

AQUISIÇÃO DE SERVIÇOS PARA A REALIZAÇÃO DO ESTUDO TÉCNICO-CIENTÍFICO NA ÁREA DA QUALIDADE DO AR AMBIENTE

AValiação da QUALIDADE DO AR AMBIENTE NA REGIÃO NORTE NO PERÍODO 2014 A 2021

OUTUBRO DE 2025

MONITAR

CCDR
NORTE
Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, L.P.

TÍTULO DO RELATÓRIO	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR AMBIENTE NA REGIÃO NORTE NO PERÍODO 2014 A 2021
AUTOR DO RELATÓRIO	MONITAR, LDA. RUA QUINTA D'EL REI, LOTE 266, FRAÇÕES A/B 3500-612 VISEU
EQUIPA TÉCNICA	PAULO GABRIEL FERNANDES DE PINHO SÉRGIO MIGUEL GOMES LOPES JOÃO MIGUEL BARROTE LOPES LEITE

ÍNDICE

ÂMBITO	7
INTRODUÇÃO.....	7
REDE DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR DA REGIÃO NORTE.....	8
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR.....	11
<i>Dióxido de azoto (NO₂).....</i>	<i>11</i>
Dados globais	11
Perfil horário	15
Perfil dia da semana	17
Perfil mensal	17
Estações urbanas de tráfego.....	18
Estações urbanas de fundo	19
Estações suburbanas de fundo	20
Estações rurais de fundo.....	21
Análise.....	22
<i>Partículas em suspensão (PM₁₀)</i>	<i>24</i>
Dados globais	24
Perfil horário	27
Perfil dia da semana	29
Perfil mensal	29
Estações urbanas de tráfego.....	30
Estações urbanas de fundo	31
Estações suburbanas de fundo	31
Estações rurais de fundo.....	32
Análise.....	33
<i>Ozono (O₃).....</i>	<i>35</i>
Dados globais	35
Perfil horário	39
Perfil dia da semana	41
Perfil mensal	41
Estações urbanas de fundo	42
Estações suburbanas de fundo	43
Estações rurais de fundo.....	43
Análise.....	44
SÍNTESE.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Delimitação das zonas e aglomerações para efeitos de avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente na Região Norte, em vigor em 2021.....	9
Figura 2: Localização das estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte em funcionamento em 2021.....	9
Figura 3: Eficiência horária na recolha de dados de dióxido de azoto (NO_2) na RMQAR-N, em percentagem, por ano, no período de 2014 a 2021.....	12
Figura 4: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por aglomeração e zona, no período de 2014 a 2021. O traço horizontal a vermelho corresponde ao valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$	15
Figura 5: Perfil horário da concentração média dióxido de azoto (NO_2), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.....	16
Figura 6: Perfil horário da concentração média dióxido de azoto (NO_2), na Região Norte, por estação do ano, por tipo de estação, no período de 2014 a 2021. Verão – intervalo de 1 de abril a 30 de setembro; Inverno – intervalo de 1 de outubro a 31 de março.....	16
Figura 7: Perfil por dia da semana da concentração média diária dióxido de azoto (NO_2), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.....	17
Figura 8: Perfil mensal da concentração média de dióxido de azoto (NO_2), base horária, na Região Norte, no período de 2014 a 2021.....	18
Figura 9: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações urbanas de tráfego das aglomerações, no período de 2014 a 2021.....	19
Figura 10: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações urbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.....	19
Figura 11: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações suburbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.....	20
Figura 12: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações rurais de fundo, no período de 2014 a 2021.....	21
Figura 13: Eficiência diária na recolha de dados de partículas em suspensão com diâmetro aerodinâmico inferior a $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) na RMQAR-N, em percentagem, no período de 2014 a 2021.....	24
Figura 14: Variação da concentração média anual (base diária) de partículas em suspensão (PM_{10}), por aglomeração e zona, no período de 2014 a 2021.....	27
Figura 15: Perfil horário da concentração média de partículas em suspensão (PM_{10}), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.....	28
Figura 16: Perfil horário da concentração média de partículas em suspensão (PM_{10}) da Região Norte, por estação do ano, no período de 2014 a 2021. Verão – intervalo de 1 de abril a 30 de setembro; inverno – intervalo de 1 de outubro a 31 de março.....	28
Figura 17: Perfil por dia da semana da concentração média diária de partículas em suspensão (PM_{10}), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.....	29
Figura 18: Perfil mensal da concentração média de partículas em suspensão (PM_{10}), da Região Norte, no período de 2014 a 2021.....	30
Figura 19: Variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações urbanas de tráfego das aglomerações, no período de 2014 a 2021.....	30
Figura 20: Variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações urbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.....	31

Figura 21: Variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações suburbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.....	32
Figura 22: Variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações rurais de fundo, no período de 2014 a 2021.....	33
Figura 23: Eficiência horária na recolha de dados de ozono (O_3) na RMQAR-N, no período de 2014 a 2021.....	35
Figura 24: Variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, por aglomeração e zona, no período de 2014 a 2021.....	39
Figura 25: Perfil horário da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.....	40
Figura 26: Perfil horário da concentração média de ozono (O_3) da Região Norte, por estação do ano, por tipo de estação, no período de 2014 a 2021. Verão – intervalo de 1 de abril a 30 de setembro; inverno – intervalo de 1 de outubro a 31 de março.....	40
Figura 27: Perfil por dia da semana da concentração média diária de ozono (O_3), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.....	41
Figura 28: Perfil do máximo mensal dos máximos octo-horários de ozono (O_3), no período de 2014 a 2021.....	42
Figura 29: Variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, nas estações urbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.....	42
Figura 30: Variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, nas estações suburbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.....	43
Figura 31: Variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, nas estações rurais de fundo, no período de 2014 a 2021.....	44

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte (RMQAR-N), por tipo de ambiente envolvente e tipo de influência dominante, em funcionamento no ano de 2021.....	10
Tabela 2: Identificação das estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte (RMQAR-N) em funcionamento no ano de 2021, respetiva classificação por tipo de ambiente e por tipo de influência dominante, e poluentes monitorizados (considerando os poluentes analisados no presente estudo).....	10
Tabela 3: Valores- limite e limiar de alerta para proteção da saúde humana relativos ao dióxido de azoto (NO_2) no ar ambiente, estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.....	11
Tabela 4: Eficiência horária na recolha de dados de dióxido de azoto (NO_2), em percentagem, por estação, no período de 2014 a 2021.....	12
Tabela 5: Concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por estação, no período de 2014 a 2021.....	13
Tabela 6: Excedências ao valor-limite horário de dióxido de azoto (NO_2) de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por estação, no período de 2014 a 2021.....	13
Tabela 7: 19.º valor máximo horário da concentração de dióxido de azoto (NO_2), em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por estação, no período de 2014 a 2021.....	14
Tabela 8: Valores-limite para a proteção da saúde humana relativos às partículas em suspensão (PM_{10}) no ar ambiente, estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.....	24
Tabela 9: Eficiência diária na recolha de dados de PM_{10} , em percentagem, por estação, no período de 2014 a 2021.....	25
Tabela 10: Concentração média anual de PM_{10} , por estação, no período de 2014 a 2021.....	25
Tabela 11: Excedências ao valor limite diário de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentração média diária PM_{10} , por estação, no período de 2014 a 2021.....	26
Tabela 12: Objetivo a longo prazo, valor-alvo e limiares de informação e de alerta para o ozono (O_3) no ar ambiente, estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.....	35
Tabela 13: Eficiência horária na recolha de dados de ozono (O_3), em percentagem, por estação, no período de 2014 a 2021.....	36
Tabela 14: Concentração média anual de ozono (O_3), base horária, por estação, no período de 2014 a 2021.....	36
Tabela 15: Excedências ao Objetivo de Longo Prazo (OLP) ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$), por estação, no período de 2014 a 2021.....	37
Tabela 16: Concentração de ozono (O_3) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), correspondente ao 26.º máximo diário da média móvel de 8h, por estação, no período de 2014 a 2021.....	37
Tabela 17: Excedências ao limiar de informação do ozono (O_3) ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$), por estação, no período de 2014 a 2021.....	38
Tabela 18: Excedências ao limiar de alerta do ozono (O_3) ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$), por estação, no período de 2014 a 2021.....	38

ÂMBITO

O presente documento constitui o relatório de Avaliação da qualidade do ar na Região Norte, elaborado a partir do histórico de dados disponível para o período de 2014 a 2021, no âmbito do Concurso Público REF.^a CPI.PA.2025.1 – “Aquisição de Serviços para a Realização do Estudo Técnico-Científico na Área da Qualidade do Ar Ambiente”, promovido pela Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, I.P. (CCDR-N).

O estudo incide sobre a análise das concentrações de dióxido de azoto (NO_2), partículas em suspensão (PM_{10}) e ozono (O_3), com base nos dados recolhidos nas estações pertencentes à Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte (RMQAR-N).

A avaliação compreende:

- A caracterização da eficiência de funcionamento da rede;
- A análise da evolução temporal das concentrações dos poluentes no período em estudo;
- A avaliação da conformidade legal face aos valores de qualidade do ar definidos na legislação em vigor.

O período de análise (2014–2021) corresponde, a uma fase anterior ao processo de modernização da RMQAR-N, marcada por limitações ao nível dos equipamentos de monitorização, da eficiência operacional e dos procedimentos de validação de dados. Nesse sentido, os resultados devem ser interpretados como uma caracterização histórica do comportamento da qualidade do ar na Região Norte, permitindo identificar padrões, tendências e fragilidades estruturais da rede, essenciais para a definição de estratégias de melhoria.

INTRODUÇÃO

No presente documento apresenta-se a avaliação da qualidade do ar ambiente na Região Norte (RN) para o período compreendido no período de 2014 a 2021, tendo por base as concentrações dos poluentes medidas nas estações de monitorização integradas na Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte (RMQAR-N).

A análise realizada incide na avaliação da conformidade legal das concentrações observadas face aos valores dos objetivos de qualidade do ar estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de Setembro (na sua versão consolidada, que transpõe para o direito nacional a Diretiva 2008/50/CE e a Diretiva 2004/107/CE, relativas à avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente).

São analisados, em particular, os poluentes dióxido de azoto (NO_2), partículas em suspensão com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 μm (PM_{10}) e ozono troposférico (O_3), atendendo à sua relevância para a proteção da saúde humana e dos ecossistemas.

Para cada um dos poluentes é ainda efetuada a análise da evolução temporal das concentrações ao longo do período em estudo, com base nos indicadores legalmente definidos para a avaliação da conformidade, bem como através da caracterização de padrões horários, semanais, mensais e sazonais.

Importa salientar que o intervalo temporal de 2014 a 2021 corresponde a um período anterior à renovação estrutural da RMQAR-N, caracterizado, em vários anos, por equipamentos de medição obsoletos, falhas operacionais recorrentes, metodologias de validação de dados menos robustas e níveis de eficiência de funcionamento reduzidos. Estas limitações condicionam a representatividade estatística de parte dos dados utilizados, sendo por esse motivo explicitamente consideradas na metodologia e na interpretação dos resultados apresentados.

A análise desenvolvida neste relatório visa, assim, não apenas a avaliação da conformidade legal das concentrações observadas, mas também a identificação de padrões históricos de comportamento da qualidade do ar na Região Norte, contribuindo para o reforço metodológico da rede, a melhoria dos sistemas de monitorização e o suporte à definição de políticas públicas de gestão da qualidade do ar.

REDE DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR DA REGIÃO NORTE

As zonas e aglomerações para efeitos de avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente foram inicialmente delimitadas, a nível nacional, em 2001. Na RN foram definidas as seguintes unidades territoriais: Norte Litoral; Norte Interior; Braga; Vale do Ave; Vale do Sousa e Porto Litoral (Instituto do Ambiente; DCEA-FCT/UNL, 2002).

Em 2009, a CCDR-N promoveu um estudo de reavaliação das zonas e aglomerações da RN (CCDR-N; DCEA-FCT/UNL, 2009). O estudo analisou os dados históricos das estações entre 2003 e 2007, bem como os resultados de campanhas de monitorização realizadas em 2008. O resultado destas campanhas de monitorização permitiu melhorar o conhecimento existente sobre a distribuição espacial dos poluentes, em particular na aglomeração do Porto Litoral.

Em 2012, na sequência de um processo de remodelação da RMQAR-N, foi efetuada a reorganização territorial das aglomerações, tendo as anteriores aglomerações de Braga, Vale do Ave e Vale do Sousa sido agregadas na nova aglomeração de Entre Douro e Minho. A RMQAR-N passou então a integrar 21 estações de monitorização da qualidade do ar.

Em 2021 foi publicado o resultado de um novo estudo de reavaliação da delimitação das zonas e aglomerações da Região Norte (CCDR-N; FCT/UNL, 2021), considerando dados atualizados de população à escala da freguesia, bem como o conhecimento mais recente sobre as características territoriais e a qualidade do ar na região. Este estudo confirmou a manutenção das zonas e aglomerações anteriormente definidas, bem como a adequação global da rede existente.

Em 2019 foi integrada na RMQAR-N a estação de Santa Combinha, localizada no município de Macedo de Cavaleiros. A estação de Santa Combinha é gerida pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Em 2021, a rede passou a integrar um total de 22 estações de monitorização da qualidade do ar, maioritariamente localizadas em áreas urbanas da Região Norte. Contemplando assim 21 estações da Rede de Monitorização da Qualidade do ar geridas pela CCDR-N e 1 estação gerida pela Agência Portuguesa do Ambiente.

As estações encontram-se instaladas em locais representativos de diferentes tipos de ambientes (urbano, suburbano e rural) e de diferentes tipos de influência dominante (tráfego, industrial e fundo), de acordo com as principais fontes emissoras existentes na respetiva envolvente.

As estações urbanas e suburbanas de fundo destinam-se a representar a exposição média da população, sendo influenciadas pela contribuição combinada das fontes situadas a barlavento. As estações de tráfego localizam-se na proximidade de vias com tráfego intenso, permitindo a avaliação do risco máximo de exposição da população às emissões rodoviárias. As estações industriais visam a caracterização das concentrações máximas de poluentes de origem industrial a que a população pode estar pontualmente exposta.

As estações rurais de fundo situam-se afastadas de fontes poluidoras significativas e de zonas densamente povoadas, refletindo essencialmente o transporte regional e de longa distância de poluentes. Estas estações assumem especial relevância na monitorização de poluentes secundários, como o ozono (O_3), bem como na identificação de fenómenos naturais, como intrusões de poeiras do Norte de África ou impactes de incêndios florestais.

Na Figura 1 apresenta-se a delimitação das zonas e aglomerações para efeitos de avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente na Região Norte, em vigor em 2021, e na Figura 2 a localização das estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte em funcionamento no mesmo ano.

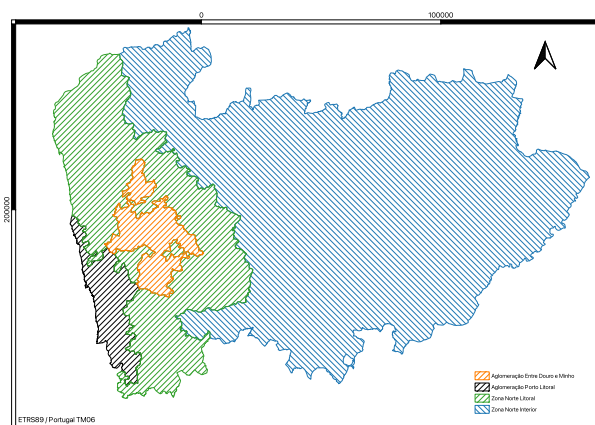


Figura 1: Delimitação das zonas e aglomerações para efeitos de avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente na Região Norte, em vigor em 2021.

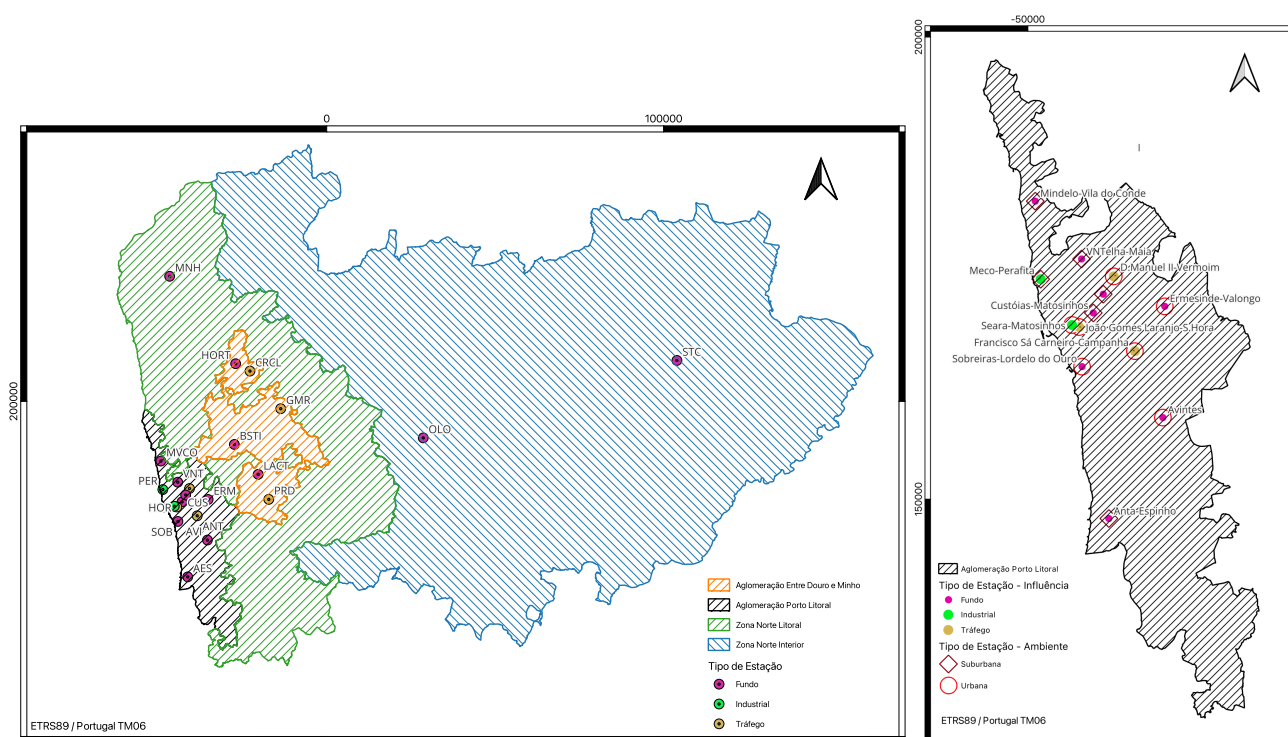


Figura 2: Localização das estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte em funcionamento em 2021.

Na Tabela 1 são apresentadas as estações da RMQAR-N por tipo de ambiente e tipo de influência dominante. As estações urbanas e suburbanas encontram-se classificadas em função da influência das fontes de emissões dominantes nas zonas onde se encontram instaladas (tráfego, de fundo e industriais). A RMQAR-N possui:

- 5 estações urbanas de fundo e 6 estações suburbanas de fundo – As estações urbanas e suburbanas de fundo estão localizadas em zonas onde os níveis são representativos da exposição média da população em geral. Os valores medidos resultam da contribuição combinada de todas as fontes situadas a barlavento da estação. A RMQAR-N possui 3 estações urbanas e 5 suburbanas na Aglomeração Porto Litoral, 2 estações urbanas e 1 estação suburbana na Aglomeração Entre Douro e Minho. Cada estação é representativa de uma área de vários quilómetros quadrados na sua envolvente.
- 2 estações industriais – As estações industriais permitem conhecer as concentrações máximas de certos poluentes de origem industrial às quais a população pode estar pontualmente exposta. As estações industriais da RMQAR-N localizam-se, uma na zona industrial de Perafita/Leça da Palmeira e outra a sul do complexo energético e industrial de Leça da Palmeira, zona influenciada também pelo porto de Leixões e pelo tráfego rodoviário associado. Salienta-se que a Refinaria da GALP, em Leça da Palmeira, deixou de funcionar em 2021.

