais e estudo das ultrapassagens do valor limite ( $10 \text{ mg/m}^3$ ), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas

## Santa Cruz de Benfica

Tabela 6.21- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro CO, em Santa Cruz de Benfica

	Média horária		Máximo horário		Máximo octohorário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms		
<b>SCB</b>	0,37	0,27	2,50	2,01	1,20	1,03	52%	20%

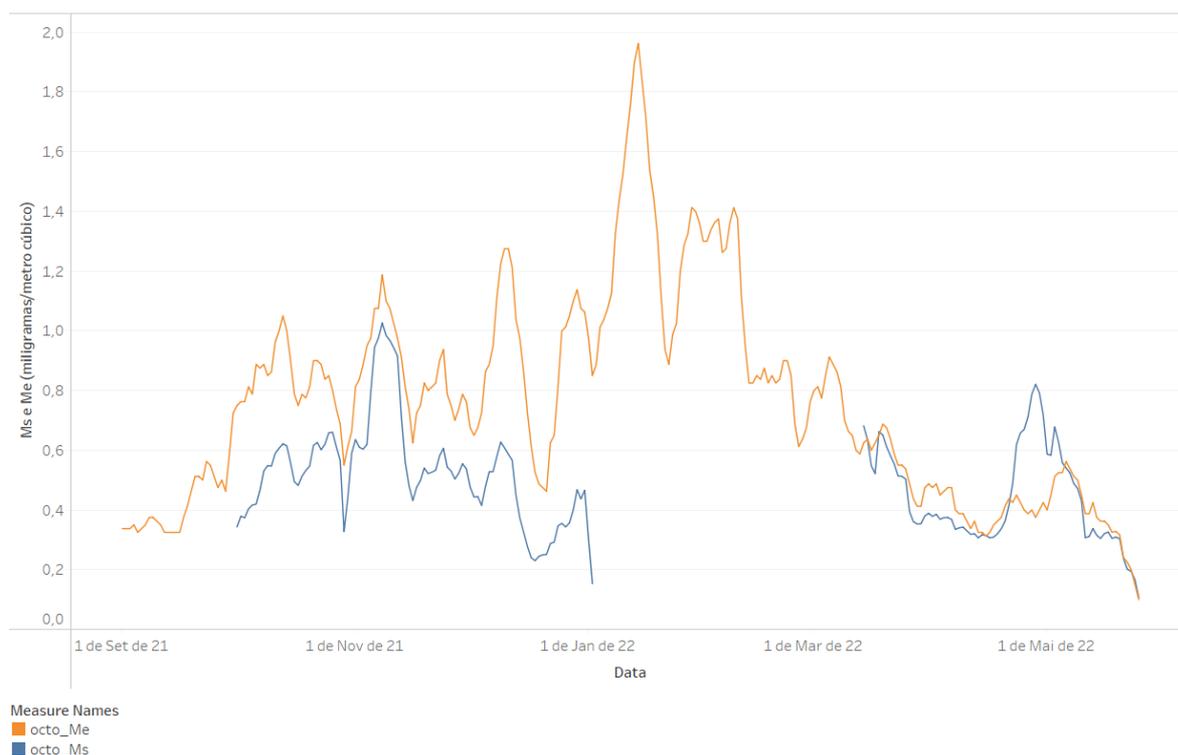


Figura 6.56-Série temporal do parâmetro CO, em Santa Cruz de Benfica e estudo das ultrapassagens do valor limite (10 mg/m<sup>3</sup>), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas

## Parâmetro NO<sub>2</sub>

### Entrecampos

Tabela 6.22- Média horária, máximo horário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro NO<sub>2</sub>, em Entrecampos

	Média horária		Máximo horário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Ms	Ms
ENT	35	44	168	184	88%	46%

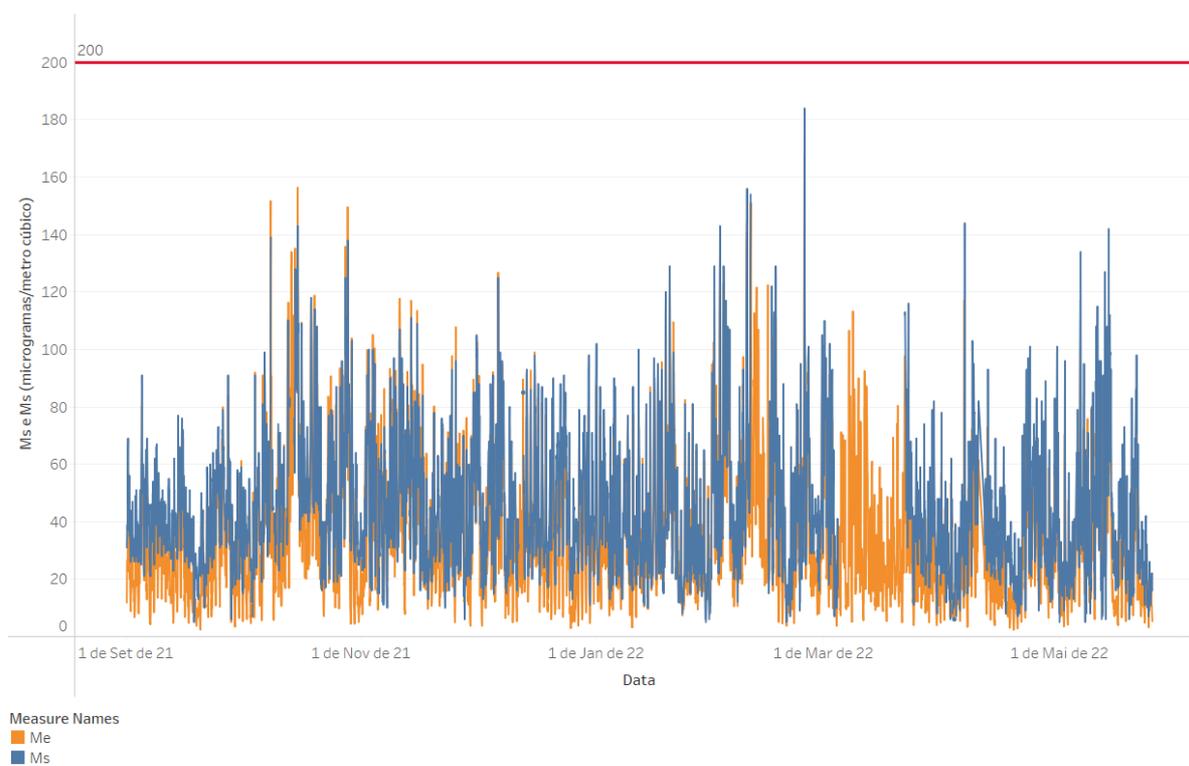


Figura 6.57- Série temporal do parâmetro NO<sub>2</sub>, em Entrecampos e estudo das ultrapassagens do valor limite (200 µg/m<sup>3</sup>), para um período de referência de uma hora

