

Estudo da exposição da população a poluentes do ar nos transportes em ambiente urbano: artigo de revisão

Ana Margarida Correia¹, Cristiana Costa¹, Dalila Gonçalves¹, Gonçalo Henriques¹, C. Correia², Susana Marta Almeida²

1. Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa. Lisboa, Portugal. ana-margarida-correia@hotmail.com
2. Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Bobadela, Portugal.

RESUMO: A poluição do ar é provocada por diversos fatores antropogénicos e tem consequências para a saúde humana. Os veículos motorizados constituem uma das principais fontes antropogénicas de emissão de poluentes atmosféricos. O monóxido de carbono, a matéria particulada e os óxidos de azoto são alguns dos principais poluentes responsáveis pela degradação da qualidade do ar em meios urbanos. Os transportes mais utilizados nas grandes cidades em Portugal são o autocarro, a bicicleta, o carro e o metro. Através de uma revisão de estudos de vários locais do mundo verificou-se que o carro e o metro são os transportes que apresentaram as maiores concentrações de poluentes atmosféricos, enquanto no autocarro se detetaram as menores concentrações em relação a todos os poluentes analisados. As elevadas concentrações de cada poluente estão dependentes de diferentes fatores, como o aumento da densidade do tráfego, a localização dos tubos de escape dos veículos, as condições de ventilação, o desgaste dos pneus, das rodas nos carris do metro e do sistema de travagem, a proximidade das cicloviás à faixa de rodagem, entre outros. Também se verificou que a bicicleta é o meio de transporte que envolve as maiores doses inaladas, embora seja o meio de transporte mais benéfico para a saúde. É, portanto, necessário definir adequadamente a localização das cicloviás e adotar medidas, como a utilização de barreiras entre a faixa de rodagem e as cicloviás.

Palavras-chave: Movimentos pendulares; Exposição; Qualidade do ar; Poluição do ar; Dose inalada.

Study of population exposure to air pollutants in transport in an urban environment: review article

ABSTRACT: Air pollution is caused by several anthropogenic factors and has consequences for human health. Motor vehicles are one of the main sources of anthropogenic emissions of atmospheric pollutants. Carbon monoxide, particulate matter, and nitrogen oxides are some of the main air pollutants responsible for the degradation of the air quality in urban areas. The transport most used in major cities in Portugal are bus, bicycle, car, and subway. Through a review of studies from various parts of the world, it was found that the car and the subway are the transports with the highest concentrations of atmospheric pollutants, while the bus was the transport with the lowest concentrations in relation to all the pollutants analyzed. High concentrations of each pollutant are dependent on different factors such as increased traffic density, location of the exhaust pipes of vehicles, the ventilation conditions, wear of the wheels of the rail and the braking system, the proximity of bicycle paths to traffic lanes, among others. It was also found that the bicycle is the means of transport that involves the highest inhaled doses, although it is the most beneficial means of transport for health. It is, therefore, necessary to properly define the location of bike paths and adopt measures such as the use of barriers between the roadway and bike paths.

Keywords: Commuting; Exposure; Air quality; Air pollution; Inhaled dose.

Introdução

A poluição do ar é provocada por diversos fatores antropogénicos e tem consequências para a saúde humana, nomeadamente o desenvolvimento ou agravamento de doenças

respiratórias, cardiovasculares, cancerígenas, entre outras patologias¹. Segundo os dados de 2018 fornecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS), a poluição do ar provoca cerca de 7.000.000 de mortes por ano em todo o mundo¹. Na

Europa, a poluição do ar é considerada o principal risco de natureza ambiental para a saúde humana, provocando cerca de 400.000 mortes prematuras por ano².

Para além das consequências para a saúde humana, a poluição do ar também tem impactes negativos no meio ambiente, como a eutrofização, a acidificação dos solos e água, a perda de biodiversidade e ainda impactes no clima terrestre, como é o caso do aquecimento global e das alterações climáticas².