– 6 estações urbanas de tráfego – As estações de tráfego localizam-se na proximidade de vias de tráfego intenso e permitem avaliar o risco máximo de exposição da população às emissões do tráfego automóvel. A RMQAR-N possui 3 estações urbanas de tráfego em cada uma das aglomerações: Porto Litoral e Entre Douro e Minho.

– 3 estações rurais de fundo – As estações rurais de fundo situam-se afastadas de fontes poluidoras significativas e de zonas densamente povoadas. As concentrações registadas refletem essencialmente o transporte regional e de longa distância de poluentes. Estas estações são fundamentais para monitorizar poluentes de origem natural (por exemplo, poeiras do Norte de África) ou resultantes de incêndios florestais, bem como para avaliar a exposição da população e dos ecossistemas à poluição de fundo, nomeadamente a poluentes secundários como o ozono (O₃). A RMQAR-N possui 3 estações rurais de fundo, sendo 1 na Zona Norte Litoral e 2 na Zona Norte Interior.

Tabela 1: Estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte (RMQAR-N), por tipo de ambiente envolvente e tipo de influência dominante, em funcionamento no ano de 2021.

Zona/Aglomeração	Tipo de estação – Ambiente envolvente	Tipo de estação – Influência dominante		
		Tráfego	Industrial	Fundo
Porto Litoral	Urbana	3	1	3
	Suburbana	-	1	5
Entre Douro e Minho	Urbana	3	-	2
	Suburbana	-	-	1
Norte Litoral	Rural	-	-	1
Norte Interior	Rural	-	-	2
Total		6	2	14

Nota: A classificação das estações por tipo de ambiente (urbano, suburbano e rural) e por tipo de influência dominante (tráfego, industrial e fundo) encontra-se definida nos termos da Diretiva 2008/50/CE e do Decreto-Lei n.º 102/2010.

Na Tabela 2 são apresentadas as estações da RMQAR-N, por tipo de ambiente e tipo de influência, e os poluentes medidos (considerando os poluentes analisados no presente estudo) em cada uma das estações.

Tabela 2: Identificação das estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte (RMQAR-N) em funcionamento no ano de 2021, respetiva classificação por tipo de ambiente e por tipo de influência dominante, e poluentes monitorizados (considerando os poluentes analisados no presente estudo).

Zona/Aglomeração	Estação		Tipo de estação		Poluente		
	Nome	Abreviatura	Influência dominante	Ambiente envolvente	NO ₂	PM ₁₀	O ₃
Porto Litoral	Anta - Espinho	AES	Fundo	Suburbana	X	X	X
	Avintes	AVI	Fundo	Urbana	X	X	X
	Custóias - Matosinhos	CUS	Fundo	Suburbana	X	X	X
	D. Manuel II - Verim	VER	Tráfego	Urbana	X	X	
	Ermesinde - Valongo	ERM	Fundo	Urbana	X	X	X
	Francisco Sá Carneiro - Campanhã	ANT	Tráfego	Urbana	X	X	-
	João Gomes Laranjo - S. Hora	HOR	Tráfego	Urbana	X	X	-
	Leça do Balio - Matosinhos	LEC	Fundo	Suburbana	-	X	X
	Meco - Perafita	PER	Industrial	Suburbana	-	X	X
	Mindelo - Vila do Conde	MVCO	Fundo	Suburbana	X	X	X
	Seara - Matosinhos	SEA	Industrial	Urbana	-	X	-
	Sobreiras - Lordelo do Ouro	SOB	Fundo	Urbana	X	X	X
	VNTelha - Maia	VNT	Fundo	Suburbana	X	X	X
Entre Douro e Minho	Burgães - Santo Tirso	BSTI	Fundo	Urbana	X	X	X
	Córego Dr. Manuel Faria - Azurém	GMR	Tráfego	Urbana	X	X	-
	Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	CRCL	Tráfego	Urbana	X	X	-
	Frossos - Braga	HORT	Fundo	Suburbana	X	-	X
	Paços de Ferreira	LACT	Fundo	Urbana	X	X	X
	Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	PRD	Tráfego	Urbana	X	X	-
Norte Litoral	Minho - Lima	MNH	Fundo	Rural	X	X	X
Norte Interior	Douro Norte	OLO	Fundo	Rural	X	X	X
	Santa Cominha	STC	Fundo	Rural	X	X	X

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR

No presente capítulo apresenta-se a análise do histórico de dados validados relativos ao período de 2014 a 2021 para os poluentes dióxido de azoto (NO_2), partículas em suspensão (PM_{10}) e ozono (O_3).

É apresentado um diagnóstico da qualidade do ar para a Região Norte que inclui a análise da situação de eficiência da rede, a evolução das concentrações médias dos poluentes em estudo e a avaliação da respetiva da situação de conformidade legal.

Como referido anteriormente, o período de 2014 a 2021 corresponde a uma fase anterior à renovação tecnológica das estações da RMQAR-N, marcada pela utilização de equipamentos de medição obsoletos, por falhas operacionais recorrentes, por metodologias de recolha e validação de dados menos robustas e por uma eficiência de funcionamento reduzida em vários anos, comprometendo a representatividade estatística dos dados. A análise global deste intervalo visa identificar padrões históricos de comportamento da qualidade do ar e propor melhorias futuras na manutenção dos analisadores e nos critérios de validação de dados, contribuindo para o reforço metodológico da rede.

O Decreto-Lei n.º 102/2010 define, nos objetivos de qualidade dos dados, uma taxa mínima de recolha de dados de 90%. Os requisitos em matéria de cálculo da média anual não incluem as perdas de dados decorrentes da calibração regular e da manutenção periódica dos instrumentos. Assim, para o cálculo da taxa de recolha de dados, o número de medições em falta devido as operações de calibração e manutenção deverá ser subtraído ao número máximo teórico de medições do ano. Na impossibilidade de contabilização rigorosa da perda de dados, é usualmente considerado que esta corresponde a uma percentagem de 5% [Guia dos anexos da Decisão 97/101/EC, de 27 de janeiro, relativa à troca de informação, revista de acordo com a Decisão 2001/752/EC, de 17 de outubro].

Para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores limite, valores-alvo e objetivos de longo prazo definidos na legislação em vigor, considera-se neste estudo apenas a análise dos dados provenientes de estações com uma eficiência de recolha igual ou superior a 85%. No entanto, para efeitos de análise da evolução temporal das concentrações e da caracterização dos perfis temporais (horário, dia da semana, mensal e anual), são igualmente analisadas as estações com eficiência de recolha igual ou superior a 14%, exclusivamente para fins exploratórios, não sendo estes resultados utilizados para a avaliação da conformidade legal.

DIÓXIDO DE AZOTO (NO_2)

O Decreto-Lei n.º 102/2010 fixa os valores limite das concentrações do dióxido de azoto (NO_2) no ar ambiente para proteção da saúde humana (Tabela 3).

Tabela 3: Valores- limite e limiar de alerta para proteção da saúde humana relativos ao dióxido de azoto (NO_2) no ar ambiente, estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Indicador	Período de referência	Valor	Observações
Valor limite horário	Uma hora	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	A não exceder mais de 18 vezes por ano civil
Valor limite anual	Ano civil	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Média anual
Limiar de alerta	Três horas consecutivas		Média horária, medida em três horas consecutivas

Nota: Os valores-limite aplicam-se às concentrações medidas no ar ambiente, avaliadas de acordo com os métodos de referência e os critérios de qualidade de dados definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Dados globais

Na Figura 3 é apresentada a eficiência na recolha horária de dados de NO_2 na RMQAR-N, por ano, no período de 2014 a 2021. Observa-se que a rede apresenta, em vários anos, uma eficiência global reduzida, com particular destaque para o período mais recente. Nos anos de 2020 e 2021, fortemente condicionados pela pandemia de COVID-19 e por limitações operacionais dos analisadores, o número de estações com eficiência superior a 85% foi muito reduzido, o que limita a avaliação da conformidade legal nesses anos.

Na Tabela 4 é apresentada a eficiência horária na recolha de dados de NO₂, em percentagem, por estação, no período de 2014 a 2021, evidenciando as diferenças de desempenho entre estações e anos de funcionamento.

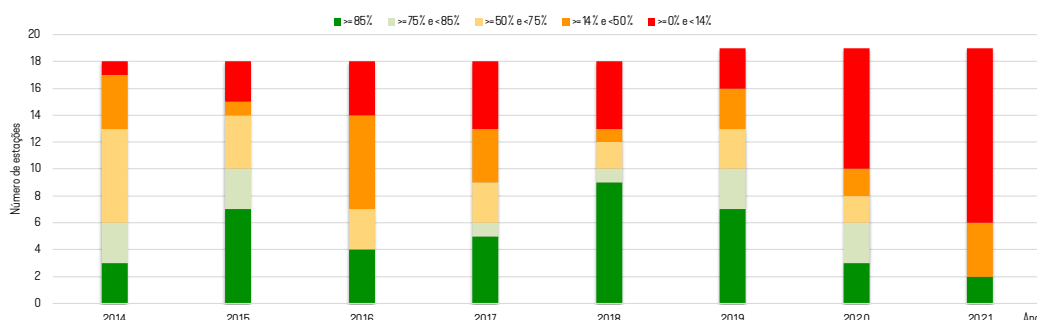


Figura 3: Eficiência horária na recolha de dados de dióxido de azoto (NO₂) na RMQAR-N, em percentagem, por ano, no período de 2014 a 2021.

Tabela 4: Eficiência horária na recolha de dados de dióxido de azoto (NO₂), em percentagem, por estação, no período de 2014 a 2021.

Agglomeração/Zona	Tipo	Estação	Eficiência na recolha de dados de NO ₂ (%), por ano.							
			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Agglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	62	78	87	31	99	94	0	0
		Custóias - Matosinhos	74	73	20	2	8	24	0	0
		Mindelo - Vila do Conde	80	90	63	91	98	89	98	9
		VNTelha - Maia	66	98	100	72	98	87	61	94
	Urb. Fundo	Avintes	70	0	0	0	0	0	0	0
		Ermesinde - Valongo	47	72	97	42	0	95	83	0
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	66	85	27	5	0	0	0	0
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	77	62	2	44	92	83	0	0
		Francisco Sá Carneiro - Campanhã	32	93	68	43	93	62	62	29
		João Gomes Laranjo - S. Hora	45	57	98	93	90	82	0	4
Agglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	82	79	37	94	90	89	91	18
		Pacos de Ferreira	54	90	47	76	76	88	23	0
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	92	99	68	0	0	0	0	0
	Urb. Tráfego	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	24	0	9	72	14	66	87	29
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	50	83	34	98	94	33	0	21
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	89	93	41	98	98	37	0	0
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	0	10	18	0	61	76	78	4
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	85	27	0	54	68	87	36	0
		Santa Combinha	---	---	---	---	---	58	75	95

Nota: A cor das células corresponde à eficiência horária na recolha de dados: >=85% (verde), >=75% e <85% (verde claro), >=50% e <75% (amarelo), >=14% e <50% (laranja), >=0% e <14% (vermelho).

Na Tabela 5 apresenta-se a concentração média anual de NO₂, em (µg/m³), base horária, por estação, no período de 2014 a 2021. Na Tabela 6 apresenta-se o número de excedências ao valor limite horário de NO₂ (200 µg/m³), por estação, no período de 2014 a 2021. Na Tabela 7 apresenta-se, para cada estação e para cada ano, o 19.º valor máximo horário da concentração de NO₂, em µg/m³. Este indicador é utilizado na avaliação da conformidade com o valor-limite horário de 200 µg/m³, uma vez que a legislação estabelece que este valor não pode ser excedido mais de 18 vezes por ano civil.

Tabela 5: Concentração média anual de dióxido de azoto (NO₂), em (µg/m³), por estação, no período de 2014 a 2021.

Aglomeração/Zona	Tipo	Estação	Concentração média anual de NO ₂ (µg/m ³), por ano.							
			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	14	17	25	28	25	28	---	---
		Custóias - Matosinhos	27	29	33	66	40	27	---	---
		Mindelo - Vila do Conde	16	18	17	21	18	17	20	28
		VNTelha - Maia	15	19	21	22	19	16	14	16
	Urb. Fundo	Avintes	19	---	---	---	---	---	---	---
		Ermesinde - Valongo	21	28	28	28	---	27	22	---
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	23	25	16	18	---	---	---	---
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	23	27	13	18	23	22	---	---
		Francisco Sá Carneiro - Campanhã	47	85	75	54	62	45	40	41
		João Gomes Laranjo - S. Hora	32	37	23	31	36	48	---	24
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	14	16	19	16	15	17	14	14
		Paços de Ferreira	13	17	16	16	13	15	19	---
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	4	13	13	---	---	---	---	9
	Urb. Tráfego	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	38	---	16	25	44	35	32	29
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	44	46	55	88	60	57	---	36
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	22	25	26	27	23	33	---	---
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	---	13	11	---	8	8	8	4
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	4	4	---	9	14	11	12	---
		Santa Combinha	---	---	---	---	---	2	2	1

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses valores considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com o valor-limite anual de 40 µg/m³ definido no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes valores podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva da evolução temporal quando a eficiência é igual ou superior a 14%. As células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%, sendo os valores apresentados a vermelho e a negrito indicativos de excedência do valor-limite anual.

Tabela 6: Excedências ao valor-limite horário de dióxido de azoto (NO₂) de 200 µg/m³, por estação, no período de 2014 a 2021.

Aglomeração/Zona	Tipo	Estação	Excedências por ano.							
			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	0	0	0	0	8	3	---	---
		Custóias - Matosinhos	0	0	0	0	0	0	---	---
		Mindelo - Vila do Conde	0	0	0	0	0	0	0	0
		VNTelha - Maia	0	0	0	0	0	0	0	0
	Urb. Fundo	Avintes	0	---	---	---	---	---	---	---
		Ermesinde - Valongo	0	0	0	0	---	0	0	---
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	0	0	0	0	---	---	---	---
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	0	0	0	0	0	0	---	---
		Francisco Sá Carneiro - Campanhã	0	10	6	0	6	6	0	0
		João Gomes Laranjo - S. Hora	0	0	0	0	2	6	---	0
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	0	0	0	0	0	0	0	0
		Paços de Ferreira	0	2	0	0	0	0	0	---
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	0	0	0	---	---	---	---	0
	Urb. Tráfego	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	0	---	0	0	0	0	0	0
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	0	0	0	8	0	0	---	0
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	0	0	0	0	0	7	---	---
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	---	0	0	---	0	0	0	0
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	0	0	---	0	0	0	0	---
		Santa Combinha	---	---	---	---	---	0	0	0

Nota: O valor-limite horário de 200 µg/m³ não pode ser excedido mais de 18 vezes por ano civil. Apenas os anos com eficiência horária de recolha de dados ≥ 85% são considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal. As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados inferior a 85% e as células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

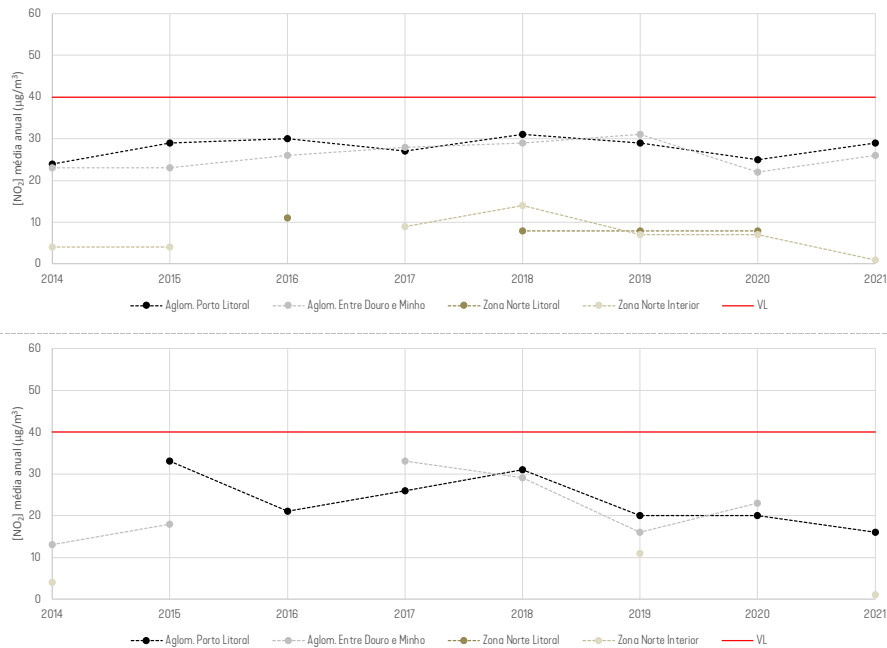
Tabela 7: 19.º valor máximo horário da concentração de dióxido de azoto (NO₂), em µg/m³, por estação, no período de 2014 a 2021.

Aglomeração/Zona	Tipo	Estação	Concentração de NO ₂ (µg/m ³), 19.º máximo horário, por ano.							
			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	107	105	90	97	151	178	---	---
		Custóias - Matosinhos	126	124	106	116	109	89	---	---
		Mindelo - Vila do Conde	82	86	89	106	73	110	109	99
		VNTelha - Maia	80	114	112	112	96	95	74	71
	Urb. Fundo	Avintes	83	---	---	---	---	---	---	---
		Ermesinde - Valongo	117	147	116	116	---	114	117	---
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	106	119	55	39	---	---	---	---
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	120	139	15	95	107	110	---	---
		Francisco Sá Carneiro - Campanhã	149	194	185	176	187	184	143	107
		João Gomes Laranjo - S. Hora	113	118	107	140	157	183	---	58
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	54	64	62	70	67	59	52	49
		Paços de Ferreira	59	114	50	72	62	65	61	---
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	6	60	60	---	---	---	---	9
	Urb. Tráfego	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	87	---	29	104	93	126	107	69
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	145	155	132	188	157	153	---	78
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	77	90	79	99	96	137	---	---
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	---	35	27	---	22	41	19	6
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	15	11	---	16	68	25	17	---
		Santa Combinha	---	---	---	---	---	8	10	8

Nota: O valor-limite horário de NO₂ (200 µg/m³) não pode ser excedido mais de 18 vezes por ano civil. O 19.º valor máximo horário constitui o indicador operacional de conformidade: se o 19.º valor máximo horário for superior a 200 µg/m³, então ocorreram pelo menos 19 excedências nesse ano, não sendo cumprido o critério legal. Apenas os anos com eficiência horária de recolha de dados ≥ 85% são considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal. As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados inferior a 85% e as células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

Na Figura 4 é apresentada a tendência evolutiva das concentrações médias anuais de NO₂, base horária, agregadas por aglomeração e zona. O gráfico superior (a) apresenta a evolução considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 14%, sendo utilizado para análise descritiva da evolução temporal das concentrações. As médias apresentadas correspondem a médias aritméticas simples das concentrações médias anuais das estações incluídas.

O gráfico inferior (b) apresenta a evolução da concentração média anual de NO₂ considerando exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%, sendo este o único a utilizar para efeitos de avaliação da conformidade legal com o valor-limite anual de 40 µg/m³.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.

(b) considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

Figura 4: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO₂), base horária, em µg/m³, por aglomeração e zona, no período de 2014 a 2021. O traço horizontal a vermelho corresponde ao valor-limite anual de 40 µg/m³.

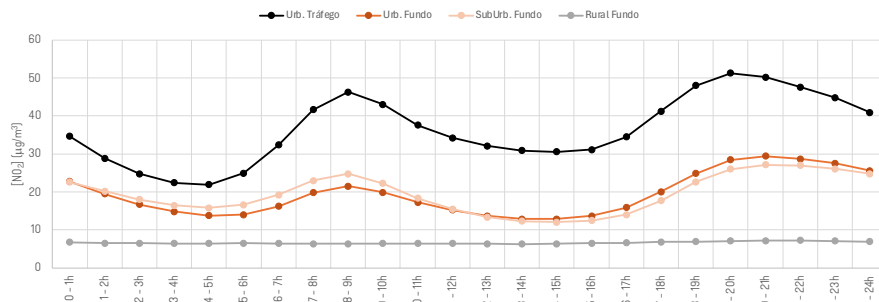
Os perfis temporais apresentados na Figura 5 à Figura 8 (horário, por dia da semana e mensal) foram construídos com base nas estações com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 14% e também considerando exclusivamente as estações com eficiência $\geq 85\%$, com o objetivo de demonstrar a consistência e a robustez dos padrões temporais observados. Estes perfis destinam-se exclusivamente à caracterização do comportamento temporal típico do dióxido de azoto (NO₂), não se destinando à avaliação da conformidade legal.