## Olivais

Tabela 6.23- Média horária, máximo horário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro NO<sub>2</sub>, nos Olivais

	Média horária		Máximo horário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Ms	Ms
OLI	27	36	146	184	89%	65%

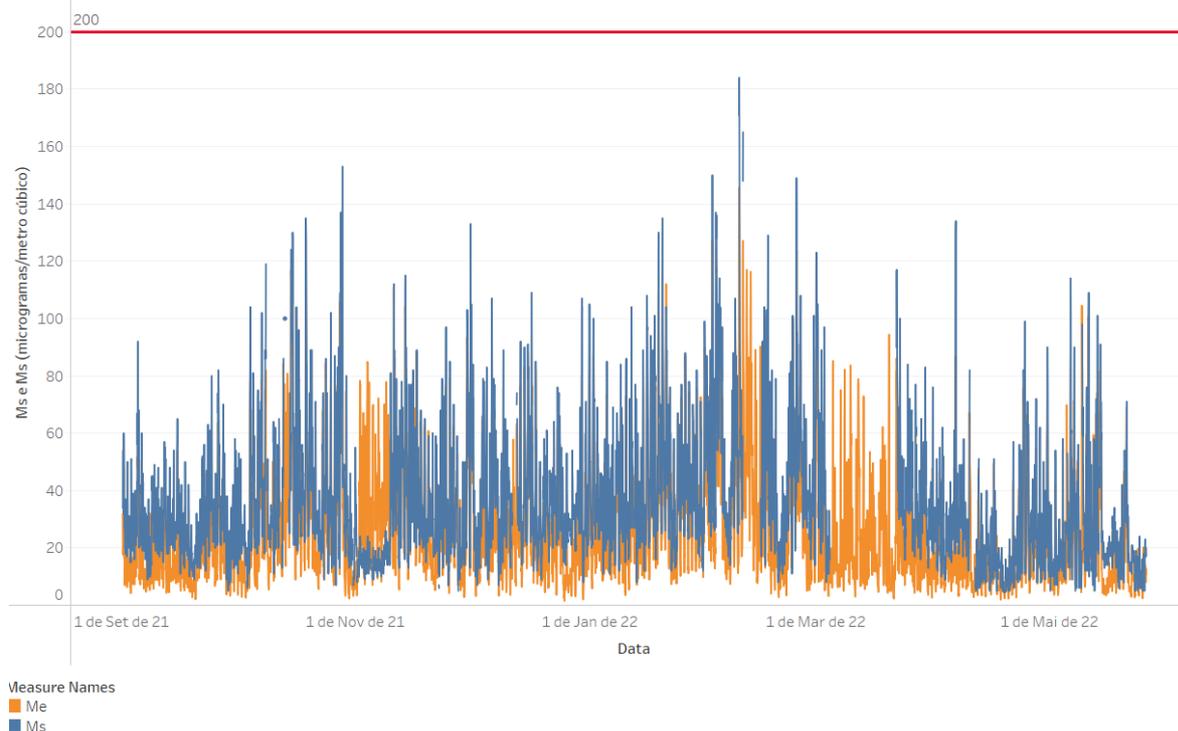


Figura 6.58- Série temporal do parâmetro NO<sub>2</sub>, nos Olivais e estudo das ultrapassagens do valor limite (200 µg/m<sup>3</sup>), para um período de referência de uma hora

## Santa Cruz Benfica

Tabela 6.24- Média horária, máximo horário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro NO<sub>2</sub>, em Santa Cruz de Benfica

	Média horária		Máximo horário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms		
SCB	36	41	129	284	42%	135%

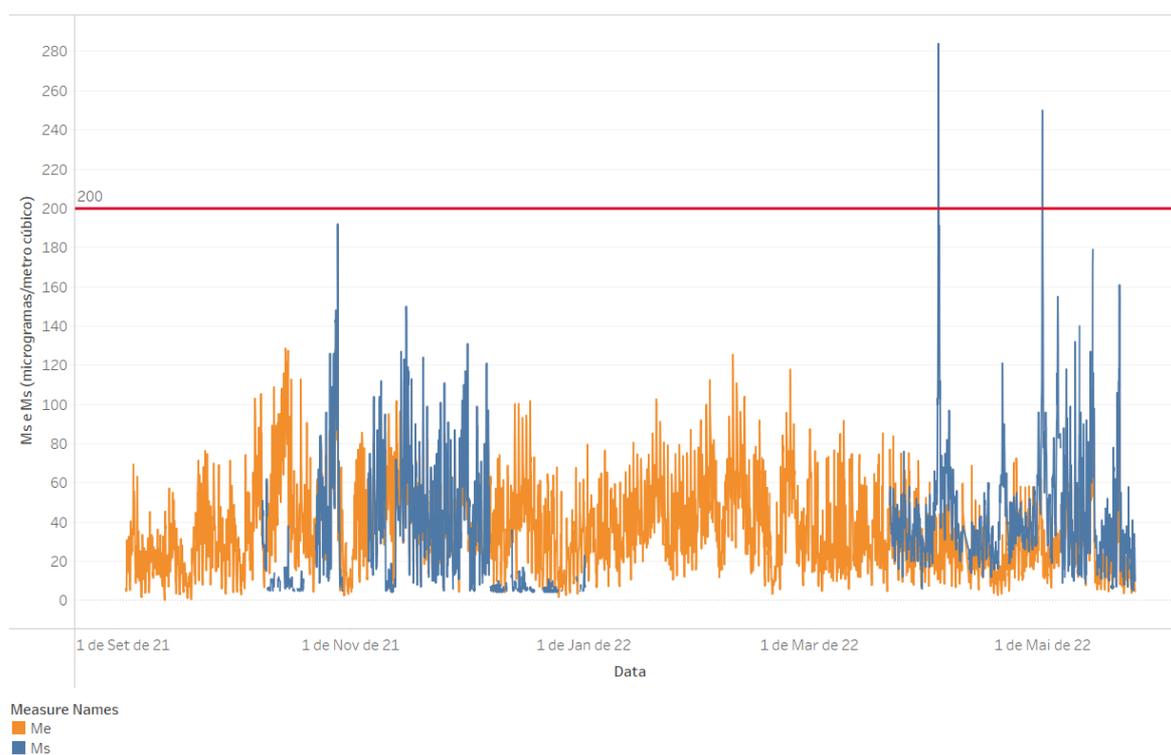


Figura 6.59- Série temporal do parâmetro NO<sub>2</sub>, em Santa Cruz de Benfica e estudo das ultrapassagens do valor limite (200 µg/m<sup>3</sup>), para um período de referência de uma hora