Os veículos motorizados constituem uma das principais fontes antropogénicas de emissão de poluentes do ar³. No Sudoeste da Europa, onde Portugal se inclui, o tráfego contribui com cerca de 35% e 23% para as concentrações de matéria particulada (PM) com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5µm (PM_{2,5}) e diâmetro aerodinâmico inferior a 10µm (PM₁₀), respetivamente nas áreas urbanas⁴. Também nas áreas urbanas o monóxido de carbono (CO) pode ter origem nas reações de combustão dos veículos⁵. Os óxidos de azoto (NO_x) têm origem antropogénica, sendo formados na queima de combustíveis fósseis a altas temperaturas. Os veículos automóveis são a principal fonte de poluição deste poluente em zonas urbanas⁶⁻⁷.

A crescente urbanização na Europa teve um impacto significativo na modernização do transporte⁸⁻⁹. Em Portugal, a mobilidade tem crescido nas últimas décadas e com ela verificou-se o aumento do número de veículos em circulação¹⁰. No ano de 2018 houve um aumento do número de passageiros nos transportes públicos, com exceção do transporte marítimo, em Portugal¹¹. Um inquérito de mobilidade realizado pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), em 2017, revelou que o automóvel foi o transporte mais utilizado nas Áreas Metropolitanas de Lisboa (56,3%) e do Porto (66,2%) durante os dias úteis¹². O mesmo inquérito revelou que, em média, são realizadas 2,60 e 2,72 deslocações por dia útil, por pessoa, nas áreas metropolitanas de Lisboa e do Porto, respetivamente¹².

Apesar de ser relativamente reduzido o tempo que as pessoas despendem nos movimentos pendulares, estes, quando realizados durante os períodos com elevada densidade de veículos, contribuem significativamente para o aumento da exposição diária a poluentes do ar uma vez que as concentrações de poluentes nas vias de circulação são muito elevadas¹³⁻¹⁴. As doses inaladas são influenciadas pela concentração de poluentes, pela taxa de inalação e pelo tempo despendido na deslocação^{13,15}. Para além disso, quanto maior for a dose inalada de poluente maior o seu impacto na saúde. É, então, importante avaliar a exposição da população a poluentes do ar durante os movimentos pendulares nos transportes, nomeadamente o autocarro, a bicicleta, o carro e o metro^{13,15}.

O CO, a PM e os NO_x são alguns dos principais poluentes do ar na Europa e, portanto, em Portugal¹⁶, estando relacionados com a degradação da qualidade do ar nos transportes^{13,17}. Em conjunto com a OMS, cada país trabalha para a melhoria da qualidade do ar, reduzindo as concentrações de poluentes a que população está exposta. Para tal são estabelecidos um conjunto de valores-guia recomendados para os diferentes poluentes do ar¹⁸.

O presente estudo tem como finalidade fazer uma revisão da literatura acerca da exposição da população a CO, dióxido de azoto (NO₂), PM_{2,5} e PM₁₀ nos transportes em ambiente urbano. O objetivo do estudo é transmitir à população qual o melhor transporte a utilizar, em termos de qualidade do ar durante os seus movimentos pendulares. Assim, pretendeu-se estudar: 1) Quais as concentrações dos diferentes poluentes atmosféricos em cada transporte; 2) Perceber que fatores podem influenciar as concentrações dos poluentes, como as condições de ventilação ou a existência de barreiras físicas; e 3) Perceber de que forma a dose inalada é influenciada pelo meio de transporte selecionado.

Materiais e Métodos

A população residente na Área Metropolitana de Lisboa utiliza essencialmente o metro, o carro, o autocarro e a bicicleta para efetuar as suas deslocações diariamente. As estatísticas de um estudo realizado em 2017 indicam que, na Área Metropolitana de Lisboa, nos dias úteis, 56,3% da população utiliza o meio de transporte individual (carro), 23,3% utiliza o meio pedonal ou a bicicleta, 10,2% utiliza os autocarros, 7,5% utiliza o meio ferroviário (não distinguindo o comboio do metropolitano) e 0,4% utiliza o barco¹². Por essa razão, os transportes escolhidos para realizar a avaliação foram os mais utilizados em Lisboa.