Perfil horário

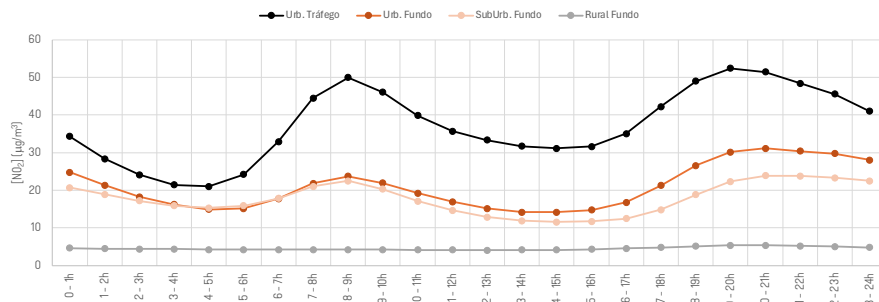
Por tipo de estação

Na Figura 5 é apresentado o perfil horário da concentração média de dióxido de azoto (NO₂), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021. Nas estações urbanas verifica-se que as concentrações de NO₂ apresentam uma variação típica associada ao tráfego rodoviário, com um primeiro pico no início da manhã e um segundo pico no final da tarde. A concentração mais elevada no pico do final da tarde está associada à maior estabilidade atmosférica junto à superfície e consequente menor dispersão dos poluentes.

Nas estações de fundo, as concentrações médias de NO₂ são significativamente inferiores às observadas nas estações urbanas e não apresentam uma variação horária relevante ao longo do dia, refletindo essencialmente níveis de poluição de fundo.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.

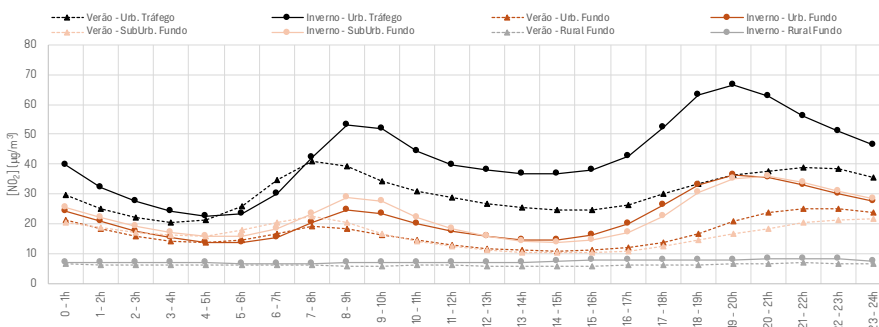


(b) considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

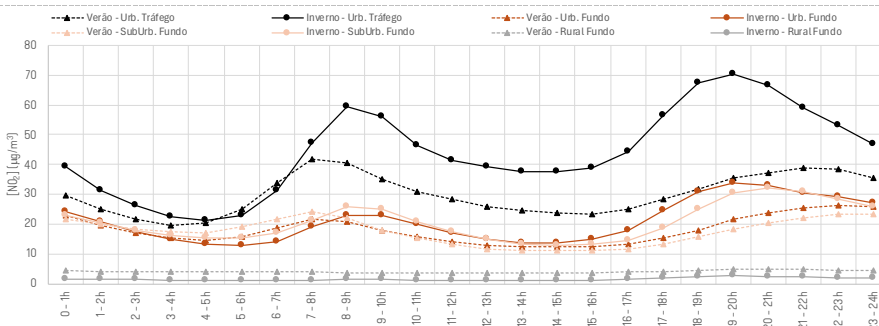
Figura 5: Perfil horário da concentração média dióxido de azoto (NO_2), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.

Comparação verão-inverno

Na Figura 6 é apresentado o perfil horário da concentração média de dióxido de azoto (NO_2), em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, da Região Norte, por estação do ano, por tipo de estação, no período de 2014 a 2021. Verifica-se que as concentrações de NO_2 são, de forma geral, mais elevadas no período de inverno (outubro a março) o que se encontra associado a uma maior estabilidade atmosférica junto à superfície, resultante da menor intensidade da radiação solar, e à consequente menor dispersão dos poluentes.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.

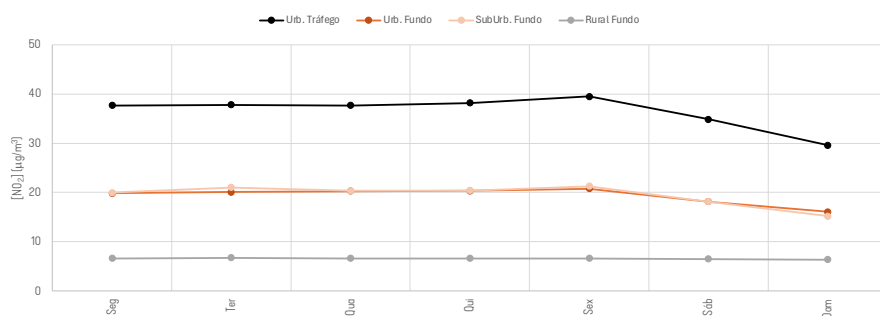


(b) considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

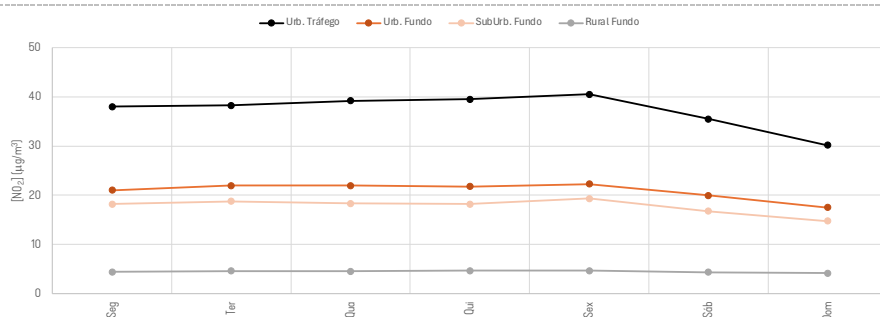
Figura 6: Perfil horário da concentração média dióxido de azoto (NO_2), na Região Norte, por estação do ano, por tipo de estação, no período de 2014 a 2021. Verão - intervalo de 1 de abril a 30 de setembro; Inverno - intervalo de 1 de outubro a 31 de março.

Perfil dia da semana

Na Figura 7 é apresentado o perfil por dia da semana da concentração média diária de dióxido de azoto (NO_2), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021. Nas estações urbanas as concentrações de NO_2 são mais elevadas nos dias úteis, devido a uma maior intensidade de tráfego rodoviário. Nas estações rurais, as concentrações de NO_2 são sempre reduzidas e não se identifica uma relação significativa entre os níveis observados e o dia da semana, refletindo predominantemente valores característicos de poluição de fundo.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.



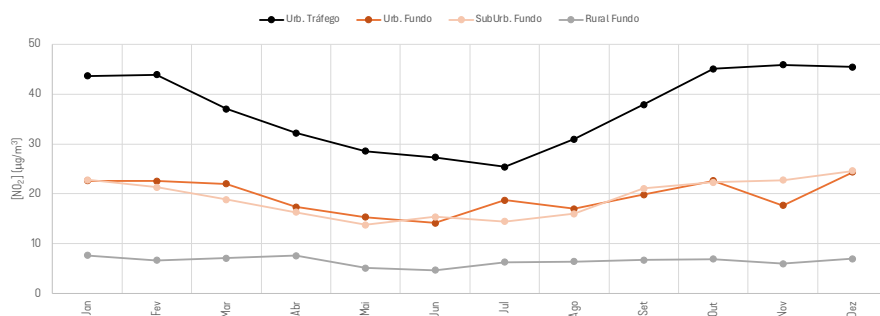
(b) considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

Figura 7: Perfil por dia da semana da concentração média diária dióxido de azoto (NO_2), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.

Perfil mensal

Na Figura 8 é apresentado o perfil mensal da concentração média de dióxido de azoto (NO_2), base horária, na Região Norte, no período de 2014 a 2021. Verifica-se que as concentrações de NO_2 são, de forma geral, mais elevadas no período de inverno (outubro a março), o que se encontra associado a uma maior estabilidade atmosférica junto à superfície, resultante da menor intensidade da radiação solar, e à consequente menor dispersão dos poluentes.

Nas estações urbanas de tráfego, observa-se que a concentração média mensal de NO_2 no mês de julho é aproximadamente metade da concentração média registada nos meses de inverno, refletindo a combinação entre melhores condições de dispersão atmosférica e a redução da intensidade do tráfego em período estival.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.

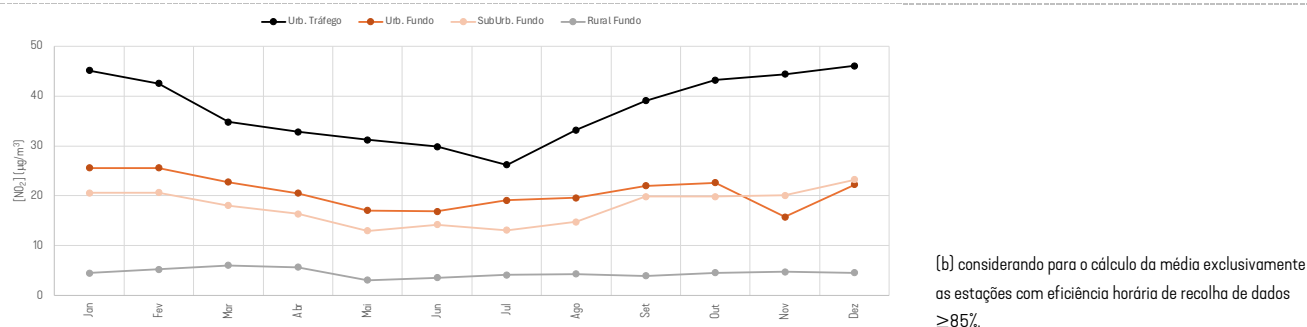


Figura 8: Perfil mensal da concentração média de dióxido de azoto (NO_2), base horária, na Região Norte, no período de 2014 a 2021.

Estações urbanas de tráfego

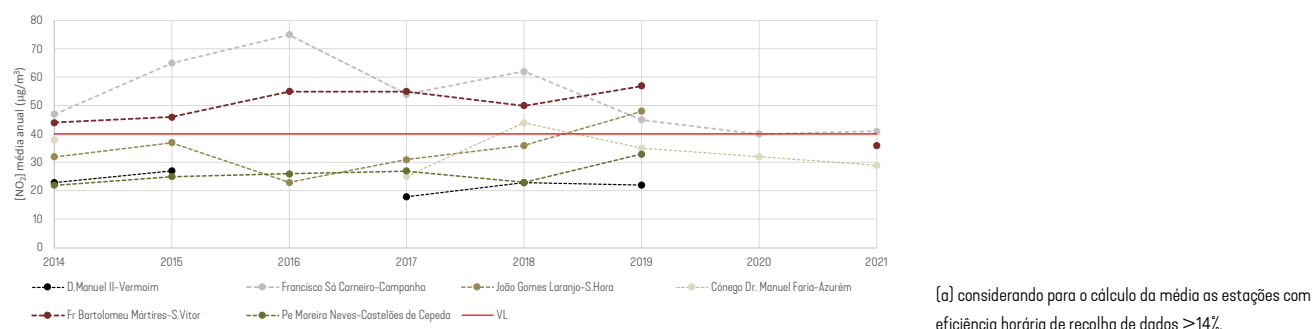
Na Figura 9 é apresentada a variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações urbanas de tráfego das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

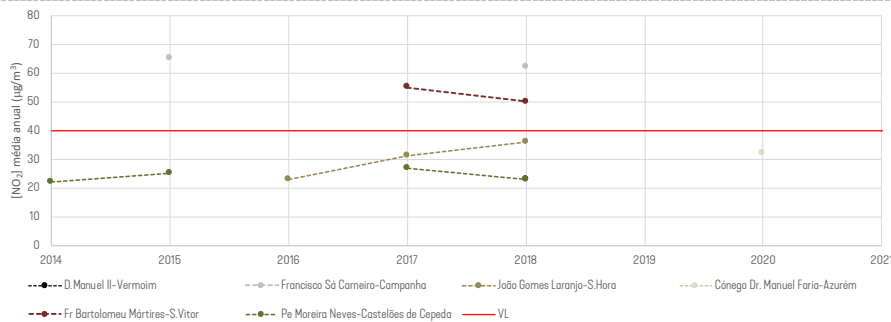
O gráfico superior (a), baseado nas estações com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 14%, é utilizado para a análise descritiva da evolução temporal das concentrações e permite identificar a tendência global de comportamento do NO_2 nas zonas marcadamente influenciadas pelo tráfego rodoviário. Neste gráfico observa-se, de forma geral, uma diminuição progressiva das concentrações médias de NO_2 ao longo do período analisado, com reduções particularmente acentuadas em 2020 e 2021, associadas às medidas de confinamento e à redução excecional do tráfego rodoviário durante a pandemia de COVID-19. Esta leitura deve, contudo, ser enquadrada tendo em conta as limitações de eficiência de recolha de dados em algumas estações e anos.

O gráfico inferior (b), que considera exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85% e que é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, mostra que, nos anos estatisticamente válidos, se verificam situações de incumprimento do valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nas estações Francisco Sá Carneiro e Frei Bartolomeu dos Mártires – S. Vitor.

No ano de 2018, observa-se igualmente uma situação de incumprimento do valor-limite anual na estação Cónego Dr. Manuel Faria – Azurém.

Nos anos de 2020 e 2021, a recolha de dados foi muito reduzida em várias estações, não permitindo assegurar a robustez estatística necessária para a avaliação da conformidade legal dos resultados obtidos nesses anos.





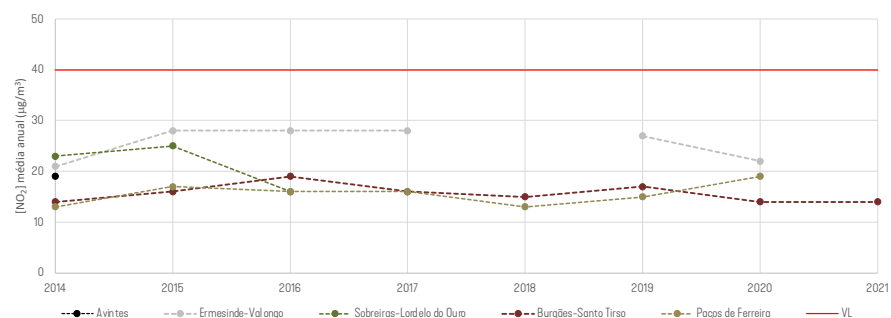
(b) considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

Figura 9: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações urbanas de tráfego das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

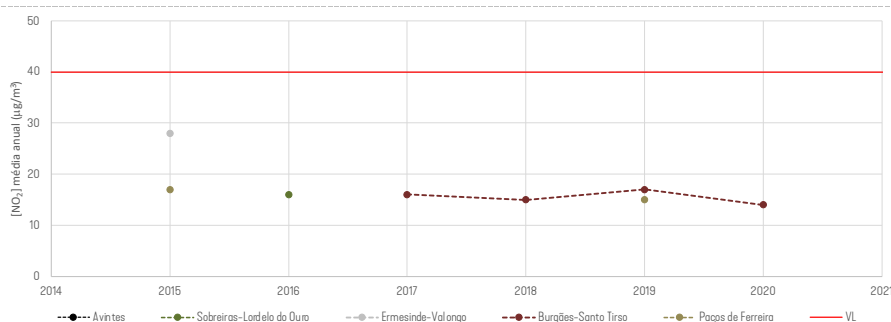
Estações urbanas de fundo

Na Figura 10 é apresentada a variação da concentração média anual de NO_2 , base horária, nas estações urbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021. O gráfico superior (a), baseado nas estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite a análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando uma tendência global de diminuição dos níveis médios de NO_2 ao longo do período analisado.

O gráfico inferior (b), que considera exclusivamente as estações com eficiência horária $\geq 85\%$ e que é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, mostra que, nos anos estatisticamente válidos, as concentrações médias anuais de NO_2 nas estações urbanas de fundo se mantêm abaixo do valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estes resultados indicam que, ao nível do fundo urbano, a exposição média da população ao NO_2 não apresenta, na generalidade dos anos válidos, situações de incumprimento do critério legal, refletindo níveis de poluição típicos de ambiente urbano não diretamente influenciado por fontes locais intensas, como o tráfego rodoviário.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.



(b) considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

Figura 10: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações urbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

Estações suburbanas de fundo

Na Figura 11 é apresentada a variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações suburbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

O gráfico superior (a), que inclui as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite a análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando, à semelhança do observado nas estações urbanas de fundo, uma tendência global de diminuição progressiva das concentrações médias de NO_2 ao longo do período analisado.

O gráfico inferior (b) apresenta a evolução da concentração média anual de NO_2 considerando exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85% e mostra que, nos anos estatisticamente válidos, as concentrações médias anuais de NO_2 nas estações suburbanas de fundo se mantêm inferiores ao valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, não se observando incumprimento do critério legal.

Tal como nas restantes tipologias de estação, nos anos de 2020 e 2021 a reduzida eficiência de recolha de dados, associada às condicionantes operacionais do período pandémico, limita a robustez estatística da informação disponível.

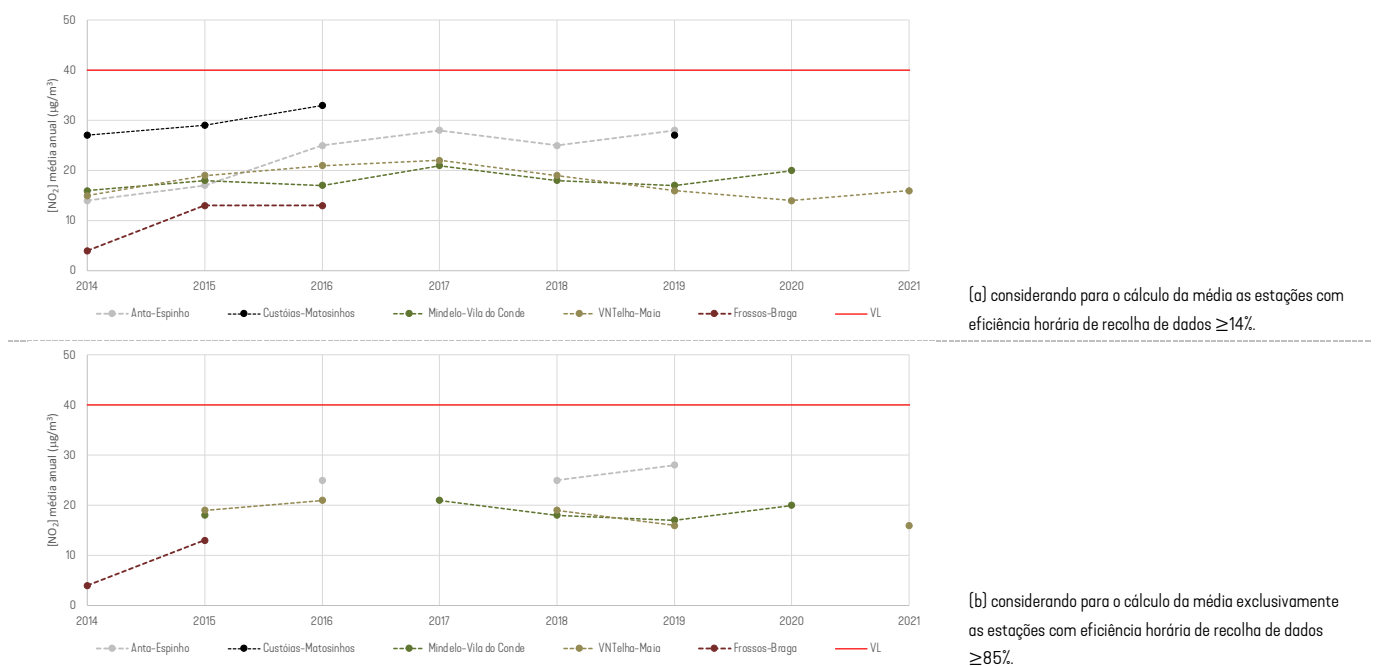


Figura 11: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações suburbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

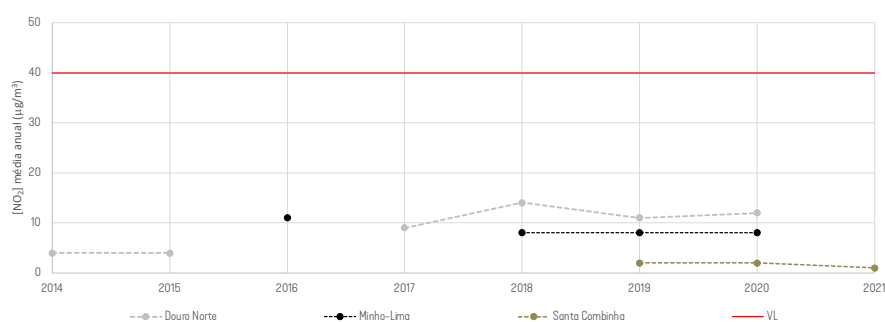
Estações rurais de fundo

Na Figura 12 é apresentada a variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações rurais de fundo, no período de 2014 a 2021.