## Restelo

Tabela 6.25- Média horária, máximo horário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro NO<sub>2</sub>, no Restelo

	Média horária		Máximo horário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Ms	Ms
RES	20	46	103	120	76%	51%

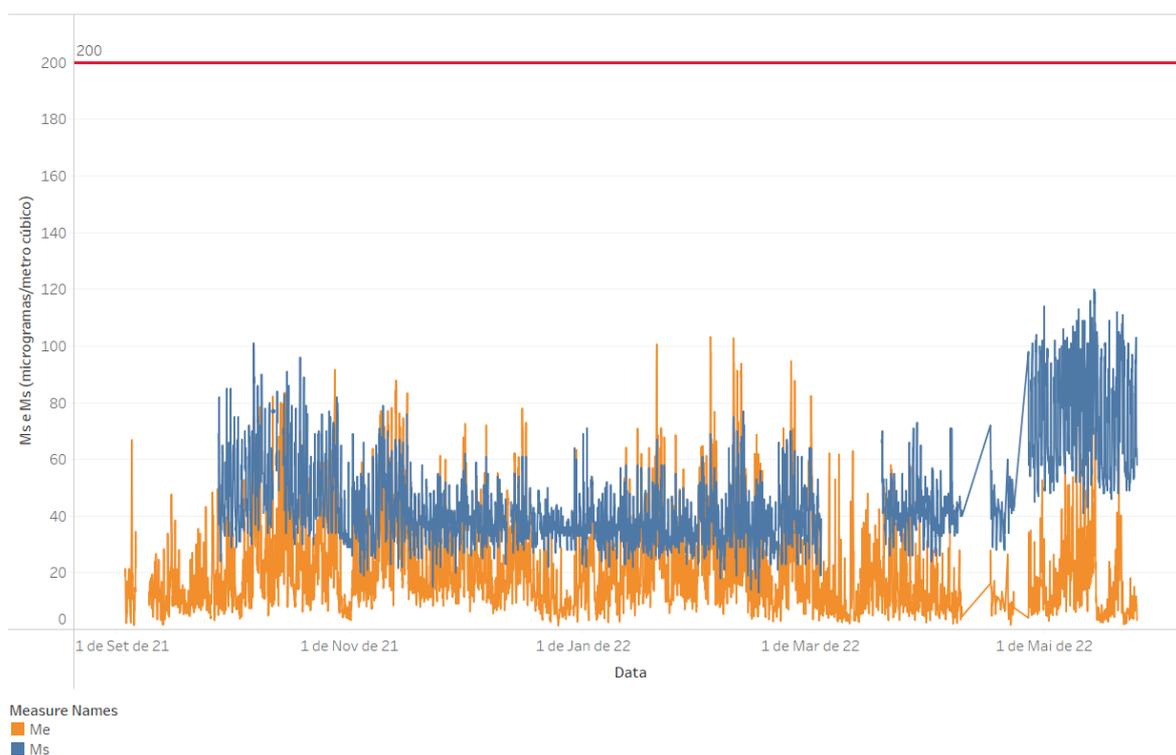


Figura 6.60- Série temporal do parâmetro NO<sub>2</sub>, no Restelo e estudo das ultrapassagens do valor limite (200 µg/m<sup>3</sup>) para um período de referência de uma hora

## Parâmetro PM<sub>10</sub>

### Entrecampos

Tabela 6.26- Média, máximo horário, máximo diário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro PM<sub>10</sub>, em Entrecampos

	Média horária		Média diária		Máximo horário		Máximo Diário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Ms	Ms
ENT	19,3	14,8	23,4	15,5	513,7	222,0	196,6	58,6	62%	49%

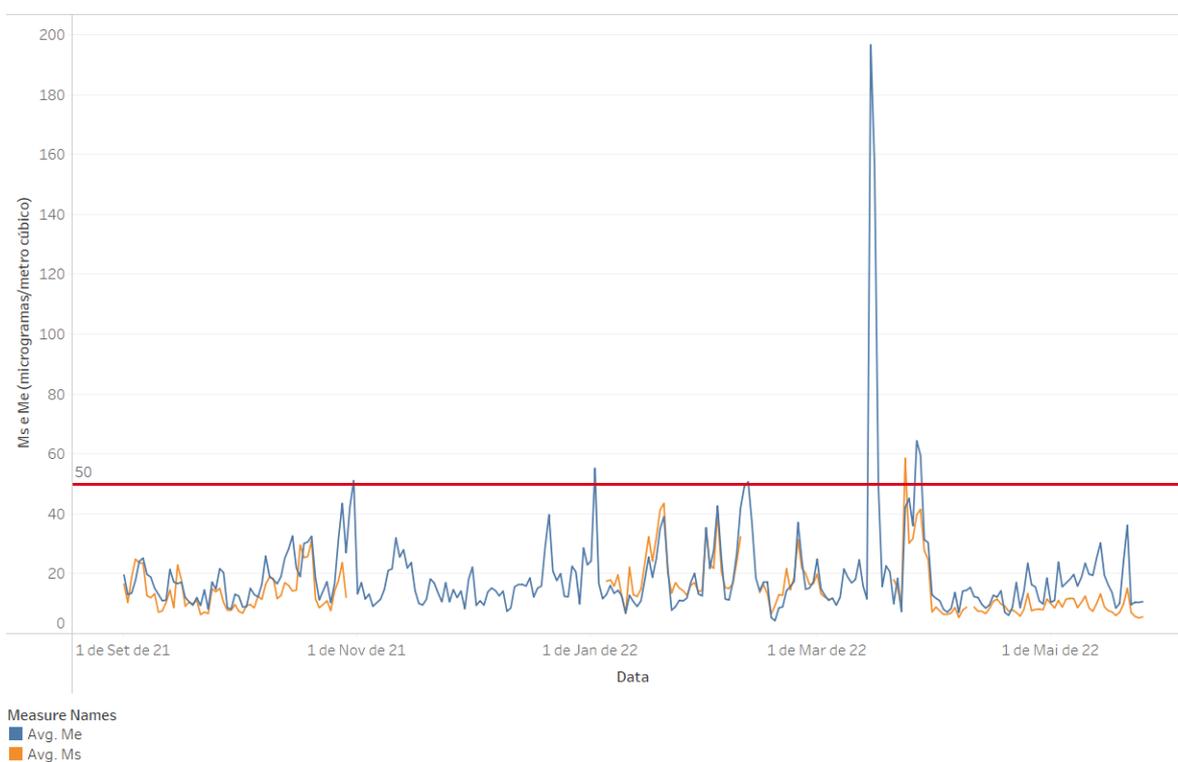


Figura 6.61- Série temporal do parâmetro PM<sub>10</sub>, em Entrecampos e estudo das ultrapassagens do valor limite (50 µg/m<sup>3</sup>) para um período de referência de um dia