A metodologia utilizada neste artigo foi uma revisão de literatura sobre exposição aos poluentes do ar nos diferentes meios de transporte, incluiu a pesquisa de documentos ou artigos científicos relacionados com a temática da qualidade do ar em estudo. A pesquisa foi elaborada em diferentes plataformas digitais, como a PubMed, a *b-on*, o Google Académico e os Repositórios Científicos de Acesso Aberto de Portugal (RCAAP). A pesquisa foi feita utilizando a seguinte combinação de palavras-chave: "*Commuting/Movimentos Pendulares*" ou "*Exposure/Exposição*" ou "*Air Quality/Qualidade do ar*" ou "*Air Pollution/Poluição do ar*" ou "*Inhaled Dose/Dose Inalada*".

Após a leitura dos resumos dos artigos foram excluídos aqueles que não preenchiam os critérios de inclusão. Posteriormente foi feita uma revisão completa dos artigos que estavam em concordância com os critérios de inclusão:

- Publicações de 1995 a 2020;
- Artigos que mencionem transportes públicos e privados;
- Trabalho sobre a exposição da população a poluentes do ar e que apresentem resultados sobre a concentração desses poluentes;
- Publicações sobre a avaliação da exposição nos transportes, sendo estes autocarro, carro, metro e bicicleta;
- Artigos onde é estabelecida uma relação entre a exposição e dose;
- Artigos realizados em áreas urbanas.

Para melhor entender o presente estudo apresenta-se o desenho da investigação (cf. Figura 1).

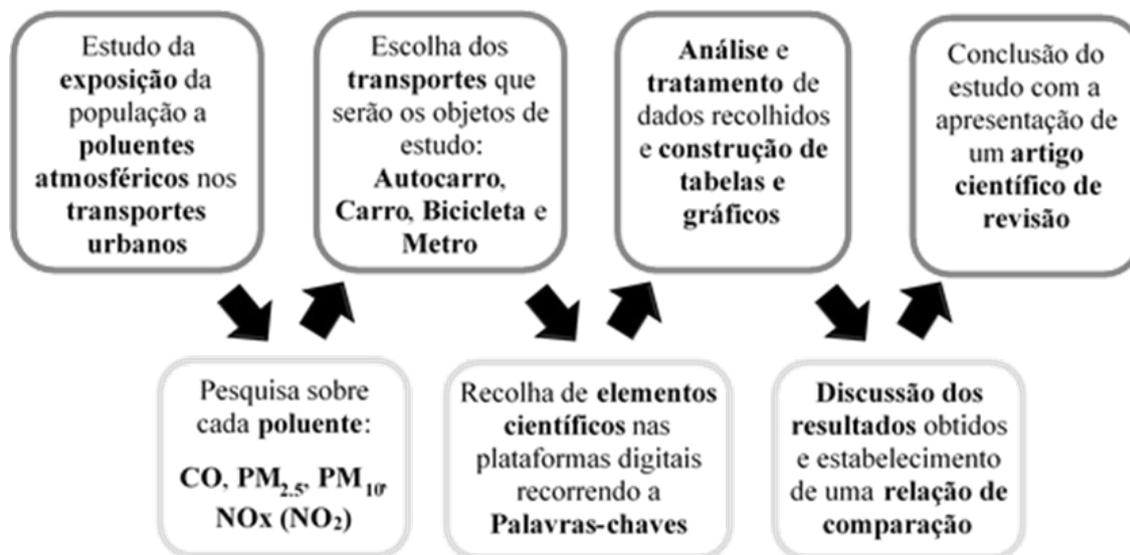


Figura 1. Representação esquemática do procedimento adotado

Resultados

Com base nos critérios de inclusão da metodologia adotada foram analisados 51 artigos relativos à exposição aos poluentes do ar nos diferentes meios de transporte. Destes, apenas 21 foram selecionados para a análise de dados, pois eram os artigos que apresentavam os valores das concentrações medidas para cada transporte. Dos 21 artigos, 17

referem-se a PM, seis ao CO e cinco aos NO_x. Dos 17 artigos associados à PM, 15 estudam as PM_{2,5} e apenas 11 focam as PM₁₀. Do grupo de artigos sobre os NO_x, cinco estudam as concentrações de NO₂ apresentando valores das medições e um também estuda as concentrações de NO, não havendo, no entanto, valores associados ao mesmo.