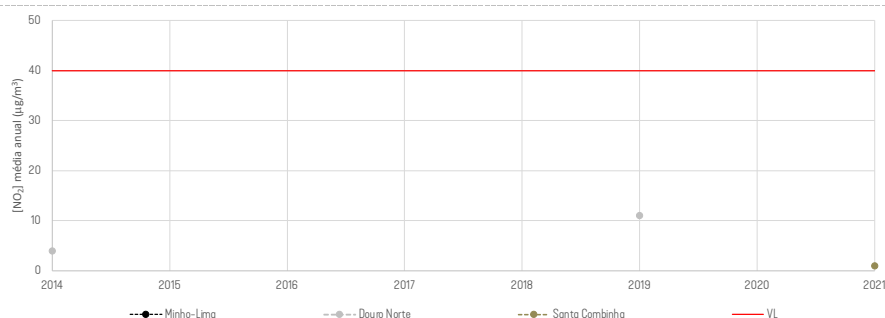
O gráfico superior (a), que inclui as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite a análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando níveis sistematicamente reduzidos de NO_2 ao longo de todo o período em análise, característicos de ambientes rurais afastados de fontes emissoras significativas.

O gráfico inferior (b), que considera exclusivamente as estações com eficiência horária $\geq 85\%$ e que é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, confirma que, nos anos estatisticamente válidos, as concentrações médias anuais de NO_2 nas estações rurais de fundo se mantêm sempre muito abaixo do valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, não se observando qualquer situação de incumprimento do critério legal.

À semelhança do observado nas restantes tipologias de estação, nos anos de 2020 e 2021 a reduzida eficiência de recolha de dados, associada às condicionantes operacionais do período pandémico, limita a robustez estatística da informação disponível.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.



(b) considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

Figura 12: Variação da concentração média anual de dióxido de azoto (NO_2), base horária, nas estações rurais de fundo, no período de 2014 a 2021.

Análise

A concentração de NO_2 no ar ambiente depende da quantidade emitida diretamente pelas fontes de emissão (NO_2 primário), dos processos químicos de formação na atmosfera (NO_2 secundário) e dos mecanismos de remoção, nomeadamente por transformação química ou por deposição seca e húmida. Depende ainda do transporte horizontal das massas de ar, à escala local e regional, condicionado pela ação de ciclones e anticiclones, pela topografia e pelas descontinuidades de superfície, em particular a interface terra/mar, bem como da mistura vertical dos poluentes, fortemente influenciada pela estabilidade da atmosfera, que é determinada pelo perfil vertical de temperatura.

A queima de combustíveis fósseis a elevadas temperaturas constitui a principal fonte de emissão de óxidos de azoto ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$). O monóxido de azoto (NO), apesar de não ter valores-limite regulamentados no ar ambiente, desempenha um papel fundamental como precursor do dióxido de azoto (NO_2) e do ozono (O_3) troposférico.

A fração de NO_2 emitida diretamente (NO_2 primário) resultante da combustão de combustíveis fósseis depende do tipo de processo de combustão, sendo, no entanto, usualmente da ordem dos 5 a 10% do total de NO_x emitido. Verificam-se algumas exceções, nomeadamente em determinados veículos automóveis, especialmente a gasólea, para os quais esta fração pode atingir valores da ordem dos 40 a 50%.

Nas áreas urbanas a principal fonte de emissão de NO_2 é o tráfego rodoviário, sendo que as concentrações deste poluente apresentam, habitualmente, uma variação similar à curva típica de tráfego, com um pico no início da manhã e um pico no final da tarde. A concentração mais elevada no pico do final da tarde está normalmente associada à maior estabilidade atmosférica junto à superfície e consequente menor dispersão vertical. Observa-se também um ciclo do dia da semana, pois o tráfego rodoviário nas zonas urbanas diminui nos dias de fim-de-semana, principalmente no domingo.

Nas estações urbanas da RMQAR-N, as concentrações de NO_2 apresentam este comportamento típico. Por sua vez, nas estações de fundo, as concentrações de NO_2 registadas são muito reduzidas e não evidenciam uma variação relevante ao longo do dia nem por dia da semana.

A estabilidade atmosférica na camada limite é fortemente condicionada pela intensidade da radiação solar, observando-se quer um ciclo horário (diurno-noturno), quer um ciclo sazonal. Relativamente ao ciclo sazonal, no verão observa-se, tipicamente, durante o período diurno, um forte gradiente de decréscimo da temperatura com a altitude, o que conduz a uma elevada instabilidade atmosférica e a uma mistura vertical intensa, que pode atingir altitudes superiores a um quilómetro. Durante o período noturno, verifica-se frequentemente a formação de uma inversão térmica (aumento da temperatura com a altitude), originando uma forte estabilidade atmosférica, com a mistura vertical limitada a poucas centenas de metros. No inverno, devido à menor intensidade da radiação solar, tanto o gradiente térmico diurno como a inversão térmica noturna apresentam, em geral, menor intensidade, resultando em condições de instabilidade e estabilidade atmosférica menos intensas.

Nas estações urbanas de tráfego a variação mensal da concentração de NO_2 é evidente. As concentrações de NO_2 são mais elevadas no período de inverno (outubro a março), em resultado da maior estabilidade atmosférica junto à superfície, associada à menor intensidade da radiação solar, e da consequente menor dispersão. A concentração média de NO_2 do mês de julho é aproximadamente metade da concentração média observada nos meses de inverno. Nas estações urbanas e suburbanas de fundo, embora se identifique igualmente uma variação anual, esta é menos intensa.

Relativamente ao cumprimento regulamentar do valor limite anual de proteção da saúde humana ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), por estação, no período de 2014 a 2021, observaram-se situações de incumprimento nas estações Francisco de Sá Carneiro – Campanha e Frei Bartolomeu Mártires – S. Vitor. No ano de 2018, também se verificou incumprimento na estação Cónego Dr. Manuel Faria – Azurém. Nos anos de 2020 e 2021 a recolha de dados foi muito reduzida não permitindo uma análise com robustez estatística.

As estações rurais de fundo (Minho – Lima; Douro Norte) apresentaram uma eficiência de recolha de dados muito reduzida no período de 2014 a 2021; no entanto, os dados recolhidos evidenciam valores de concentração de NO_2 reduzidos, da ordem dos $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tanto

na estação da Zona Norte Litoral como nas estações da Zona Norte Interior. As estações urbanas e suburbanas de fundo também apresentaram, em vários anos, uma eficiência de recolha de dados muito reduzida, ainda assim, os dados recolhidos apresentam valores reduzidos de concentração de NO_2 significativamente inferiores ao valor limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo da ordem dos $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Relativamente ao cumprimento regulamentar do valor limite horário de proteção da saúde humana ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a não ultrapassar mais do que 18 vezes por ano civil), por estação, no período de 2014 a 2021 não se observaram situações em que tivesse sido excedido o número máximo admissível de ultrapassagens. Foram, no entanto, observadas ultrapassagens pontuais em vários anos nas estações de tráfego (Francisco Sá Carneiro – Campanha; João Gomes Laranjo – S. Hora; Frei Bartolomeu Mártires – S. Vitor; Padre Moreira Neves – Castelões de Cepeda) e ainda nas estações de Anta – Espinho, no ano de 2018 e 2019, e Paços de Ferreira, no ano de 2015, sem que, contudo, tenha sido ultrapassado o critério regulamentar anual.

PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO (PM₁₀)

O Decreto-Lei n.º 102/2010 fixa os valores limite das concentrações de partículas em suspensão com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm (PM₁₀) no ar ambiente para proteção da saúde humana (Tabela 8).

Tabela 8: Valores-limite para a proteção da saúde humana relativos às partículas em suspensão (PM₁₀) no ar ambiente, estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Indicador	Período de referência	Valor	Observações
Valor limite diário	Um dia	35 µg/m³	A não exceder mais de 35 vezes por ano civil
Valor limite anual	Ano civil	40 µg/m³	Média anual

Nota: Os valores-limite aplicam-se às concentrações medidas no ar ambiente, avaliadas de acordo com os métodos de referência e os critérios de qualidade de dados definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Dados globais

Na Figura 13 é apresentada a eficiência diária na recolha de dados de PM₁₀ na RMQAR-N, no período de 2014 a 2021. Verifica-se que a rede apresentou, de forma geral, uma eficiência reduzida na recolha de dados deste poluente, com particular destaque para os anos de 2020 e 2021, fortemente condicionados pela pandemia de COVID-19. Em 2021, 15 das 22 estações, apresentaram uma eficiência inferior a 14%, correspondendo ao valor mínimo considerado para efeitos de análise indicativa.

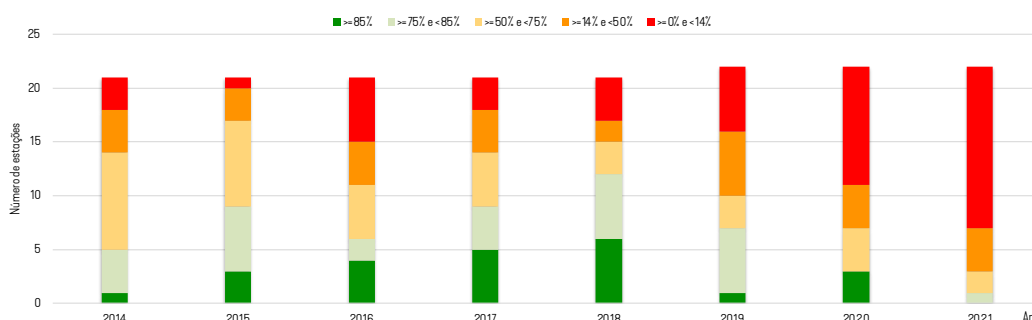


Figura 13: Eficiência diária na recolha de dados de partículas em suspensão com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm (PM₁₀) na RMQAR-N, em percentagem, no período de 2014 a 2021.

Na Tabela 9 é apresentada a eficiência na recolha de dados de PM₁₀ por estação, no período de 2014 a 2021. Para várias destas estações observa-se uma eficiência reduzida em diversos anos, o que limita a realização de uma análise robusta das tendências evolutivas das concentrações de PM₁₀ nessas estações.

Na

Tabela 10 é apresentada a concentração média anual (base diária) de PM₁₀ e, na Tabela 11, são apresentadas as excedências ao valor-limite diário de 50 µg/m³, por estação, no período de 2014 a 2021.

A avaliação da conformidade legal é efetuada exclusivamente para os anos em que a eficiência diária de recolha de dados é igual ou superior a 85%. Nos anos estatisticamente válidos, as concentrações médias anuais de PM₁₀ cumprem com os valor-limite.

Tabela 9: Eficiência diária na recolha de dados de PM₁₀, em percentagem, por estação, no período de 2014 a 2021.

Agglomeração/Zona	Tipo	Estação	Eficiência diária na recolha de dados de PM ₁₀ (%), por ano							
			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Agglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	68	51	71	69	80	28	5	0
		Custóias - Matosinhos	63	73	11	0	0	0	0	0
		Leca do Balio-Matosinhos	22	62	90	90	16	76	45	72
		Mindelo - Vila do Conde	81	85	91	42	54	14	4	12
		VNTelha - Maia	7	93	85	79	88	52	54	31
	Urb. Fundo	Avintes	73	52	0	55	81	12	42	0
		Ermesinde - Valongo	55	52	55	27	68	1	0	0
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	57	68	0	0	0	0	0	0
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	78	83	58	64	7	0	0	0
		Francisco Sá Carneiro - Campanhã	51	64	38	32	73	25	0	0
		João Gomes Laranjo - S. Hora	45	35	68	76	75	81	88	46
	Suburb. Industrial	Meco - Perafita	69	78	79	85	87	34	42	12
Agglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Seara - Matosinhos	0	66	37	93	76	84	71	0
		Burgães - Santo Tirso	81	76	0	69	79	37	10	0
	Suburb. Fundo	Paços de Ferreira	72	92	84	81	91	68	73	0
		Frossos - Braga	90	81	30	86	78	51	0	0
	Urb. Tráfego	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	23	0	0	70	90	83	91	57
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	48	82	89	84	18	0	0	0
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	56	84	73	99	93	97	61	22
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	0	14	9	0	10	42	0	0
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	79	26	21	43	95	84	90	46
		Santa Combinha	---	---	---	---	---	76	26	81

Nota: A cor das células corresponde à eficiência horária na recolha de dados: ■ >=85% ■ >=75% e <85% ■ >=50% e <75% ■ >=14% e <50% ■ >=0% e <14%

 Tabela 10: Concentração média anual de PM₁₀, por estação, no período de 2014 a 2021.

Agglomeração/Zona	Tipo	Estação	Concentração média anual (base diária) de PM ₁₀ (µg/m³), por ano							
			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Agglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	29	17	13	10	12	20	23	---
		Custóias - Matosinhos	15	18	14	---	---	---	---	---
		Leca do Balio-Matosinhos	16	20	19	14	19	17	20	17
		Mindelo - Vila do Conde	19	17	15	15	13	25	20	22
		VNTelha - Maia	11	16	15	17	17	19	17	16
	Urb. Fundo	Avintes	13	11	---	15	19	24	18	---
		Ermesinde - Valongo	22	15	22	20	18	23	---	---
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	18	18	---	---	---	---	---	---
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	15	16	12	14	18	---	---	---
		Francisco Sá Carneiro - Campanhã	18	18	16	18	19	21	---	---
		João Gomes Laranjo - S. Hora	21	21	20	21	18	16	16	15
	Suburb. Industrial	Meco - Perafita	24	22	16	19	18	20	23	31
Agglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Seara - Matosinhos	---	19	19	21	21	17	13	---
		Burgães - Santo Tirso	10	19	---	15	18	23	20	---
	Suburb. Fundo	Paços de Ferreira	11	22	24	23	22	18	21	---
		Frossos - Braga	14	14	18	9	10	10	---	---
	Urb. Tráfego	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	7	---	---	20	19	16	16	15
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	12	17	17	15	19	---	---	---
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	13	20	11	11	10	9	7	21
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	---	15	10	---	10	12	---	---
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	16	18	6	9	9	8	9	13
		Santa Combinha	---	---	---	---	---	9	10	10

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses dados considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores-limite definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes dados podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva de tendências temporais quando a eficiência é igual ou superior a 14%. As células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

Tabela 11: Excedências ao valor limite diário de 50 µg/m³ de concentração média diária PM₁₀, por estação, no período de 2014 a 2021.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Excedências por ano							
			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	19	3	4	2	0	4	0	0
		Custóias - Matosinhos	1	2	0	0	0	0	0	0
		Leça do Balio-Matosinhos	0	2	7	0	1	5	0	0
		Mindelo - Vila do Conde	10	4	2	0	0	5	0	2
		VNTelha - Maia	0	4	3	1	2	0	0	0
	Urb. Fundo	Avintes	0	1	0	0	7	0	0	0
		Ermesinde - Valongo	8	2	6	1	3	0	0	0
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	6	6	0	0	0	0	0	0
	Urb. Tráfego	D. Manuel II - Vermoim	10	4	2	0	0	0	0	0
		Francisco Sá Carneiro - Campanhã	0	2	1	1	4	0	0	0
		João Gomes Laranjo - S. Hora	2	0	3	3	2	0	2	0
	Suburb. Industrial	Meco - Perafita	12	8	0	1	0	0	0	6
	Urb. Industrial	Seara - Matosinhos	0	0	0	4	5	4	2	0
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgões - Santo Tirso	0	7	0	1	1	4	0	0
		Paços de Ferreira	0	5	8	3	6	0	0	0
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	1	2	0	0	0	1	0	0
	Urb. Tráfego	Cónego Dr. Manuel Faria - Azurém	0	0	0	0	0	0	0	0
		Frei Bartolomeu Mártires - S. Vitor	1	0	0	0	0	0	0	0
		Padre Moreira Neves - Castelões de Cepeda	0	7	1	0	0	0	0	0
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	0	1	0	0	0	0	0	0
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	0	1	0	0	2	0	0	4
		Santa Combinha	---	---	---	---	---	0	0	3

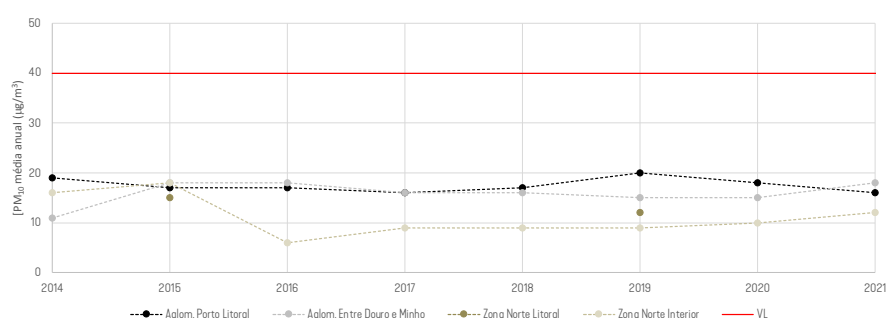
Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses dados considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores-limite definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes dados podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva de tendências temporais quando a eficiência é igual ou superior a 14%. As células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

Na Figura 14 é apresentada a tendência evolutiva das concentrações médias anuais (base diária) de PM₁₀ agregadas por aglomeração e zona, no período de 2014 a 2021.

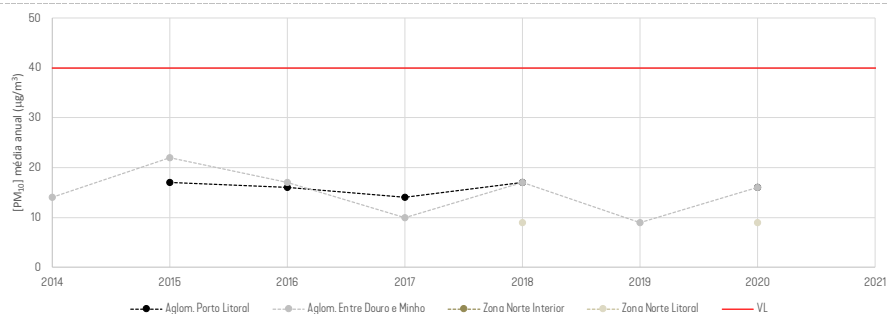
O gráfico superior (a) apresenta a evolução considerando, para o cálculo da média, as estações com eficiência diária de recolha de dados igual ou superior a 14%, sendo utilizado para a análise descritiva das tendências temporais. As médias apresentadas correspondem a médias aritméticas simples das concentrações médias anuais das estações incluídas.