## Avenida da Liberdade

Tabela 6.27- Média horária, média diária, máximo horário, máximo diário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro PM<sub>10</sub>, na Avenida da Liberdade

	Média horária		Média diária		Máximo horário		Máximo Diário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms		
AVL	23,4	15,5	53,2	15,5	477,5	199,0	178,6	52,3	86%	66%

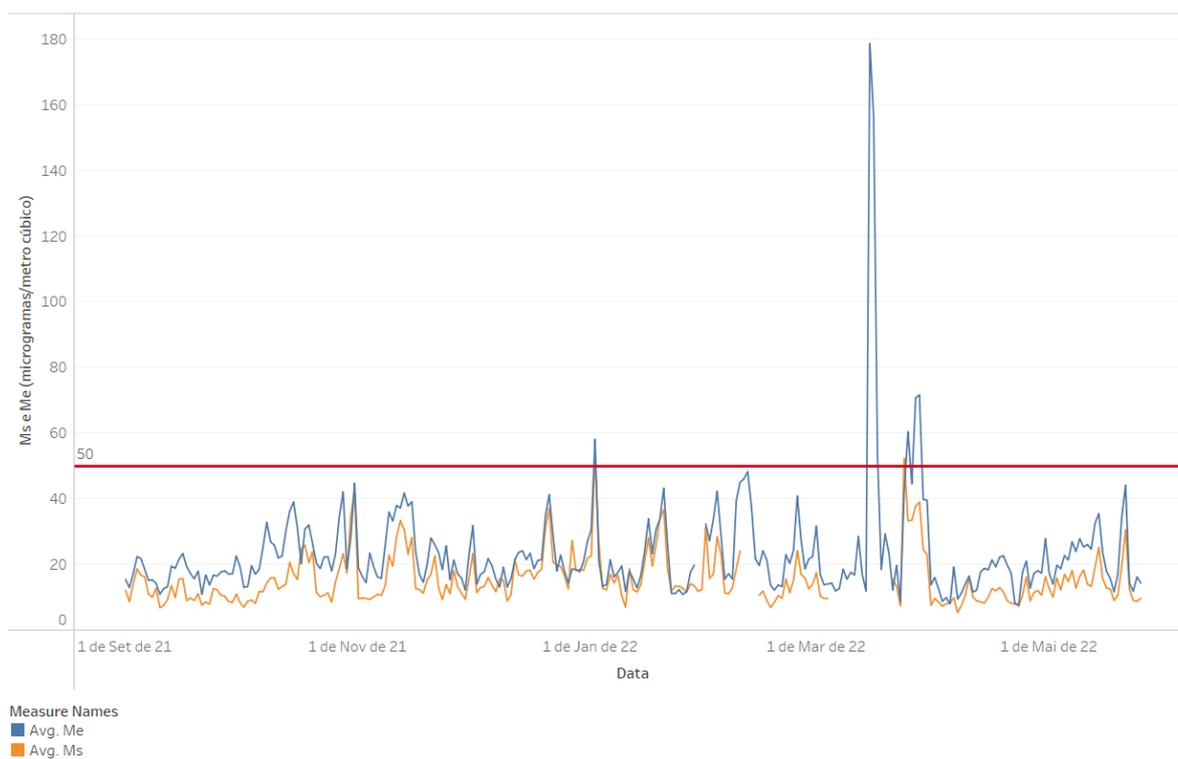


Figura 6.62- Série temporal do parâmetro PM<sub>10</sub>, na Avenida da Liberdade e estudo das ultrapassagens do valor limite (50 µg/m<sup>3</sup>) para um período de referência de um dia

## Olivais

Tabela 6.28- Média horária, média diária, máximo horário, máximo diário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro PM<sub>10</sub>, nos Olivais

	Média horária		Média diária		Máximo horário		Máximo Diário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Ms	Ms
OLI	19,4	17,4	19,4	17,4	510,8	226	201,0	65,7	89%	87%