Os valores das concentrações de poluentes medidas nos artigos encontram-se descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Concentrações médias dos diversos poluentes obtidos em cada estudo

Fonte	Transportes	NO ₂ (µg/m ³)	CO (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	Local de amostragem
<i>Particle exposure and inhaled dose during commuting in Singapore</i> Tan et al. (2017)	Autocarro	-	667,0	28,0	-	Orchard Road, Singapura
	Carro	-	778,0	27,0	-	
	Metro	-	333,0	26,0	-	
<i>Commuter exposure to PM_{2,5}, BC, and UFP in six common transport microenvironments in Sacramento, California</i> Ham et al. (2017)	Autocarro	-	-	7,5	-	Sacramento, Califórnia
	Bicicleta	-	-	9,6	-	
	Carro	-	-	7,1	-	
	Metro	-	-	5,7	-	
<i>Commuter exposure to fine and ultrafine particulate matter in Vienna</i> Strasser et al. (2018)	Autocarro	-	-	7,8	34,8	Viena, Áustria
	Bicicleta	-	-	9,5	16,7	
	Carro	-	-	4,5	19,2	
	Metro	-	-	20,4	60,3	
<i>The exposure of pedestrians, drivers and road transport passengers to nitrogen dioxide</i> Žak et al. (2017)	Autocarro	59,2	-	-	-	Zakopane, Polónia
	Carro	98,6	-	-	-	
<i>Particle exposure and inhaled dose while commuting in Lisbon</i> Correia et al. (2020)	Autocarro	-	-	28,4	39,6	Lisboa, Portugal
	Bicicleta	-	-	30,5	42,2	
	Carro	-	-	33,7	41,5	
	Metro	-	-	37,8	84,1	
<i>A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona</i> De Nazelle et al. (2012)	Autocarro	-	2 222,0	25,0	-	Barcelona, Espanha
	Bicicleta	-	1 667,0	29,0	-	
	Carro	-	7 111,0	35,0	-	