O gráfico inferior (b) apresenta a evolução das concentrações médias anuais de PM₁₀ considerando exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados igual ou superior a 85%, sendo este o único a utilizar para efeitos de avaliação da conformidade legal com o valor-limite anual de 40 µg/m³.

Considerando as concentrações médias agregadas por aglomeração ou zona, verifica-se o cumprimento do valor-limite anual de proteção da saúde humana de 40 µg/m³ em todos os anos estatisticamente válidos do período analisado.



(a) Considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$.



(b) Considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 85\%$.

Figura 14: Variação da concentração média anual (base diária) de partículas em suspensão (PM_{10}), por aglomeração e zona, no período de 2014 a 2021.

Os perfis temporais apresentados na Figura 15 a Figura 18 (horário, por dia da semana e mensal) foram construídos com base nas estações com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 14% e também considerando exclusivamente as estações com eficiência $\geq 85\%$, com o objetivo de demonstrar a consistência e a robustez dos padrões temporais observados. Estes perfis destinam-se exclusivamente à caracterização do comportamento temporal típico de partículas em suspensão (PM_{10}), não se destinando à avaliação da conformidade legal.

Perfil horário

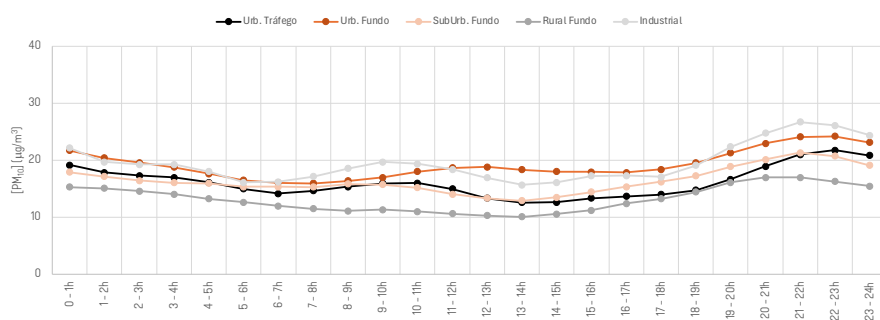
Por tipo de estação

Na Figura 15 é apresentado o perfil horário da concentração média de partículas em suspensão (PM_{10}), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.

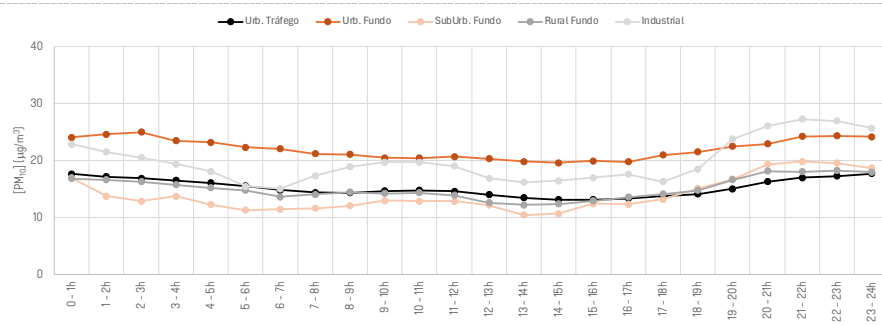
O gráfico superior (a) apresenta o perfil considerando as estações com eficiência diária de recolha de dados igual ou superior a 14%, sendo utilizado para a caracterização descritiva do comportamento horário.

O gráfico inferior (b) apresenta o perfil considerando exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados igual ou superior a 85%, garantindo maior robustez estatística dos resultados.

A variação horária da concentração de PM_{10} apresenta um pico no início da manhã e um pico no final da tarde, embora menos acentuados do que os observados para o dióxido de azoto (NO_2). A concentração mais elevada no final da tarde está associada à maior estabilidade atmosférica junto à superfície e à consequente menor dispersão, podendo ainda estar parcialmente relacionada ao aumento das emissões relacionadas com o aquecimento doméstico.



(a) Considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$.



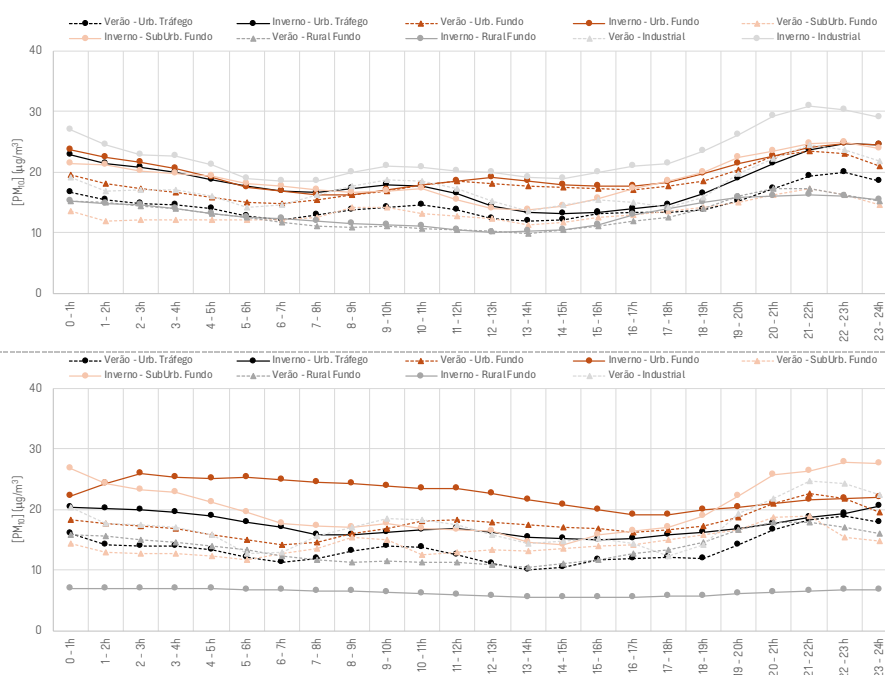
(b) Considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 85\%$.

Figura 15: Perfil horário da concentração média de partículas em suspensão (PM_{10}), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.

Comparação verão-inverno

Na Figura 16 é apresentado o perfil horário da concentração média de partículas em suspensão (PM_{10}) da Região Norte, por estação do ano, no período de 2014 a 2021.

A concentração de PM_{10} é mais elevada no período de inverno (outubro a março) devido à maior estabilidade atmosférica junto à superfície, resultante de uma menor intensidade da radiação solar, e à consequente menor dispersão, podendo ainda estar parcialmente relacionada ao aumento das emissões relacionadas com o aquecimento doméstico.



(a) Considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$.

(b) Considerando para o cálculo da média exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 85\%$.

Figura 16: Perfil horário da concentração média de partículas em suspensão (PM_{10}) da Região Norte, por estação do ano, no período de 2014 a 2021. Verão - intervalo de 1 de abril a 30 de setembro; inverno - intervalo de 1 de outubro a 31 de março.

Perfil dia da semana

Na Figura 17 é apresentado o perfil por dia da semana da concentração média diária de partículas em suspensão (PM_{10}), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.

De forma geral, a variação da concentração média diária de PM_{10} ao longo dos dias da semana não evidencia um padrão semanal marcado, ao contrário do que se observa tipicamente para poluentes diretamente associados ao tráfego rodoviário, como o dióxido de azoto (NO_2).

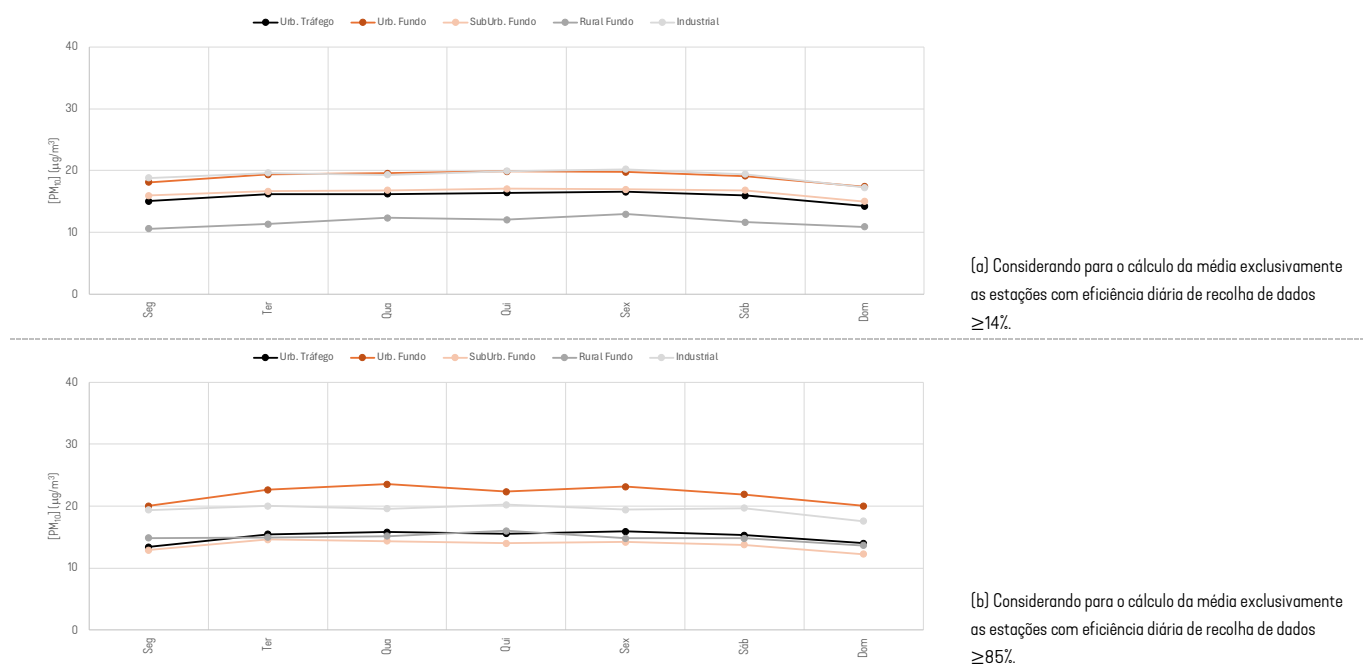
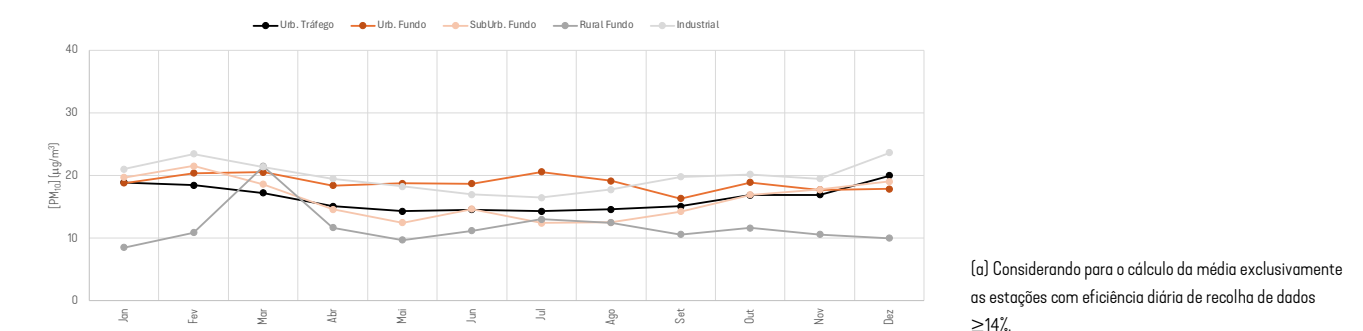


Figura 17: Perfil por dia da semana da concentração média diária de partículas em suspensão (PM_{10}), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.

Perfil mensal

Na Figura 18 é apresentado o perfil mensal da concentração média de partículas em suspensão (PM_{10}), da Região Norte, no período de 2014 a 2021.

A concentração de PM_{10} é, de forma geral, mais elevada no período de inverno (outubro a março), em resultado da maior estabilidade atmosférica junto à superfície, associada à menor intensidade da radiação solar, e da consequente menor dispersão. No entanto, a variabilidade sazonal observada é menos pronunciada do que a verificada para o dióxido de azoto (NO_2).



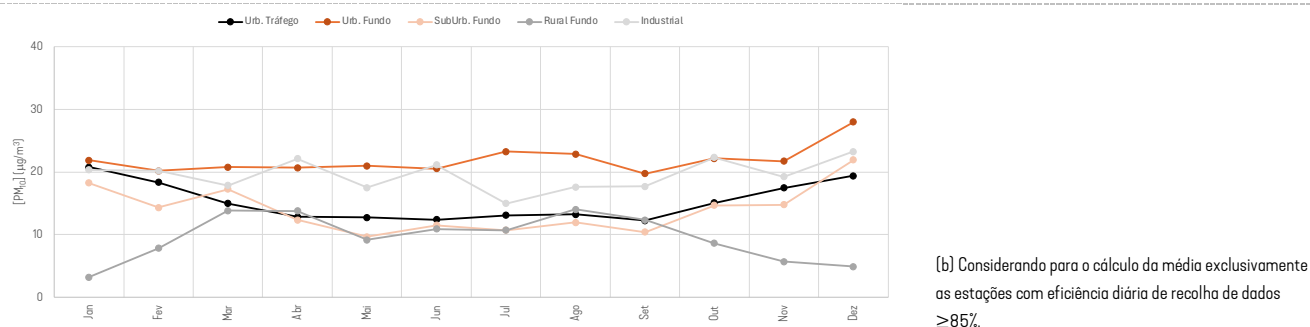


Figura 18: Perfil mensal da concentração média de partículas em suspensão (PM_{10}), da Região Norte, no período de 2014 a 2021.

Estações urbanas de tráfego

Na Figura 19 é apresentada a variação da concentração média anual (base diária) de partículas em suspensão (PM_{10}), nas estações urbanas de tráfego das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

O gráfico superior (a), que inclui os anos com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite a análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando uma variabilidade interanual associada quer às condições meteorológicas, quer à intensidade das fontes emissoras locais, nomeadamente o tráfego rodoviário e os fenómenos de ressuspensão de partículas.

O gráfico inferior (b), que considera exclusivamente os anos com eficiência diária $\geq 85\%$ e que é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, mostra que, nos anos estatisticamente válidos, as concentrações médias anuais de PM_{10} nas estações urbanas de tráfego se mantêm inferiores ao valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, não se observando situações de incumprimento deste critério legal.

A reduzida eficiência de recolha de dados limita a robustez estatística da avaliação formal da conformidade legal.

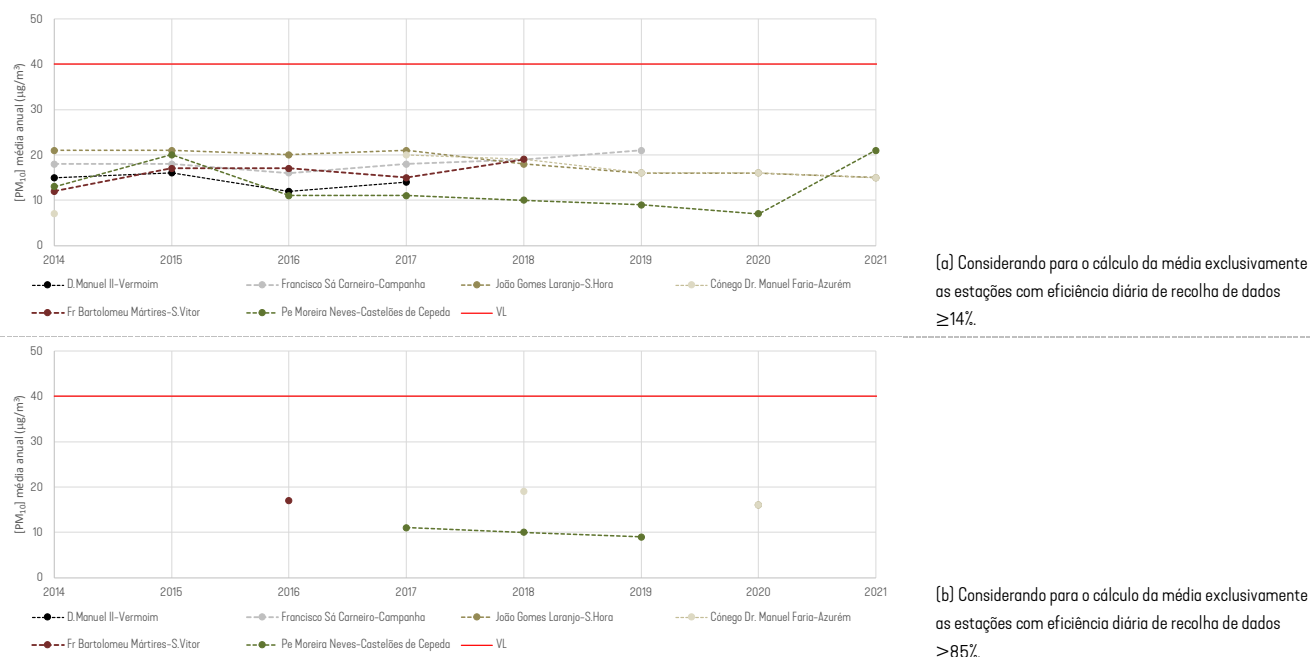


Figura 19: Variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações urbanas de tráfego das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

Estações urbanas de fundo

Na Figura 20 é apresentada a variação da concentração média anual (base diária) de partículas em suspensão (PM_{10}), nas estações urbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

O gráfico superior (a), que integra os anos com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite uma análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando valores globalmente moderados e uma variabilidade interanual predominantemente condicionada por fatores meteorológicos.

O gráfico inferior (b), que considera exclusivamente os anos com eficiência diária de recolha de dados $\geq 85\%$ e que é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, apresenta apenas um número muito reduzido de anos estatisticamente válidos (dois anos), o que limita significativamente a robustez da análise. Ainda assim, nos anos disponíveis, as concentrações médias anuais de PM_{10} mantêm-se abaixo do valor-limite anual de $40 \mu g/m^3$, não se observando situações de incumprimento do critério legal.

A reduzida eficiência de recolha de dados limita a robustez estatística da avaliação formal da conformidade legal.

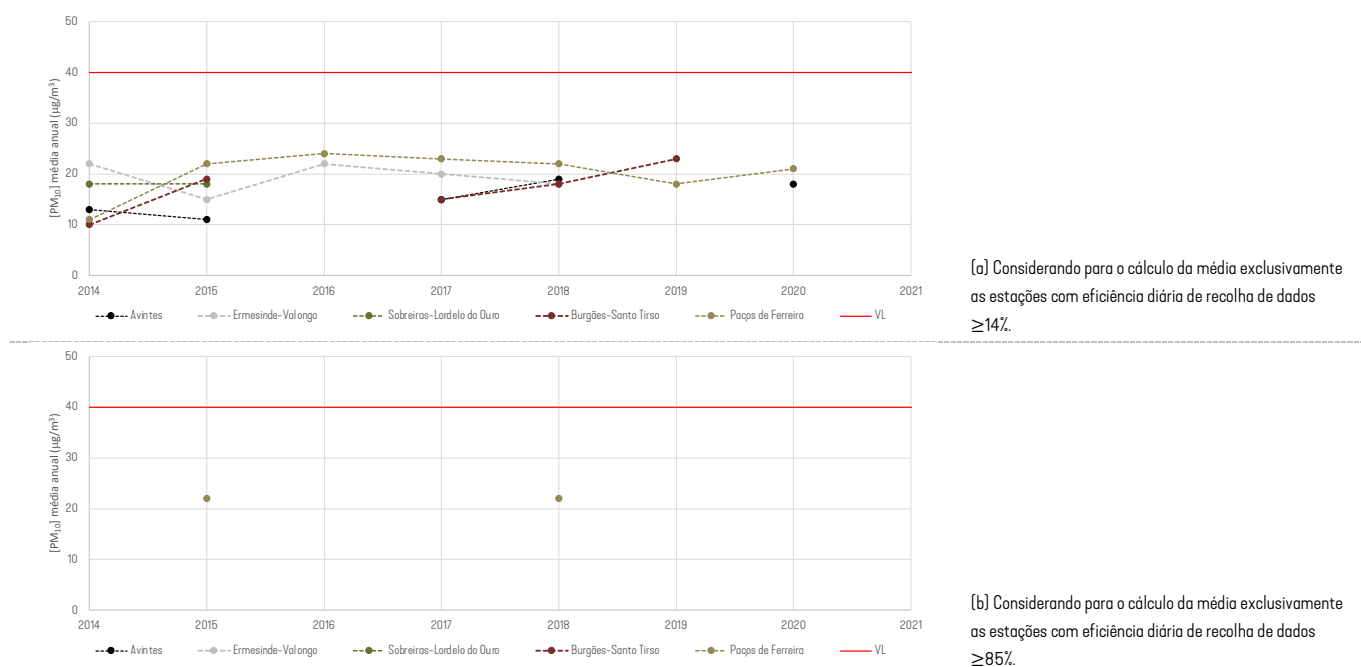


Figura 20: Variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações urbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

Estações suburbanas de fundo

Na Figura 21 é apresentada a variação da concentração média anual (base diária) de PM_{10} , nas estações suburbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

O gráfico superior (a), que integra as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite uma análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando valores globalmente moderados e uma variabilidade interanual predominantemente condicionada por fatores meteorológicos.