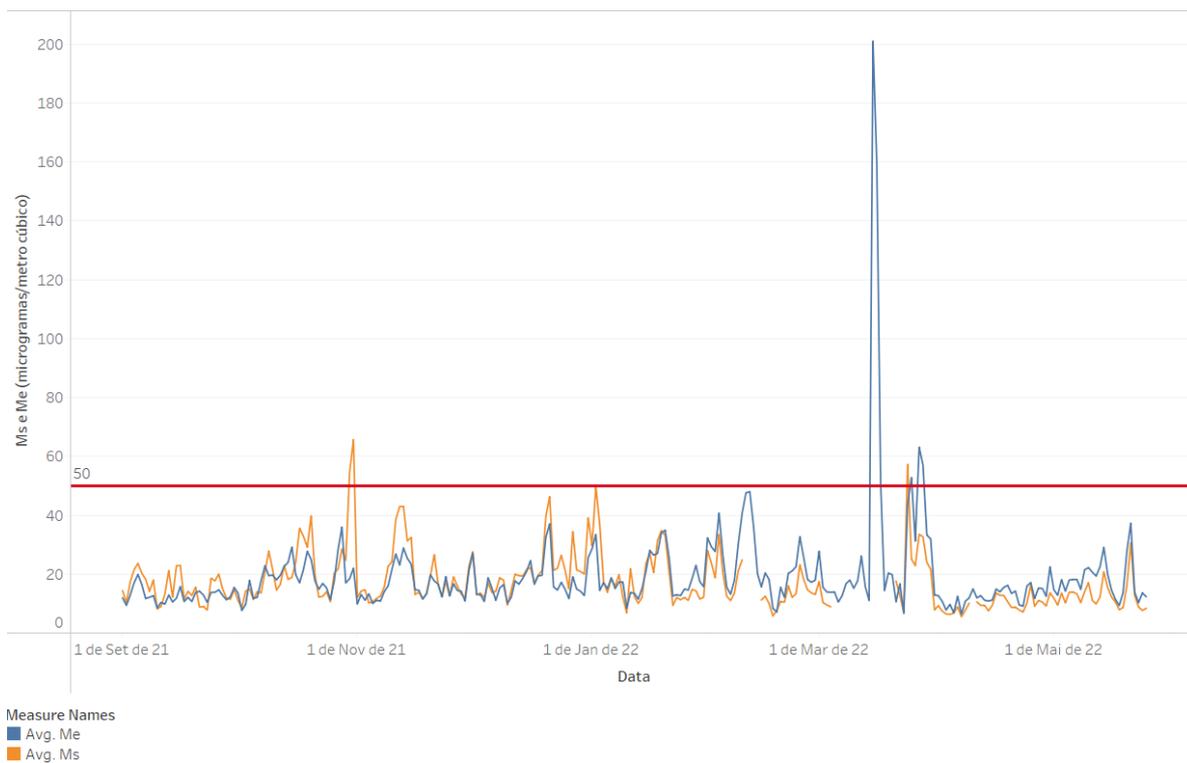


Figura 6.63- Série temporal do parâmetro PM<sub>10</sub>, nos Olivais e estudo das ultrapassagens do valor limite (50 µg/m<sup>3</sup>) para um período de referência de um dia

## Santa Cruz de Benfica

Tabela 6.29- Média horária, média diária, máximo horário, máximo diário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro PM<sub>10</sub>, em Santa Cruz de Benfica

	Média horária		Média diária		Máximo horário		Máximo Diário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms		
SCB	21,9	17,1	21,9	17,1	411,0	149,0	225,2	60,2	47%	92%

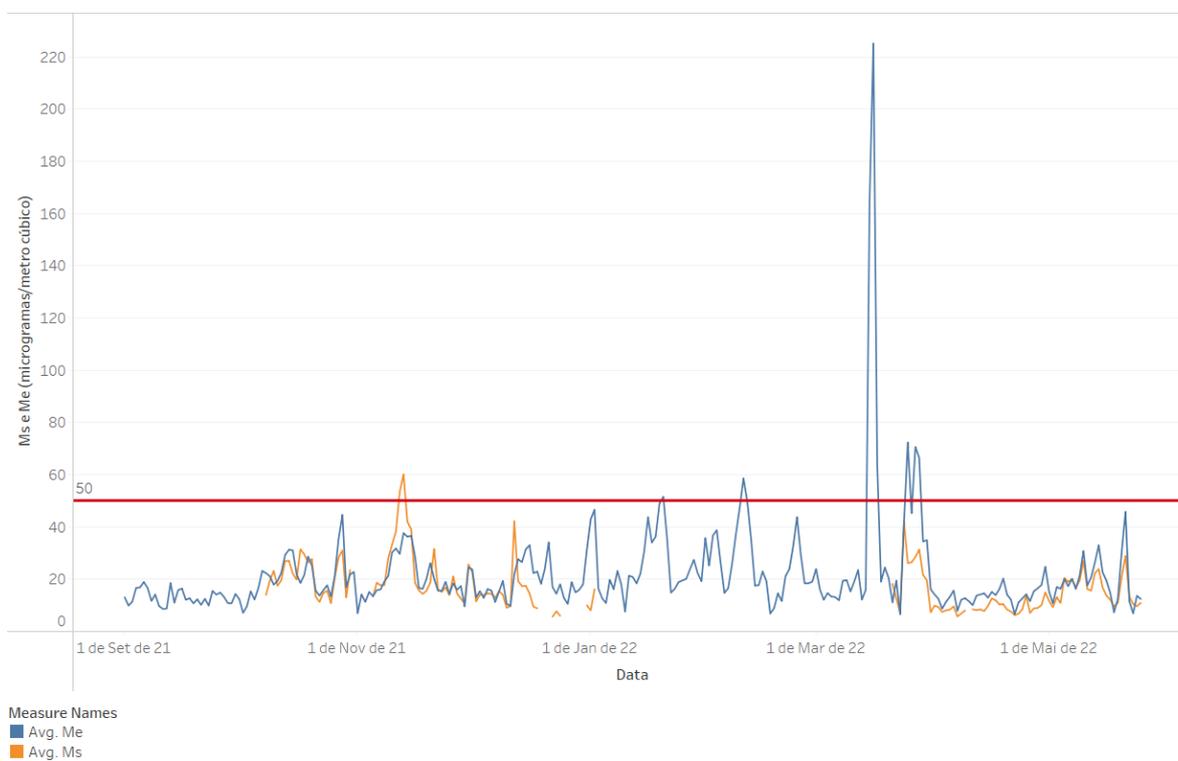


Figura 6.64- Série temporal do parâmetro PM<sub>10</sub>, em Santa Cruz de Benfica e estudo das ultrapassagens do valor limite (50 µg/m<sup>3</sup>) para um período de referência de um dia

## Parâmetro PM<sub>2.5</sub>

### Entrecampos

Tabela 6.30- Média horária, média diária, máximo horário, máximo diário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro PM<sub>2.5</sub>, em Entrecampos

	Média horária		Média diária		Máximo horário		Máximo Diário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms		
ENT	8,2	10,0	8,2	8,8	64,8	88	38,2	28,1	36%	80%