Fonte	Transportes	NO ₂ (µg/m ³)	CO (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	Local de amostragem	
Underground and ground-level particulate matter concentrations in an Italian metro system Carteni et al. (2015)	Média dentro do Metro estações a nível do solo	-	-	13,0	37,0	Nápoles, Itália	
	Média dentro do Metro estações subterrâneas	-	-	29,0	89,0		
Variability of aerosols and chemical composition of PM₁₀, PM_{2,5} and PM₁ on a platform of the Prague underground metro Cusack et al. (2015)	Metro	-	-	93,9	214,8	Praga, República Checa	
Evaluation of bus driver exposure to nitrogen dioxide levels during working hours Heberle et al. (2019)	Autocarro Inverno	47,7	-	-	-	Caxias do Sul, Brasil	
	Autocarro Verão	39,0	-	-	-		
Assessment of personal exposure to particulate air pollution during commuting in European cities: recommendations and policy implications Karanasiou et al. (2014)	Autocarro	-	-	52,6	144,0	Espanha, Bélgica, Irlanda e Reino Unido	
	Bicicleta	-	-	48,7	50,6		
	Carro	-	-	47	59,1		
	Metro	-	-	136,5	192,8		
Characterization of atmospheric PM_{2,5} sources at a Central European urban background site (2016) Juda-Rezler et al. (2020)	Carro (Primavera)	-	-	20,6	-	Varsóvia, Polónia	
	Carro (Verão)	-	-	11,5	-		
	Carro (Outono)	-	-	15,7	-		
	Carro (Inverno)	-	-	27,5	-		
Exposure to air pollutants during commuting in London: are there inequalities among different socio-economic groups? Rivas et al. (2017)	Autocarro	-	-	13,9	37,9	Londres, Inglaterra	
	Carro	-	-	7,3	8,2		
	Metro	-	-	34,5	68,4		
Personal exposure to fine particulate air pollution while commuting: an examination of six transport modes on an urban arterial roadway Chaney et al. (2017)	Autocarro	-	-	13,0	-	Utah, EUA	
	Carro	Janela aberta	-	-	15,2		-
		Janela fechada	-	-	5,2		-
Comparison of particulate matter inhalation for users of different transport modes in Lisbon Ramos et al. (2015)	Autocarro	-	-	8,8	18,5	Lisboa, Portugal	
	Metro	-	-	18,5	15,5		
Impact of bicycle route type on exposure to traffic-related air pollution MacNaughton et al. (2014)	Bicicleta	1 498,9	-	-	-	EUA	
Air pollutant exposure and inhaled dose during urban commuting: a comparison between cycling and motorized modes Ramos et al. (2016)	Autocarro	-	558,6	45,6	56,2	Lisboa, Portugal	
	Bicicleta	-	174,5	66,2	76,2		
	Carro	-	786,2	48,8	57,0		
	Metro	-	250,4	48,6	60,4		
The exposure of cyclists, car drivers and pedestrians to traffic-related air pollutants. Van Wijnen et al. (1995)	Bicicleta	172,5	2 789,5	-	-	Amesterdão, Países Baixos	
	Carro	80,0	3 203,0	-	-		
Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona Moreno et al. (2015)	Autocarro	-	1 000,0	45,2	-	Barcelona, Espanha	
	Metro	-	1 000,0	42,6	-		
Vehicle interior air quality conditions when travelling by taxi Moreno et al. (2019)	Carro	-	2 333,0	-	75,2	Barcelona, Espanha	
Indoor-outdoor relationships of airborne particles and nitrogen dioxide inside Parisian buses Molle et al. (2013)	Autocarro	208,5	-	57,0	-	Paris, França	
Traffic-related particulate air pollution exposure in urban areas Borrego et al. (2006)	Carro	-	-	-	74,7	Lisboa, Portugal	

De acordo com os dados da Tabela 1 e da Figura 2 foi possível observar, nos artigos que mencionam comparações entre os meios de transporte, que 66,6% destacam o carro como o meio de transporte que induz a uma maior exposição a CO^{17,19,31-32}, 16,7% indicam o metro¹⁴ e ainda 16,7% o autocarro³³, sendo que este último estudo não menciona medições no carro. De acordo com o estudo de Moreno³⁴, foi possível verificar que os valores médios das concentrações de CO foram equivalentes para o autocarro e o metro. Contudo, face aos dados estatísticos, nomeadamente à mediana e ao desvio-padrão, obtidos no metro (mediana=666,7 µg/m³; σ=444,4 µg/m³) e no autocarro (mediana=1111,1 µg/m³; σ=333,3 µg/m³), verifica-se que o autocarro foi o meio de transporte onde houve maiores concentrações de CO ao longo das medições³³.

Segundo Žak *et al.* e van Wijnen *et al.*, o carro e a bicicleta, respetivamente, representam os transportes onde houve maior exposição a NO₂^{22,32}.

Para os resultados comparativos da exposição a PM_{2,5} para pelo menos dois transportes, 45,4% dos estudos referem que o metro é o meio de transporte com maiores concentrações deste poluente^{13-14,21,27,29,37}. Outros estudos revelam que 27,3% indicam o autocarro^{19,28,33}, no qual num dos estudos²⁸ o metro não é analisado, 18,2% indicam a bicicleta^{20,31} e, por fim, 9,1% refere o carro¹⁷.