O gráfico inferior (b), que considera exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 85\%$ e que é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, apresenta um número reduzido de anos estatisticamente válidos, o que limita a robustez da análise. Ainda assim, nos anos disponíveis, as concentrações médias anuais de PM_{10} mantêm-se abaixo do valor-limite anual de $40 \mu g/m^3$, não se observando situações de incumprimento do critério legal.

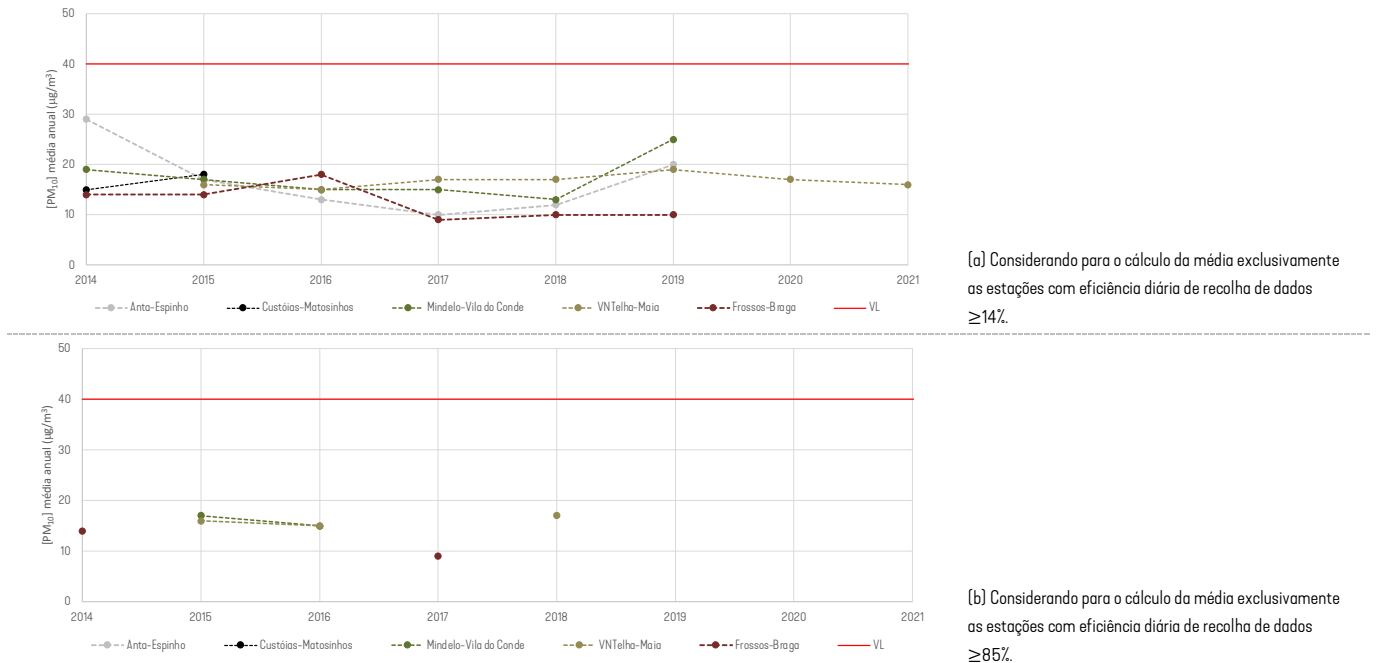


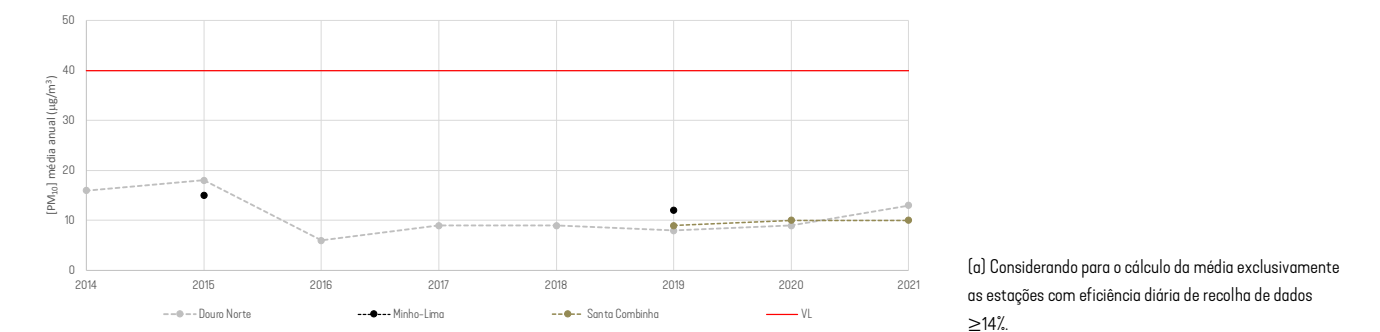
Figura 21: Variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações suburbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

Estações rurais de fundo

Na Figura 22 é apresentada a variação da concentração média anual (base diária) de partículas em suspensão (PM_{10}), nas estações rurais de fundo, no período de 2014 a 2021.

O gráfico superior (a), considerando as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 14\%$, evidencia valores globalmente baixos ao longo de todo o período em análise, característicos de ambientes afastados de fontes emissoras significativas.

O gráfico inferior (b), que considera exclusivamente as estações com eficiência diária de recolha de dados $\geq 85\%$ e é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, apresenta um número muito reduzido de anos estatisticamente válidos (dois), o que limita a robustez da análise. Ainda assim, nos anos disponíveis, as concentrações médias anuais de PM_{10} mantêm-se claramente abaixo do valor-limite anual de $40 \mu g/m^3$, não se observando situações de incumprimento do critério legal.



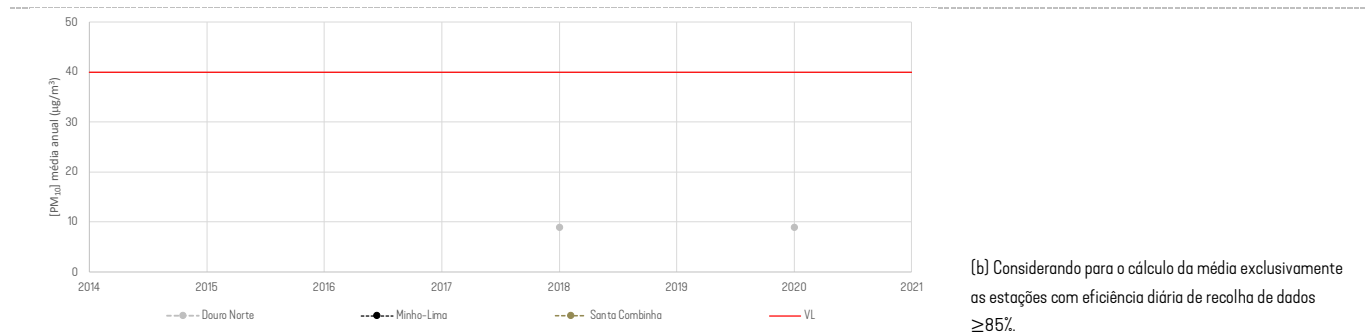


Figura 22: Variação da concentração média anual de partículas em suspensão (PM_{10}), base diária, nas estações rurais de fundo, no período de 2014 a 2021.

Análise

A concentração de partículas em suspensão (PM_{10}) no ar ambiente depende da quantidade emitida diretamente pelas fontes de emissão (PM_{10} primário), dos processos químicos de formação na atmosfera (PM_{10} secundário) e dos mecanismos de remoção, nomeadamente por transformação química ou por deposição seca e húmida. As reações químicas de formação têm como precursores poluentes como os óxidos de azoto (NO_x), o dióxido de enxofre (SO_2) e os compostos orgânicos voláteis (COV), que podem originar, respetivamente, nitratos (NO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}) e aerossóis orgânicos secundários.

A concentração de PM_{10} no ar ambiente depende ainda do transporte horizontal das massas de ar, à escala local, regional e transcontinental, condicionado pela ação de ciclones e anticiclones, pela topografia e pelas descontinuidades de superfície, em particular a interface terra/mar, bem como da mistura vertical dos poluentes, fortemente influenciada pela estabilidade da atmosfera, que é determinada pelo perfil vertical de temperatura.

Existem diversas fontes de PM_{10} , quer naturais, quer antropogénicas. Das fontes antropogénicas realça-se o tráfego rodoviário (que inclui emissões diretas do escape dos veículos, emissões provenientes dos processos de abrasão — desgaste de pneus, travões e da superfície da estrada — e da ressuspensão de poeiras nas rodovias), os processos industriais (quer pela queima de combustíveis fósseis, quer por emissões difusas associadas ao processo ou ao armazenamento e gestão de matérias-primas ou de produto acabado), a queima de biomassa para aquecimento doméstico, as obras de construção civil, a exploração de massas minerais e a atividade agrícola (quer diretamente, quer através da emissão de substâncias precursoras, como o amoníaco, NH_3 , que originará partículas de amónio, NH_4^+).

Das fontes naturais destacam-se as partículas emitidas por fogos florestais ou as resultantes da ação do vento sobre o solo e superfícies aquáticas. Salienta-se ainda a relevância das partículas provenientes das áreas desérticas (nomeadamente do deserto do Saara) e das emissões ocasionais associadas a erupções vulcânicas.

Devido à grande diversidade de fontes e aos múltiplos processos de formação, a composição das partículas em suspensão no ar ambiente é muito variável. A fração mais grosseira das PM_{10} contém elementos abundantes da crosta terrestre e sais marinhos, tais como alumínio, cálcio, ferro, potássio e sílica, bem como elementos resultantes de emissões antropogénicas, tais como arsénio, cádmio, chumbo e benzo[a]pireno.

A fração fina das PM_{10} é sobretudo constituída por sulfatos (SO_4^{2-}), sódio (Na^+), amónio (NH_4^+), nitratos (NO_3^-), cálcio (Ca^{2+}), potássio (K^+), cloreto (Cl^-), carbono orgânico, carbono elementar e magnésio (Mg^{2+}), provenientes da formação química, da queima de combustíveis fósseis e de processos industriais.

Nas áreas urbanas, os transportes rodoviários são uma das principais fontes emissoras de PM_{10} , observando-se as maiores concentrações na proximidade de vias com tráfego intenso. Estas partículas resultam não só das emissões diretas do escape dos veículos, mas também dos processos de abrasão (desgaste de pneus, travões e da superfície da estrada) e da ressuspensão de poeiras nas estradas. Em geral, os veículos a gasóleo emitem uma quantidade superior de partículas finas, por veículo, quando comparados com

os veículos a gasolina. A queima de biomassa para aquecimento doméstico assume igualmente um peso significativo nas emissões durante o período de inverno, sobretudo no final da tarde e início da noite.

Nas áreas urbanas, a curva típica de tráfego rodoviário apresenta um pico no início da manhã e um pico no final da tarde. Nas estações da RMQAR-N, a variação da concentração de PM_{10} evidencia igualmente um pico no início da manhã e um pico no final da tarde, embora este último seja, em geral, menos acentuado do que no caso do dióxido de azoto (NO_2). A concentração mais elevada no pico do final da tarde está associada à maior estabilidade atmosférica junto à superfície e à consequente menor dispersão, estando também potencialmente relacionada com as emissões resultantes do aquecimento doméstico.

Embora o tráfego rodoviário apresente um ciclo do dia da semana nas zonas urbanas, diminuindo nos dias de fim de semana, principalmente ao domingo, nas estações urbanas da RMQAR-N as concentrações de PM_{10} não evidenciam uma variação significativa em função do dia da semana.

Tal como referido, a estabilidade atmosférica na camada limite é fortemente condicionada pela intensidade da radiação solar, observando-se quer um ciclo horário (diurno-noturno), quer um ciclo sazonal. Relativamente ao ciclo sazonal, no verão observa-se, tipicamente, durante o período diurno, um forte gradiente de decréscimo da temperatura com a altitude, o que conduz a uma elevada instabilidade atmosférica e a uma mistura vertical intensa, que pode atingir altitudes superiores a um quilómetro. Durante o período noturno, verifica-se frequentemente a formação de uma inversão térmica (aumento da temperatura com a altitude), originando uma forte estabilidade atmosférica, com a mistura vertical limitada a poucas centenas de metros. No inverno, devido à menor intensidade da radiação solar, tanto o gradiente térmico diurno como a inversão térmica noturna apresentam, em geral, menor intensidade, resultando em condições de instabilidade e estabilidade atmosférica menos intensas.

Nas estações da RMQAR-N, para o período em análise, a concentração de PM_{10} é, de forma geral, mais elevada no período de inverno (outubro a março); no entanto, a diferença é menos significativa do que a observada para o NO_2 .

Relativamente ao cumprimento regulamentar do valor-limite anual de proteção da saúde humana ($40 \mu g/m^3$), por estação, no período de 2014 a 2021, observou-se o cumprimento em todas as estações da RMQAR-N, nos anos estatisticamente válidos.

Relativamente ao cumprimento regulamentar do valor-limite diário de proteção da saúde humana ($50 \mu g/m^3$, a não ultrapassar mais do que 35 vezes por ano civil), por estação, no período de 2014 a 2021, não se observaram em nenhuma estação mais do que 35 ultrapassagens do referido valor-limite. Foram, no entanto, observadas ultrapassagens em pelo menos um ano em todas as estações da RMQAR-N.

Salienta-se, contudo, que a eficiência de recolha de dados foi globalmente reduzida (apenas cerca de 13% das estações/ano apresentaram uma eficiência superior a 85%), o que limita significativamente a robustez estatística da avaliação da conformidade legal.

OZONO (O₃)

O Decreto-Lei n.º 102/2010 fixa o objetivo a longo prazo, o valor-alvo e os limiares de informação e de alerta para as concentrações de ozono(O₃) no ar ambiente, para proteção da saúde humana (Tabela 12).

Tabela 12: Objetivo a longo prazo, valor-alvo e limiares de informação e de alerta para o ozono (O₃) no ar ambiente, estabelecidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Indicador	Período de referência	Valor	Observações
Objetivo a longo prazo	Valor máximo diário das médias octo-horárias, calculadas por períodos consecutivos de oito horas, num ano civil.	120 µg/m ³	-
Valor-alvo	Valor máximo diário das médias octo-horárias, calculadas por períodos consecutivos de oito horas, num ano civil.	120 µg/m ³	A não exceder mais de 25 vezes em média, por ano civil, num período de três anos
Limiar de informação	Uma hora	180 µg/m ³	-
Limiar de alerta	Uma hora	240 µg/m ³	-

Nota: Os valores-limite aplicam-se às concentrações medidas no ar ambiente, avaliadas de acordo com os métodos de referência e os critérios de qualidade de dados definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010.

Dados globais

Na Figura 23 é apresentada a eficiência horária na recolha de dados de ozono (O₃) na RMQAR-N no período de 2014 a 2021. Verifica-se que a rede apresentou, de forma geral, uma eficiência reduzida na recolha de dados deste poluente. Em particular, no ano de 2021, apenas uma estação obteve uma eficiência horária de recolha de dados superior a 85%, limitando significativamente a robustez estatística da avaliação.

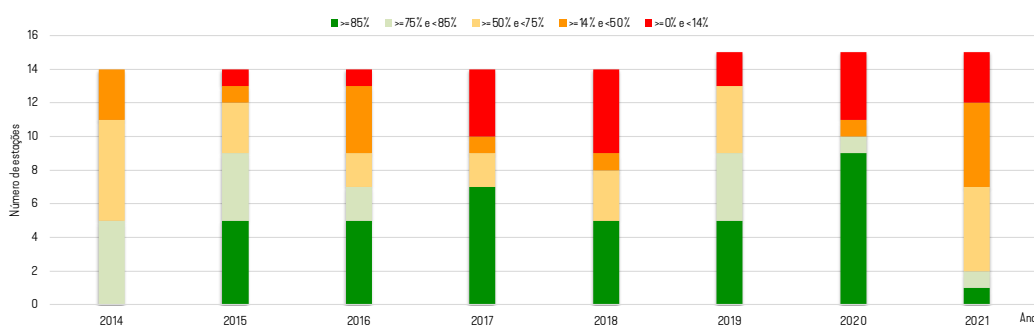


Figura 23: Eficiência horária na recolha de dados de ozono (O₃) na RMQAR-N, no período de 2014 a 2021.

Na Tabela 13 é apresentada a eficiência na recolha horária de dados de O₃ por estação, no período de 2014 a 2021. Para várias destas estações observa-se uma eficiência reduzida em diversos anos o que limita uma análise robusta das tendências evolutivas das concentrações de O₃ nessas estações.

Na Tabela 14 é apresentada a concentração média anual de O₃, base horária, por estação, no período de 2014 a 2021.

Tabela 13: Eficiência horária na recolha de dados de ozono (O₃), em percentagem, por estação, no período de 2014 a 2021.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Eficiência horária na recolha de dados de O ₃ (%), por ano.							
			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	81	53	97	98	95	98	0	0
		Custóias - Matosinhos	74	84	27	0	0	0	0	0
		Leca do Balio-Matosinhos	23	74	98	94	97	98	32	82
		Mindelo - Vila do Conde	72	90	0	0	0	98	98	21
		VNTelha - Maia	26	82	99	87	7	61	100	43
	Urb. Fundo	Avintes	81	87	56	91	99	79	75	39
		Ermesinde - Valongo	55	65	93	14	0	78	0	17
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	55	83	76	92	66	82	100	73
	Suburb. Industrial	Meco - Perafita	70	85	69	0	0	0	0	0
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	79	75	87	94	91	89	98	53
		Paços de Ferreira	53	99	47	94	70	63	99	23
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	80	95	75	60	25	78	100	72
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	30	12	18	0	59	59	88	56
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	82	27	25	54	98	90	97	66
		Santa Combinha	---	---	---	---	---	63	89	100

Nota: A cor das células corresponde à eficiência horária na recolha de dados: ■ >=85% ■ >=75% e <85% ■ >=50% e <75% ■ >=14% e <50% ■ >=0% e <14%

Tabela 14: Concentração média anual de ozono (O₃), base horária, por estação, no período de 2014 a 2021.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Concentração média anual de O ₃ (µg/m³), base horária, por ano.							
			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	49	46	40	42	49	46	---	---
		Custóias - Matosinhos	45	45	51	---	---	---	---	---
		Leca do Balio-Matosinhos	28	26	40	43	47	30	34	32
		Mindelo - Vila do Conde	36	40	---	---	---	29	48	33
		VNTelha - Maia	57	47	45	48	39	52	47	38
	Urb. Fundo	Avintes	37	36	29	31	40	39	52	51
		Ermesinde - Valongo	37	44	44	37	---	46	---	70
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	45	40	46	40	45	42	51	49
	Suburb. Industrial	Meco - Perafita	50	49	55	---	---	---	---	---
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	41	39	31	36	41	30	38	34
		Paços de Ferreira	29	30	25	30	36	49	49	42
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	44	45	39	17	32	27	20	29
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	57	54	53	---	57	57	45	57
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	74	75	80	75	78	82	78	45
		Santa Combinha	---	---	---	---	---	72	67	69

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85% e as células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

O Decreto-Lei n.º 102/2010 estabelece para o ozono (O₃) um objetivo a longo prazo (OLP) de 120 µg/m³, correspondente ao máximo diário da média móvel de 8 horas, a atingir a longo prazo. Define ainda um valor-alvo, igualmente de 120 µg/m³, a não exceder mais do que 25 dias por ano, em média, num período de três anos. Na Tabela 15 apresentam-se as excedências ao Objetivo de Longo Prazo (OLP) (120 µg/m³) e, na Tabela 16, a concentração de O₃ correspondente ao 26.º máximo diário da média móvel de 8h, por estação, no período de 2014 a 2021.