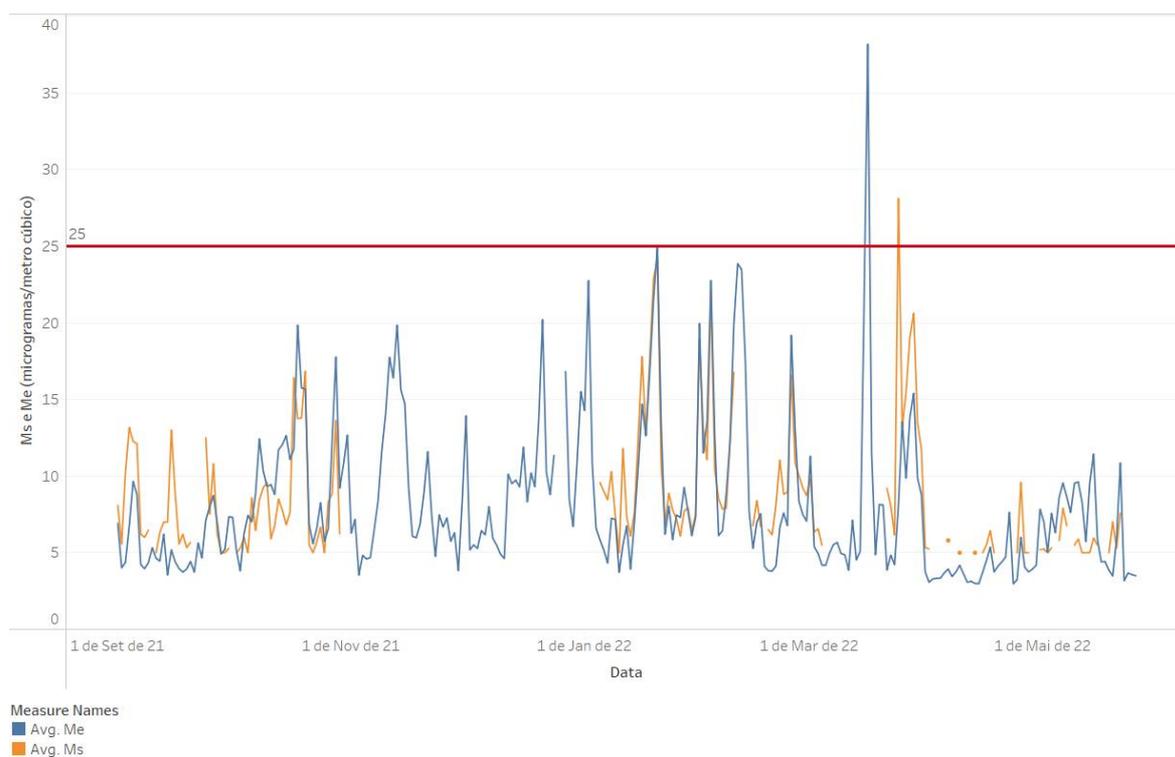


Figura 6.65- Série temporal do parâmetro PM<sub>2.5</sub>, em Entrecampos e estudo das ultrapassagens do valor limite (25 µg/m<sup>3</sup>) para um período de referência de um dia

## Olivais

Tabela 6.31- Média horária, média diária, máximo horário, máximo diário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro PM<sub>2.5</sub>, nos Olivais

	Média horária		Média diária		Máximo horário		Máximo Diário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms		
OLI	8,1	10,1	8,2	8,9	68,4	98	41,3	59,1	64%	200%

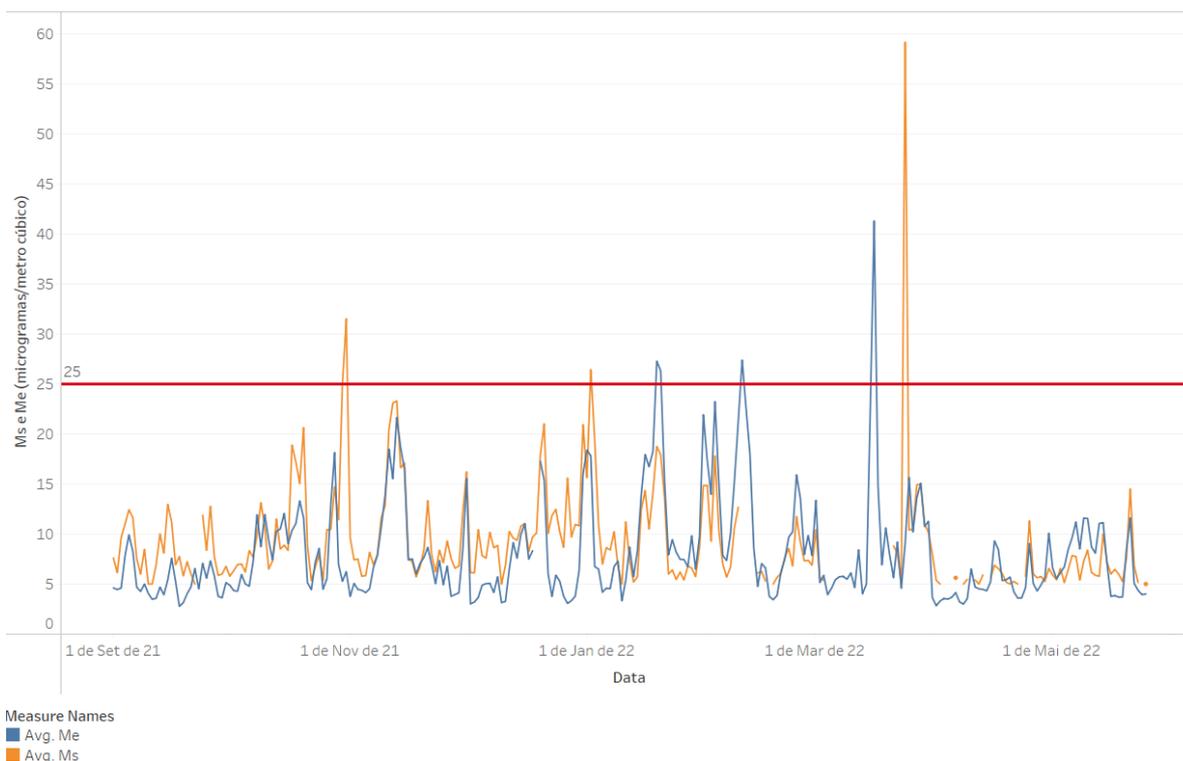


Figura 6.66- Série temporal do parâmetro PM<sub>2.5</sub>, nos Olivais e estudo das ultrapassagens do valor limite (25 µg/m<sup>3</sup>) para um período de referência de um dia

## Parâmetro O<sub>3</sub>

### Entrecampos

Tabela 6.32- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro O<sub>3</sub>, em Entrecampos

	Média horária		Máximo horário		Máximo octohorário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms		
ENT	47	57	124	172	106	139	82%	71%