No caso da PM₁₀ verificou-se que em 66,6% dos artigos o meio de transporte com maior concentração deste poluente é o metro^{13-14,21,27,37}, em 16,7% registaram-se maiores concentrações na bicicleta³¹ e igualmente em 16,7% dos artigos identificaram o autocarro²⁹.

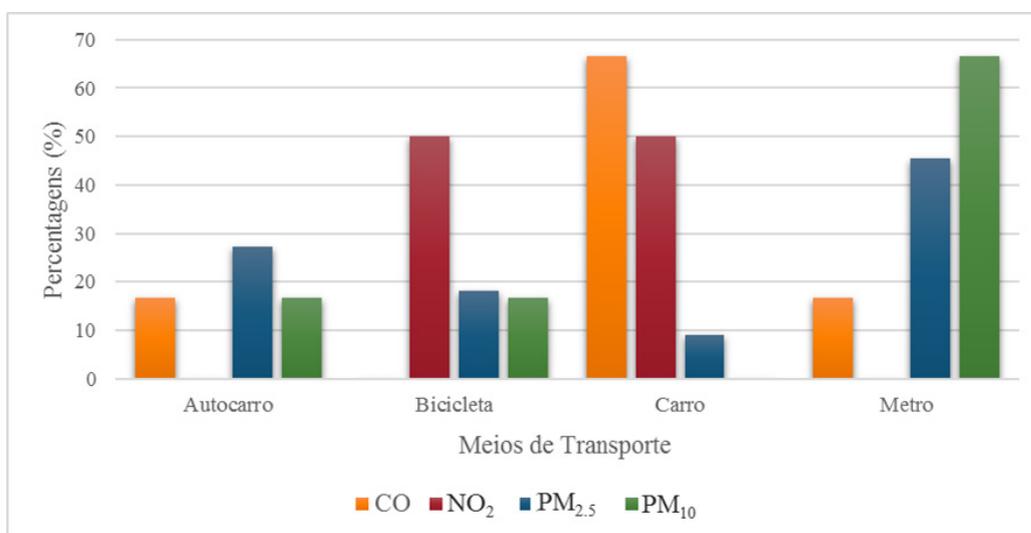


Figura 2. Percentagem de estudos com menores concentrações para cada poluente em cada transporte.

Relativamente aos transportes com as concentrações mais baixas para cada poluente, de acordo com a Tabela 1 e a Figura 3, é possível averiguar que, especificamente para o CO, 50% indica a bicicleta^{17,31-32}, 33,3% o metro^{19,33} e 16,7% o autocarro¹⁴.

Para o NO₂, Žak *et al.* assinala o autocarro e van Wijnen *et al.* o carro como sendo os meios de transporte com menor concentração deste poluente^{22,32}.

Relativamente à PM_{2,5}, 36,3% dos estudos identificam o autocarro como o meio de transporte onde se verificaram menores concentrações^{13,17,29,31}, 27,3% o metro^{19-20,33}, outros 27,3% o carro^{21,27-28}, terminando com 9,1% a bicicleta¹⁴. Já para a PM₁₀, com igual percentagem de artigos (33,3%), ficou demonstrado que são a bicicleta^{14,21,37} e o autocarro^{13,31} os meios de transporte em que a exposição é menor, seguindo-se o carro²⁷ e o metro²⁹, ambos em 16,7% dos artigos analisados.

O cálculo da dose inalada não é idêntico em todos os estudos, uma vez que, apesar da metodologia utilizada ser semelhante, alguns dos estudos consideram a distância