No período em análise observaram-se várias excedências ao OLP em diferentes estações e anos, verificando-se, assim, o não cumprimento deste objetivo em diversas situações.

Relativamente ao valor-alvo, na estação do Douro Norte verificaram-se mais de 25 ultrapassagens do valor máximo diário da média móvel de 8 horas na média do triénio 2018-2019-2020, tendo sido, assim, ultrapassado o valor-alvo estabelecido no Decreto-Lei n.º 102/2010, que admite, no máximo, 25 dias por ano, em média, num período de três anos.

Tabela 15: Excedências ao Objetivo de Longo Prazo (OLP) (120 µg/m³), por estação, no período de 2014 a 2021.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Excedências ao OLP (120 µg/m³), por ano.							
			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	7	1	1	1	5	0	---	---
		Custóias - Matosinhos	0	2	0	---	---	---	---	---
		Leça do Balio-Matosinhos	0	2	9	1	5	0	3	0
		Mindelo - Vila do Conde	0	0	---	---	---	0	0	0
		VNTelha - Maia	0	2	2	4	---	1	3	0
	Urb. Fundo	Avintes	1	0	0	2	4	0	0	0
		Ermesinde - Valongo	0	2	4	0	---	1	---	4
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	0	0	1	0	1	1	5	0
	Suburb. Industrial	Meco - Perafita	0	0	3	---	---	---	---	---
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	1	2	2	15	3	0	2	0
		Paços de Ferreira	0	0	0	0	0	4	18	1
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	2	8	13	2	0	0	0	0
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	0	0	0	---	0	0	0	0
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	10	1	17	14	18	37	28	0
		Santa Combinha	---	---	---	---	---	14	9	2

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses dados considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes dados podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva de tendências temporais quando a eficiência é igual ou superior a 14%. As células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%, sendo os valores apresentados a vermelho e a negro indicativos de excedência do valor-limite.

Tabela 16: Concentração de ozono (O₃) (µg/m³), correspondente ao 26.º máximo diário da média móvel de 8h, por estação, no período de 2014 a 2021.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Concentração de O ₃ (µg/m³), 26.º máximo diário (8h), por ano.							
			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	85	79	82	87	94	83	---	---
		Custóias - Matosinhos	81	90	80	---	---	---	---	---
		Leça do Balio-Matosinhos	55	77	97	94	99	59	64	63
		Mindelo - Vila do Conde	80	82	---	---	---	67	84	52
		VNTelha - Maia	83	87	92	97	---	89	91	68
	Urb. Fundo	Avintes	76	82	62	82	95	78	95	97
		Ermesinde - Valongo	80	87	98	59	---	89	---	101
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	79	82	88	82	89	89	104	85
	Suburb. Industrial	Meco - Perafita	86	89	94	---	---	---	---	---
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	88	91	88	101	97	69	93	72
		Paços de Ferreira	61	75	56	72	77	98	116	87
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	96	105	101	72	71	62	51	61
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	73	58	65	---	80	79	76	85
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	110	85	110	108	115	126	121	68
		Santa Combinha	---	---	---	---	---	115	107	105

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85%, não sendo esses dados considerados válidos para efeitos de avaliação da conformidade legal com os valores definidos no Decreto-Lei n.º 102/2010. Estes dados podem, no entanto, ser utilizados para análise descritiva de tendências temporais quando a eficiência é igual ou superior a 14%. As células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

Relativamente aos limiares de informação e de alerta o Decreto-Lei n.º 102/2010 estabelece para o ozono (O_3) os limiares de informação ($180 \mu g/m^3$, 1 hora) e de alerta ($240 \mu g/m^3$, 1 hora). Na Tabela 17 e Tabela 18 são apresentadas, respetivamente, as excedências ao limiar de informação e ao limiar de alerta, por estação, no período de 2014 a 2021. No período em análise observaram-se várias excedências ao limiar de informação em diferentes estações e anos. Em relação ao limiar de alerta, registou-se apenas uma excedência, ocorrida na estação de Leça do Balio – Matosinhos, no ano de 2018.

Tabela 17: Excedências ao limiar de informação do ozono (O_3) ($180 \mu g/m^3$), por estação, no período de 2014 a 2021.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Excedências ao limiar de informação ($180 \mu g/m^3$), por ano.							
			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	0	0	0	0	0	0	---	---
		Custóias - Matosinhos	0	0	0	---	---	---	---	---
		Leça do Balio-Matosinhos	0	0	6	0	7	0	0	0
		Mindelo - Vila do Conde	0	0	---	---	---	0	0	0
		VNTelha - Maia	0	0	0	0	---	0	0	0
	Urb. Fundo	Avintes	0	0	0	0	0	0	0	0
		Ermesinde - Valongo	0	0	0	0	---	0	---	0
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	0	0	0	0	1	0	0	0
	Suburb. Industrial	Meco - Perafita	0	0	2	---	---	---	---	---
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	0	0	0	4	0	0	0	0
		Paços de Ferreira	0	0	0	0	0	0	5	2
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	0	0	0	---	0	0	0	0
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	0	0	6	3	3	5	6	0
		Santa Cominha	---	---	---	---	---	0	0	0

Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85% e as células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

Tabela 18: Excedências ao limiar de alerta do ozono (O_3) ($240 \mu g/m^3$), por estação, no período de 2014 a 2021.

Aglomeracão/Zona	Tipo	Estação	Excedências ao limiar de alerta ($240 \mu g/m^3$), por ano.							
			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Aglom. Porto Litoral	Suburb. Fundo	Anta - Espinho	0	0	0	0	0	0	---	---
		Custóias - Matosinhos	0	0	0	---	---	---	---	---
		Leça do Balio-Matosinhos	0	0	0	0	1	0	0	0
		Mindelo - Vila do Conde	0	0	---	---	---	0	0	0
		VNTelha - Maia	0	0	0	0	---	0	0	0
	Urb. Fundo	Avintes	0	0	0	0	0	0	0	0
		Ermesinde - Valongo	0	0	0	0	---	0	---	0
		Sobreiras - Lordelo do Ouro	0	0	0	0	0	0	0	0
	Suburb. Industrial	Meco - Perafita	0	0	0	---	---	---	---	---
Aglom. Entre Douro e Minho	Urb. Fundo	Burgães - Santo Tirso	0	0	0	0	0	0	0	0
		Paços de Ferreira	0	0	0	0	0	0	0	0
	Suburb. Fundo	Frossos - Braga	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona Norte Litoral	R. Fundo	Minho - Lima	0	0	0	---	0	0	0	0
Zona Norte Interior	R. Fundo	Douro Norte	0	0	0	0	0	0	0	0
		Santa Cominha	---	---	---	---	---	0	0	0

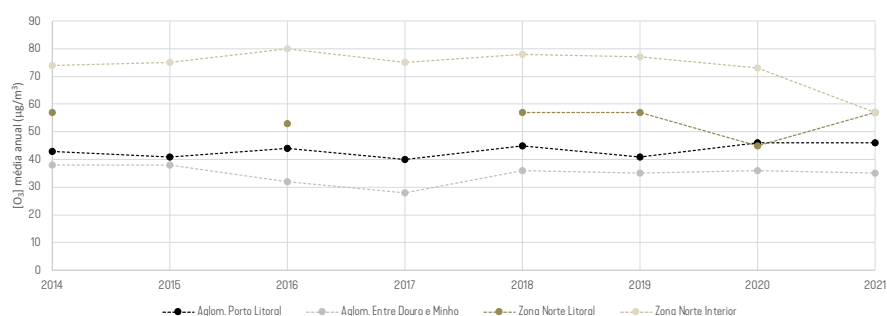
Nota: As células a sombreado cinzento correspondem a anos com eficiência de recolha de dados inferior a 85% e as células a verde correspondem a anos com eficiência horária de recolha de dados igual ou superior a 85%.

Na Figura 24 é apresentada a tendência evolutiva das concentrações médias anuais de ozono (O_3), base horária, agregadas por aglomeração e zona.

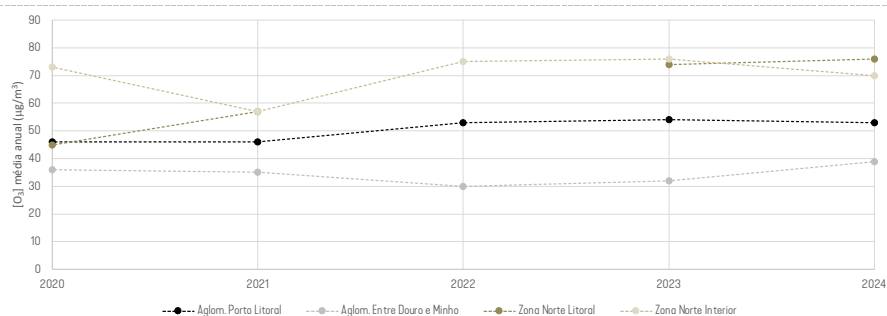
O gráfico superior (a), que considera as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, permite uma análise descritiva da evolução temporal das concentrações, evidenciando uma variabilidade interanual moderada entre zonas e aglomerações, compatível com a influência das condições meteorológicas e dos processos fotoquímicos que governam a formação do ozono troposférico.

O gráfico inferior (b), que integra exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$, apresenta um número reduzido de anos estatisticamente válidos, o que limita a robustez da análise. Ainda assim, nos anos disponíveis, as concentrações médias anuais de O_3 situam-se em níveis globalmente mais reduzidos nas aglomerações e relativamente mais elevados nas zonas.

A reduzida eficiência de recolha de dados ao longo do período em análise condiciona a avaliação quantitativa da evolução temporal do ozono à escala regional, devendo os resultados ser interpretados com cautela.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.



(b) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

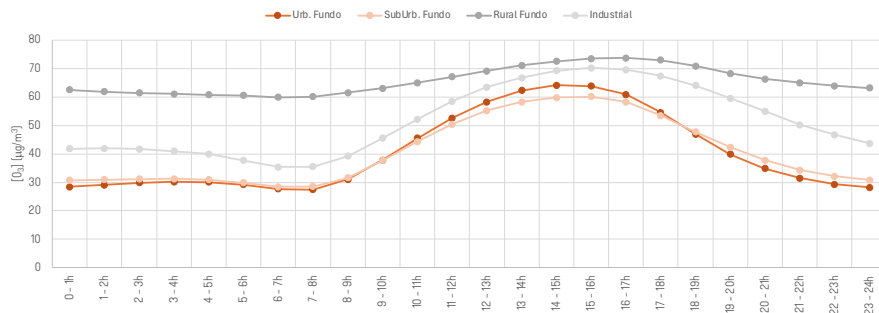
Figura 24: Variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, por aglomeração e zona, no período de 2014 a 2021.

Perfil horário

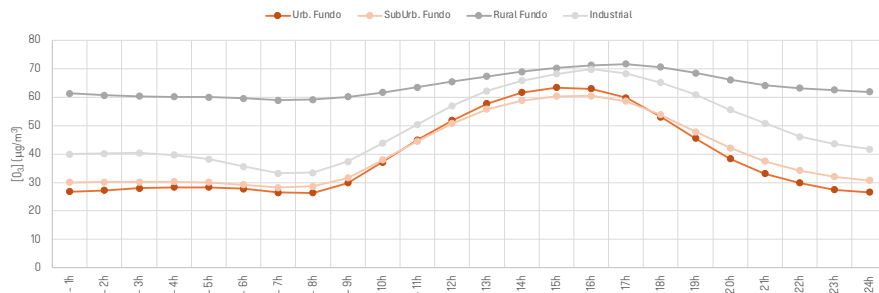
Por tipo de estação

Na Figura 25 é apresentado o perfil horário da concentração média anual de ozono (O_3), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021. A variação da concentração de O_3 apresenta um pico de concentração mais elevada durante a tarde nas estações urbanas e suburbanas de fundo e nas industriais. Este pico de concentração é compatível com a produção de O_3 durante o período diurno e o seu consumo mais acentuado no período noturno.

Nas estações rurais de fundo, a variação entre o período diurno e noturno é menos pronunciada, refletindo a menor intensidade dos processos de consumo noturno associados à menor concentração de óxidos de azoto nestes ambientes.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.

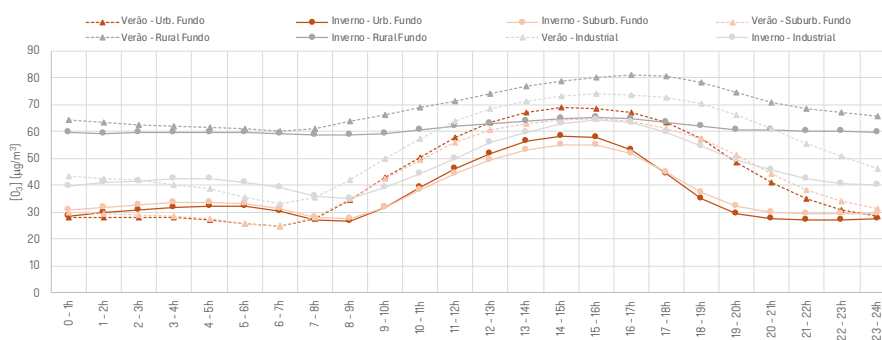


(b) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

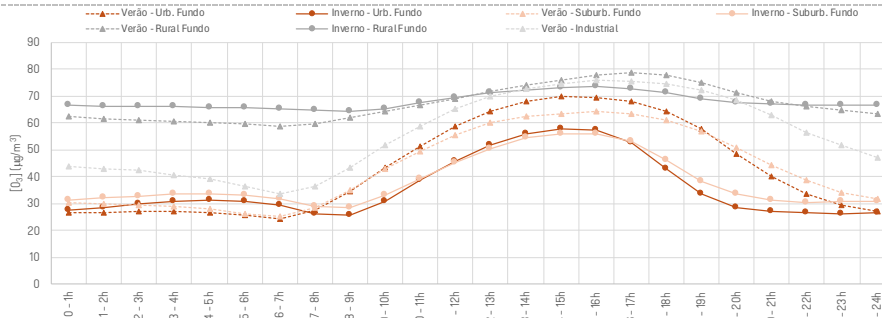
Figura 25: Perfil horário da concentração média anual de ozônio (O_3), base horária, por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.

Comparação verão-inverno

Na Figura 26 é apresentado o perfil horário da concentração média de ozônio (O_3) da Região Norte, por estação do ano, por tipo de estação, no período de 2014 a 2021. As concentrações de O_3 são, de forma geral, mais elevadas no período de verão (abril a setembro), refletindo condições mais favoráveis à sua formação fotoquímica, associadas à maior intensidade da radiação solar e a temperaturas mais elevadas. No período de inverno (outubro a março), observam-se concentrações médias horárias mais reduzidas, compatíveis com uma menor taxa de produção fotoquímica do ozônio.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.

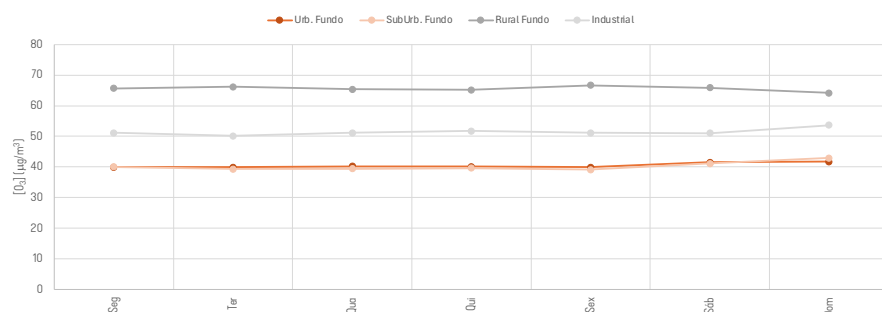


(b) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

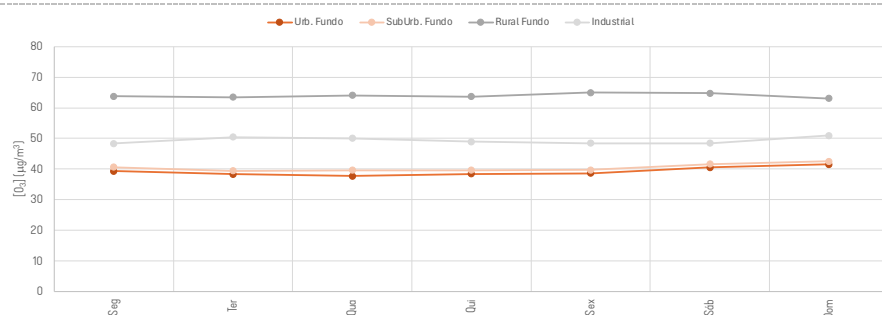
Figura 26: Perfil horário da concentração média de ozônio (O_3) da Região Norte, por estação do ano, por tipo de estação, no período de 2014 a 2021. Verão - intervalo de 1 de abril a 30 de setembro; inverno - intervalo de 1 de outubro a 31 de março.

Perfil dia da semana

Na Figura 27 é apresentado o perfil por dia da semana da concentração média diária de ozono (O_3), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021. Não se observa um padrão de variação significativo ao longo dos dias da semana, o que é consistente com o carácter secundário do ozono troposférico, cuja formação depende sobretudo das condições meteorológicas e dos processos fotoquímicos, mais do que da variação semanal direta das emissões.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.



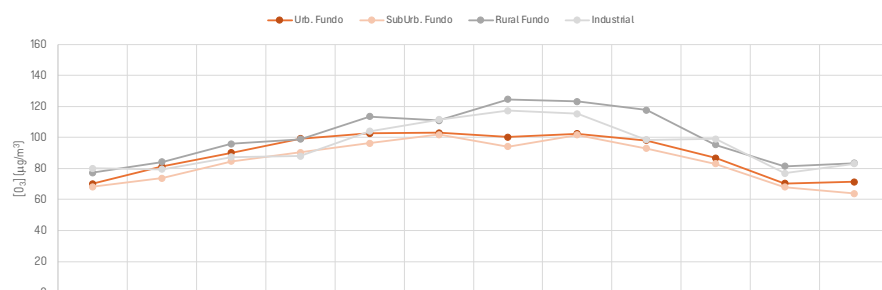
(b) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

Figura 27: Perfil por dia da semana da concentração média diária de ozono (O_3), por tipo de estação, no período de 2014 a 2021.

Perfil mensal

Na Figura 28 é apresentado o perfil do máximo mensal dos máximos diários da média móvel de 8 horas de ozono (O_3) da Região Norte, no período de 2014 a 2021.

Verifica-se que os meses da primavera e do verão apresentam, em geral, valores máximos mais elevados do que os observados nos meses de inverno, comportamento compatível com a maior intensidade da radiação solar e com condições mais favoráveis à formação fotoquímica do ozono.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.

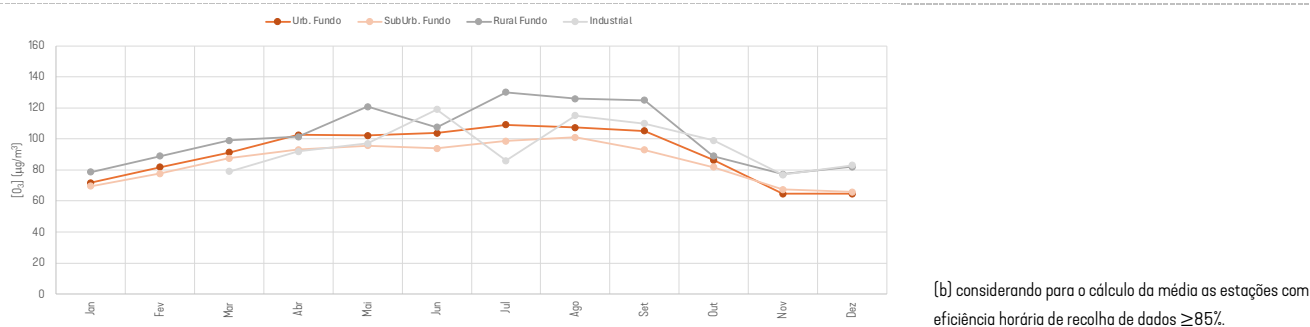


Figura 28: Perfil do máximo mensal dos máximos octo-horários de ozono (O_3), no período de 2014 a 2021.