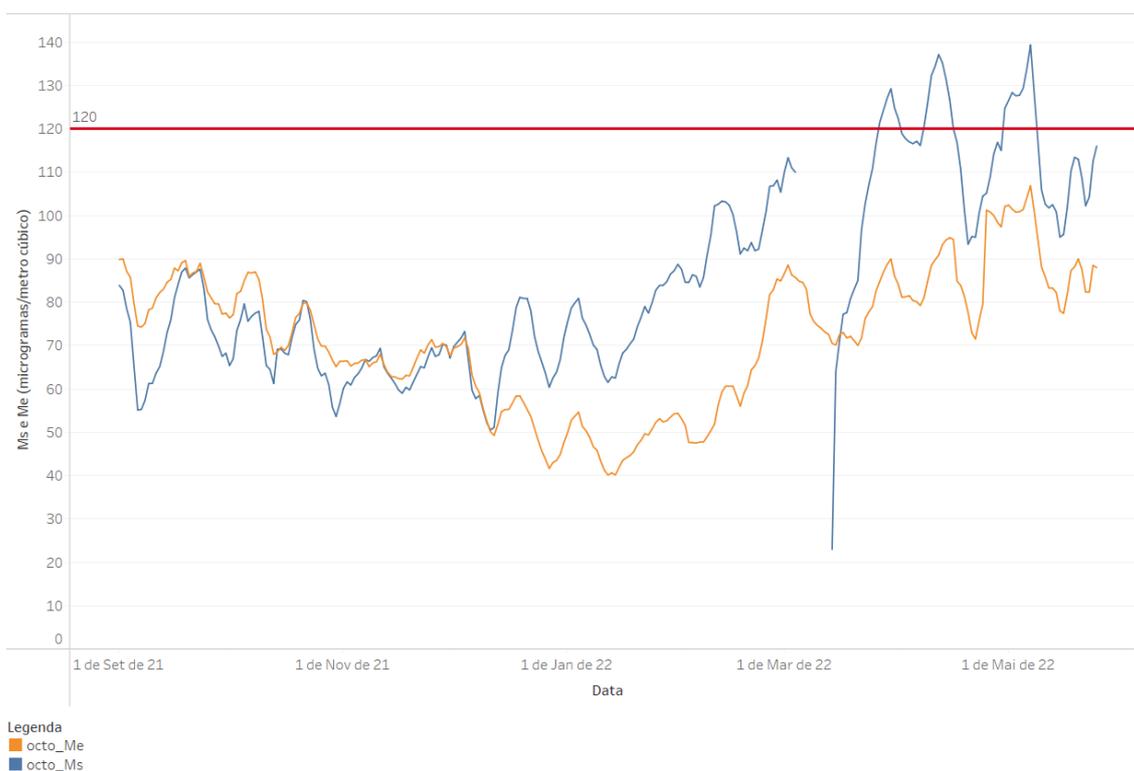


Figura 6.67- Série temporal do parâmetro O<sub>3</sub>, em Entrecampos e estudo das ultrapassagens do valor alvo (120 µg/m<sup>3</sup>) para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas

## Restelo

Tabela 6.33- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro O<sub>3</sub>, no Restelo

	<b>Média horária</b>		<b>Máximo horário</b>		<b>Máximo octohorário</b>		<b>Eficiência de recolha</b>	<b>Incerteza</b>
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Ms	Ms
RES	52	97	136	260	123	188	75%	85%

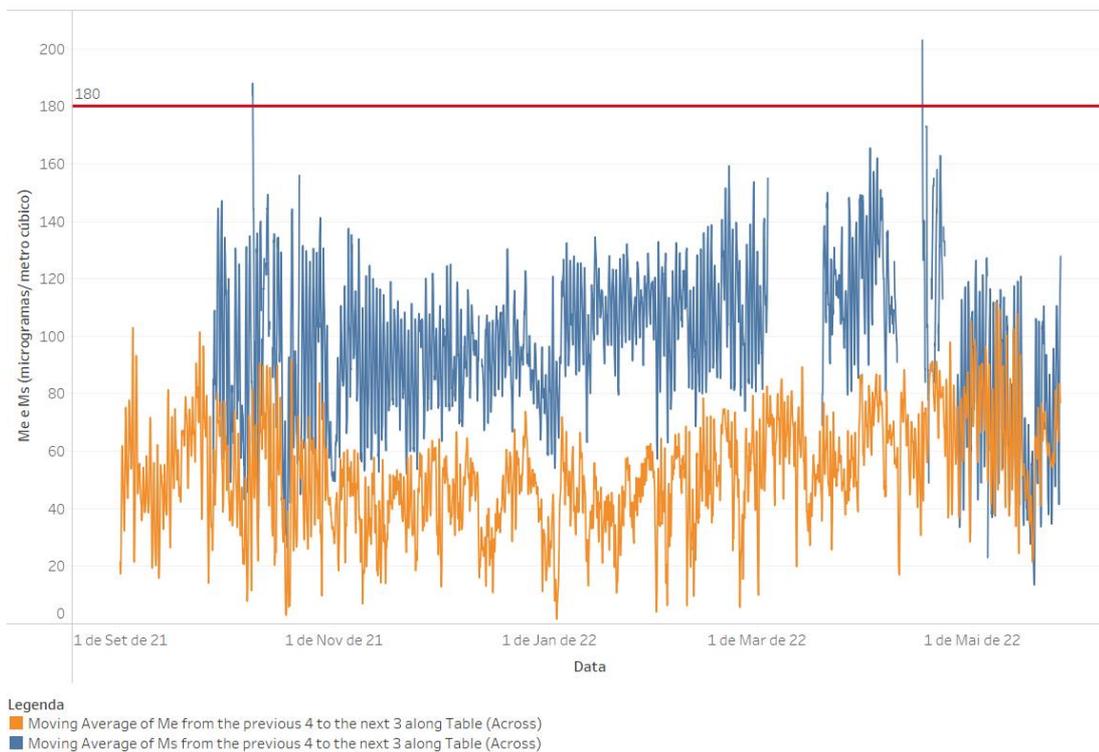


Figura 6.68- Série temporal do parâmetro  $O_3$ , no Restelo e estudo das ultrapassagens do limiar de informação ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas

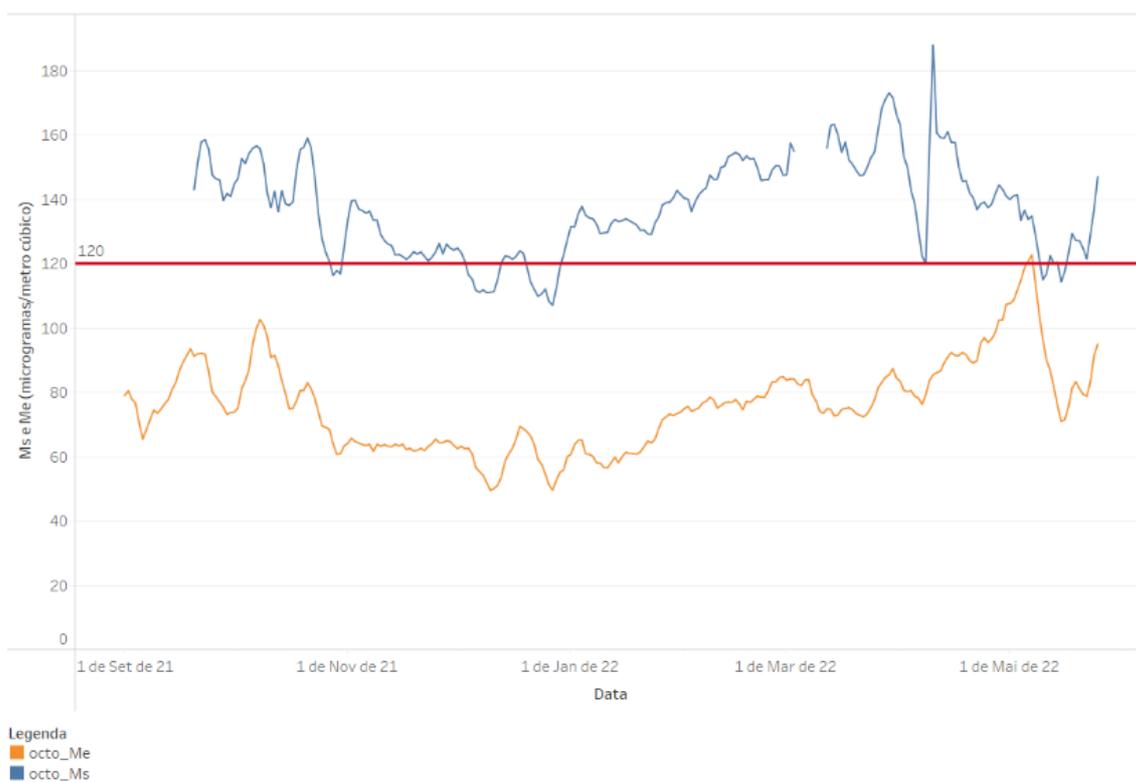


Figura 6.69- Série temporal do parâmetro  $O_3$ , no Restelo e estudo das ultrapassagens do valor alvo ( $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas

## Olivais

Tabela 6.34- Média horária, máximo horário, máximo octohorário, eficiência da recolha e incerteza da medição para o parâmetro O<sub>3</sub>, nos Olivais

	Média horária		Máximo horário		Máximo octohorário		Eficiência de recolha	Incerteza
	Me	Ms	Me	Ms	Me	Ms	Ms	Ms
OLI	51	59	133	119	133	119	75%	85%

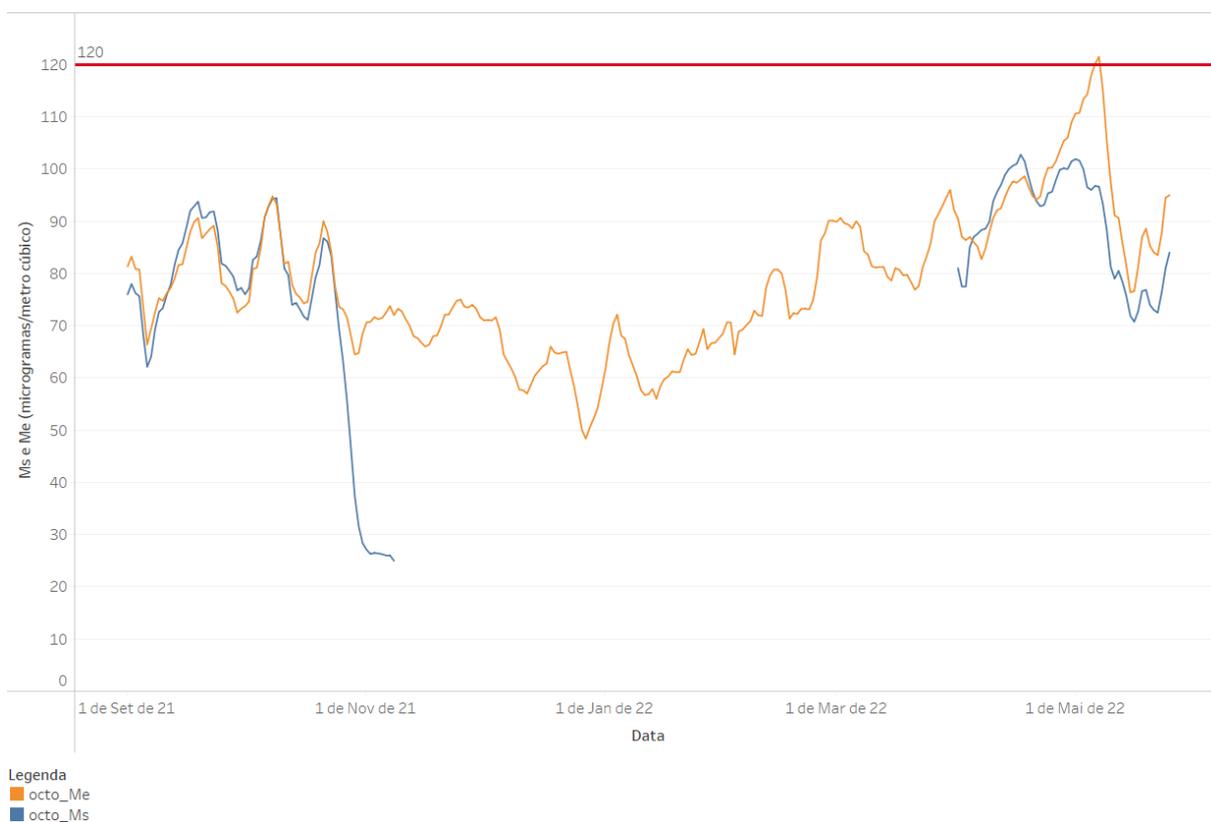


Figura 6.70- Série temporal do parâmetro O<sub>3</sub>, nos Olivais e estudo das ultrapassagens do valor alvo (120 µg/m<sup>3</sup>), para um período de referência máximo diário das médias de 8 horas







2022

SUSANA MIGUÉIS

UTILIZAÇÃO DE SENSORES NA GESTÃO DA QUALIDADE DO AR- CASO DE ESTUDO DA CIDADE DE LISBOA