Estações urbanas de fundo

Na Figura 29 é apresentada a variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, nas estações urbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

O gráfico superior (a), considerando as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, evidencia valores globalmente reduzidos ao longo do período em análise, com alguma variabilidade interanual.

O gráfico inferior (b), que integra exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$ e é utilizado para efeitos de avaliação da conformidade legal, apresenta um número reduzido de anos estatisticamente válidos, o que limita a robustez da análise. Ainda assim, nos anos disponíveis, as concentrações médias anuais de O_3 situam-se em níveis globalmente reduzidos e relativamente estáveis, sendo a avaliação formal da conformidade legal baseada exclusivamente nos indicadores definidos para o valor máximo diário da média móvel de 8 horas.

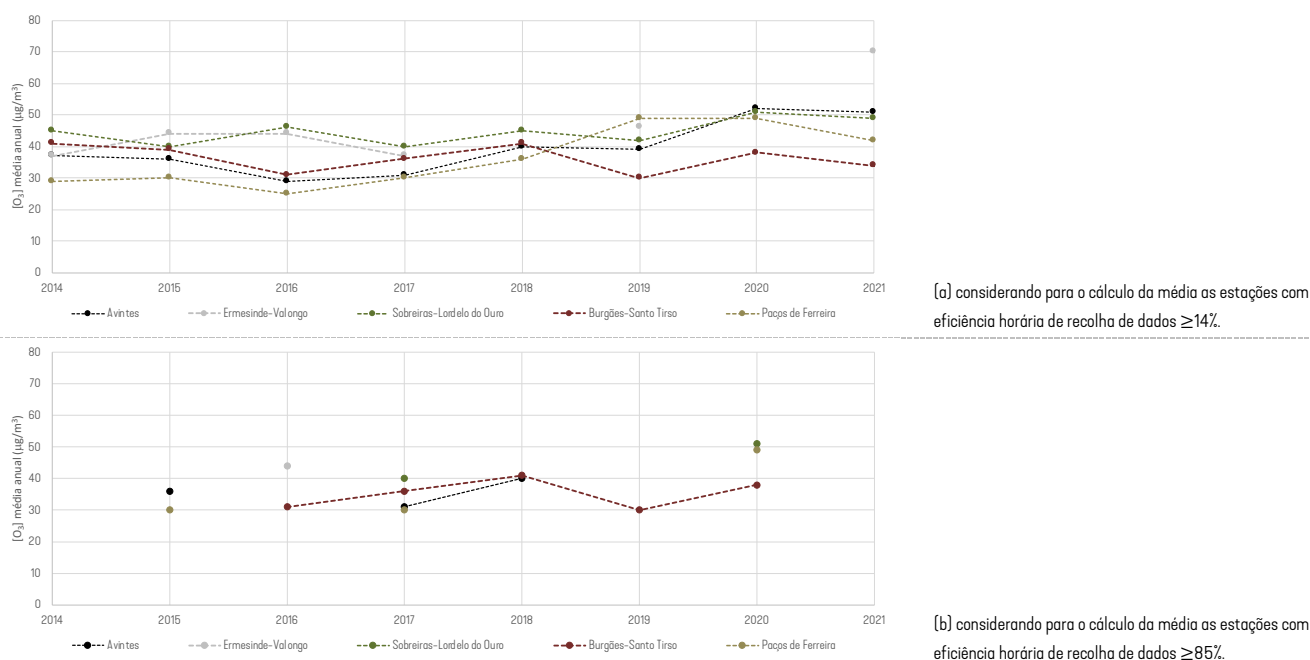


Figura 29: Variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, nas estações urbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

Estações suburbanas de fundo

Na Figura 30 é apresentada a variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, nas estações suburbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

O gráfico superior (a), considerando as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, evidencia valores globalmente reduzidos ao longo do período em análise, com alguma variabilidade interanual.

O gráfico inferior (b), que integra exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$, apresenta um número reduzido de anos estatisticamente válidos, o que limita a robustez da avaliação. Ainda assim, nos anos disponíveis, as concentrações médias anuais de O_3 situam-se em níveis globalmente reduzidos, sendo a avaliação formal da conformidade legal baseada exclusivamente nos indicadores definidos para o valor máximo diário da média móvel de 8 horas.

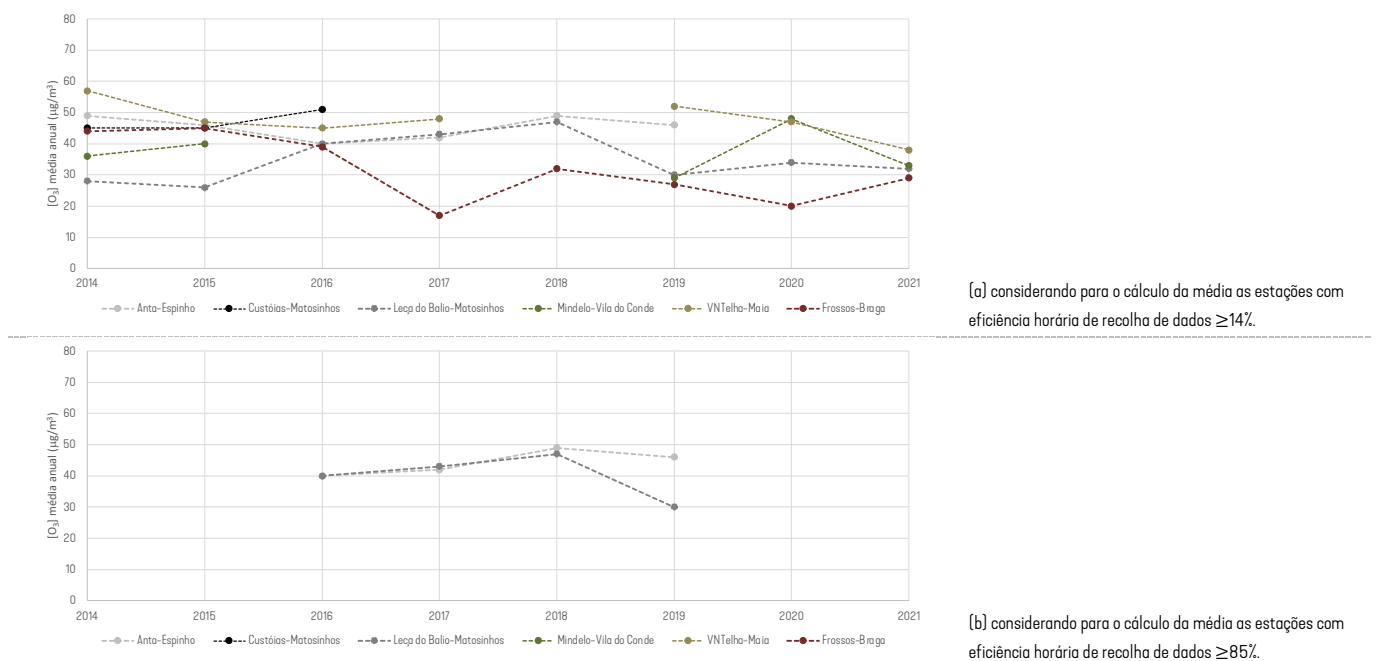


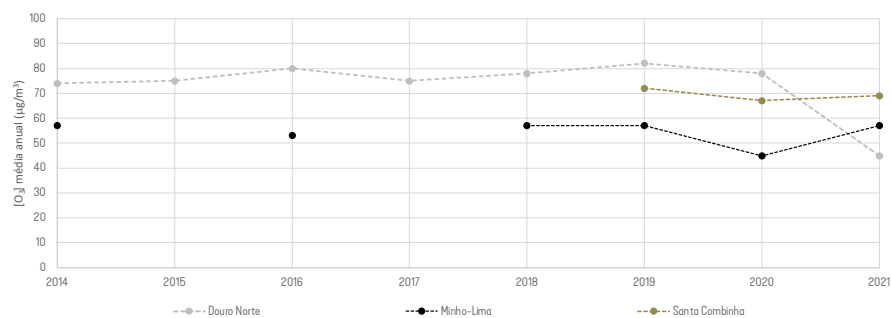
Figura 30: Variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, nas estações suburbanas de fundo das aglomerações, no período de 2014 a 2021.

Estações rurais de fundo

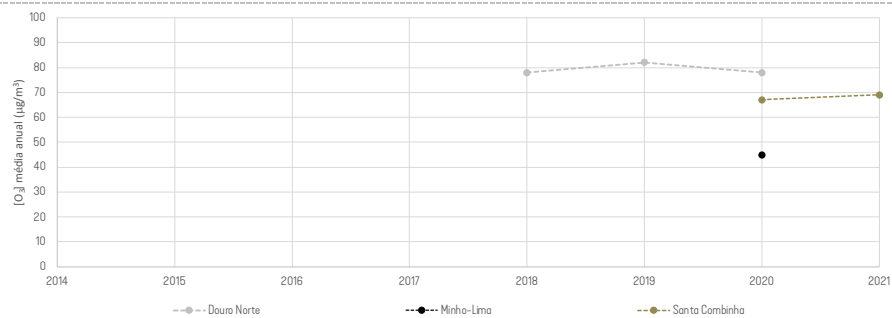
Na Figura 31 é apresentada a variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, nas estações rurais de fundo, no período de 2014 a 2021.

O gráfico superior (a), considerando as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$, evidencia valores globalmente mais elevados na estação do Douro Norte, quando comparada com as restantes estações em análise.

O gráfico inferior (b), que integra exclusivamente as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$, apresenta igualmente um número muito reduzido de anos estatisticamente válidos, o que limita a robustez da avaliação. Ainda assim, nos anos disponíveis, as concentrações médias anuais de O_3 situam-se em níveis globalmente reduzidos, sendo a avaliação formal da conformidade legal baseada exclusivamente nos indicadores definidos para o valor máximo diário da média móvel de 8 horas.



(a) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 14\%$.



(b) considerando para o cálculo da média as estações com eficiência horária de recolha de dados $\geq 85\%$.

Figura 31: Variação da concentração média anual de ozono (O_3), base horária, nas estações rurais de fundo, no período de 2014 a 2021.

Análise

A concentração de ozono (O_3) no ar ambiente depende essencialmente dos processos químicos de formação na atmosfera e dos mecanismos de remoção, nomeadamente por transformação química ou por deposição seca e húmida.

Em condições troposféricas, o O_3 é formado fotoquimicamente a partir da fotólise do dióxido de azoto (NO_2) e reage rapidamente com o monóxido de azoto (NO). Este ciclo de três reações, geralmente designado por ciclo fotoquímico básico, resulta num equilíbrio entre o NO , o NO_2 e o O_3 , sem formação ou perda líquida de O_3 . No entanto, na presença de compostos orgânicos voláteis (COV), as reações de degradação destes compostos conduzem à formação de radicais intermédios, nomeadamente o radical peróxido ($RO_2\cdot$) e o radical hidroperóxido ($HO_2\cdot$). Uma vez que a conversão de NO em NO_2 , resultante das reações com estes radicais, não consome O_3 , a fotólise subsequente do NO_2 representa uma fonte líquida de O_3 . Estas reações assumem, assim, um papel determinante na produção fotoquímica de ozono na troposfera, sendo os NO_x e os COV os seus principais precursores.

Os processos de formação e consumo de O_3 na troposfera são particularmente complexos, devido à grande diversidade de COV emitidos e às múltiplas espécies que resultam da oxidação dos COV primários e secundários. Os principais oxidantes dos COV na atmosfera são o radical hidroxilo ($OH\cdot$), o O_3 e o radical nitrato ($NO_3\cdot$), este último com maior relevância durante o período noturno. A principal fonte atmosférica de $OH\cdot$ resulta da reação de átomos de oxigénio eletronicamente excitados (O^1D), produzidos pela fotólise do O_3 , com o vapor de água.

A concentração de O_3 no ar ambiente depende ainda do transporte horizontal das massas de ar, à escala local, regional e transcontinental, condicionado pela ação de ciclones e anticiclones, pela topografia e pelas descontinuidades de superfície, em particular a interface terra/mar, bem como da mistura vertical dos poluentes, fortemente influenciada pela estabilidade da atmosfera, que é determinada pelo perfil vertical de temperatura. Salienta-se ainda a contribuição da intrusão de O_3 estratosférico, associada a movimentos de subsidência de massas de ar provenientes da estratosfera.

Nas áreas urbanas, os transportes rodoviários constituem importantes emissores de NO , o qual, ao reagir localmente com o O_3 , promove o seu consumo. Este mecanismo conduz, habitualmente, a concentrações mais reduzidas de O_3 nas áreas urbanas, quando comparadas com as áreas rurais. As áreas localizadas a sotavento das zonas urbanas são frequentemente afetadas pelo O_3 regional, que se vai

formando à medida que as massas de ar, ricas em substâncias precursoras (NO_x e COV), se deslocam e reagem fotoquimicamente, dando origem à formação de ozono.

Assim, a variação da concentração de O_3 apresenta um perfil horário característico, com um pico durante o período da tarde, e uma variação sazonal bem definida, com concentrações mais elevadas na primavera e no verão.

Nas estações da RMQAR-N, o perfil horário apresenta este comportamento típico, com um pico de concentração de O_3 mais elevado durante a tarde nas estações urbanas e suburbanas de fundo, bem como nas estações industriais. Nas estações rurais de fundo, a variação entre o período diurno e noturno é menos evidente, uma vez que os processos de consumo noturno são menos eficazes.

Verifica-se, igualmente, que nas estações da RMQAR-N os meses da primavera e do verão apresentam máximos diários da média móvel de 8 horas superiores aos observados nos meses de inverno.

Relativamente ao enquadramento regulamentar, o Decreto-Lei n.º 102/2010 estabelece para o O_3 um objetivo a longo prazo (OLP) de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, correspondente ao máximo diário da média móvel de 8 horas, a atingir a longo prazo. Define ainda um valor-alvo, igualmente de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a não exceder mais do que 25 dias por ano, em média, num período de três anos. Estão também definidos os limiares de informação ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 hora) e de alerta ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 hora).

Nas estações da RMQAR-N observaram-se excedências ao máximo diário da média móvel de 8 horas em várias estações e anos, verificando-se, assim, não atingimento deste objetivo.

Na estação de Douro Norte verificaram-se mais de 25 ultrapassagens do máximo diário da média móvel de 8 horas na média do triénio 2018–2019–2020, tendo sido, assim, ultrapassado o valor-alvo definido no Decreto-Lei n.º 102/2010.

No período em análise observaram-se várias excedências ao limiar de informação e apenas uma excedência ao limiar de alerta, registada na estação de Leça do Balio – Matosinhos, em 2018.

Salienta-se, contudo, que a eficiência de recolha de dados foi globalmente muito reduzida ao longo do período em análise, o que limita significativamente a robustez estatística da avaliação.

SÍNTESE

A análise do dióxido de azoto (NO_2) na Região Norte, no período de 2014 a 2021, evidencia padrões de variação temporal compatíveis com a influência do tráfego rodoviário, dos regimes de estabilidade atmosférica e da variabilidade sazonal associada à radiação solar, devendo esta interpretação ser enquadrada pelas limitações de eficiência de recolha de dados existentes em parte do período em análise. Nas estações urbanas de tráfego observaram-se situações pontuais de incumprimento do valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto nas estações urbanas, suburbanas e rurais de fundo os níveis de NO_2 se mantiveram, significativamente abaixo do critério legal.

Os perfis temporais horários, semanais e sazonais confirmam o comportamento típico do NO_2 de origem predominantemente rodoviária, com picos associados aos períodos de maior intensidade de tráfego e concentrações mais elevadas no inverno.

As limitações na eficiência de recolha de dados, associadas às condicionantes do período pandémico, condicionam a robustez estatística da avaliação, devendo esses resultados ser interpretados com cautela. Globalmente, a evolução observada aponta para uma tendência de redução das concentrações médias de NO_2 ao longo do período analisado.

A análise das partículas em suspensão com diâmetro aerodinâmico inferior a $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) na Região Norte, no período de 2014 a 2021, evidencia padrões de variação temporal compatíveis com a influência de fontes predominantemente antropogénicas e de fatores meteorológicos, nomeadamente ao nível da estabilidade atmosférica, do transporte e da ressuspensão de partículas, devendo esta interpretação ser enquadrada pelas limitações de eficiência de recolha de dados existentes no período em análise.

As concentrações de PM_{10} apresentam, de forma geral, valores mais elevados no período de inverno, embora com uma sazonalidade menos pronunciada do que a observada para o dióxido de azoto (NO_2). Os perfis temporais não evidenciam um padrão semanal marcado, em consonância com o carácter misto das fontes emissoras deste poluente.

Nos anos estatisticamente válidos, verificou-se o cumprimento generalizado do valor-limite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e do valor-limite diário de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (a não exceder mais de 35 vezes por ano civil), em todas as estações da RMQAR-N.

Contudo, a reduzida eficiência de recolha de dados ao longo do período em análise, em particular nos anos mais recentes, limita a robustez estatística da avaliação da conformidade legal, devendo os resultados ser interpretados com cautela. Globalmente, a evolução observada sugere uma manutenção das concentrações médias de PM_{10} em níveis compatíveis com os critérios legais de proteção da saúde humana.

A análise do ozono (O_3) na Região Norte, no período de 2014 a 2021, evidencia padrões temporais característicos deste poluente secundário, com concentrações mais elevadas durante o período da tarde e nos meses da primavera e do verão, em resultado de condições mais favoráveis à sua formação fotoquímica. Verifica-se igualmente a existência de diferenças espaciais consistentes, com valores tendencialmente mais elevados nas zonas e nas estações rurais de fundo, quando comparados com as aglomerações urbanas.

Ao nível do enquadramento regulamentar, não foi atingido o objetivo a longo prazo (OLP) de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, correspondente ao máximo diário da média móvel de 8 horas, em todas as estações e anos do período em análise. Relativamente ao valor-alvo, verificou-se o seu incumprimento na estação de Douro Norte, no triénio 2018 – 2019 – 2020, ao ter sido ultrapassado o número máximo admissível de 25 dias por ano, em média, com excedências ao referido indicador.

No que respeita aos limiares de proteção da saúde, observaram-se várias excedências ao limiar de informação ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 hora) e apenas uma excedência ao limiar de alerta ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 hora), registada na estação de Leça do Balio – Matosinhos em 2018, não se tendo observado a repetição deste tipo de episódio nos anos seguintes.

Salienta-se, contudo, que a eficiência de recolha de dados foi globalmente reduzida ao longo do período considerado, em particular em diversos anos recentes, o que limita a robustez estatística da avaliação efetuada. Assim, embora os padrões temporais e espaciais observados sejam consistentes com o comportamento esperado do ozono troposférico, os resultados devem ser interpretados com prudência no que respeita à avaliação quantitativa da evolução temporal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CCDR-N; DCEA-FCT/UNL (2009). Reavaliação das Zonas e Aglomerações da Região Norte. CCDR Norte Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte e DCEA-FCT/UNL Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente – Faculdade de Ciências e Tecnologia/ Universidade Nova de Lisboa. Abril 2009.

CCDR-N; FCT/UNL (2021). Reavaliação das Zonas e Aglomerações de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Norte. Porto: Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDR-N) e NOVA School of Science and Technology – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Abril de 2021.

Instituto do Ambiente; DCEA-FCT/UNL (2002). Avaliação preliminar da qualidade do ar em Portugal – SO₂, NO₂, NO_x, PM₁₀ e Pb. Alfragide: Instituto do Ambiente, Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território. Julho de 2002.