percorrida (obtendo a massa inalada por unidade de comprimento) enquanto outros a desconsideram (obtendo a massa inalada num percurso predefinido). Assim, é possível afirmar que a dose total inalada durante os movimentos pendulares está diretamente relacionada com as concentrações dos poluentes em cada microambiente, o tempo decorrido, a taxa de inalação (associada ao esforço físico) e a distância percorrida³⁸. Por exemplo, a existência de percursos específicos para cada transporte, como a faixa para autocarros e as ciclovias, condiciona a exposição a poluentes durante o movimento pendular, condicionando também a dose inalada, como Tan verificou¹⁹. A taxa de inalação está associada ao volume de ar que o indivíduo inala e à taxa metabólica do indivíduo, pelo que quando o indivíduo gasta mais energia esta tende a ser maior. Ou seja, quando existe um esforço físico maior, a taxa de inalação aumenta. Desta forma, e atendendo ao esforço físico aplicado em cada tipo de transporte, é possível verificar que a taxa de inalação será superior na bicicleta relativamente aos restantes transportes³⁹⁻⁴⁰.

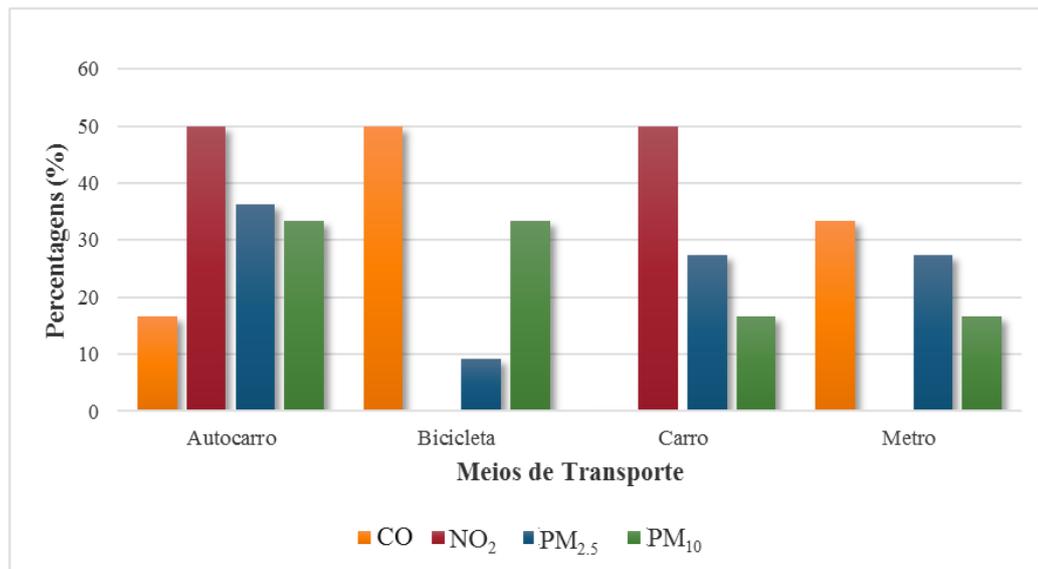


Figura 3. Percentagem de estudos com maiores concentrações para cada poluente em cada transporte.

Os valores das doses inaladas medidas nos artigos encontram-se descritos na Tabela 2.

Atendendo a todos os estudos que descrevam dados sobre as doses inaladas, é possível verificar que nos artigos referentes ao CO 33,3% reporta que a bicicleta é o meio de transporte

que envolve uma maior dose inalada e 66,7% o carro. Nos artigos referentes à PM_{2,5}, 85,7% afirma ser a bicicleta o meio de transporte onde a dose inalada é maior, com exceção de 14,3% que indicam o carro. Por fim, nos artigos sobre a PM₁₀ foi possível observar que a totalidade aponta para a bicicleta

Tabela 2. Valores das doses inaladas obtidos em cada artigo

Fonte	Transporte	Dose inalada para CO	Dose inalada para PM _{2,5}	Dose inalada para PM ₁₀	Fórmula do cálculo da dose inalada	
<i>Particle exposure and inhaled dose while commuting in Lisbon</i> Correia et al. (2020)	Autocarro	-	27,8 µg	41,5 µg	$D_i = T_i * [\text{Poluente}] * t$	
	Bicicleta	-	66,7 µg	92,5 µg		
	Carro	-	14,0 µg	17,3 µg		
	Metro	-	22,5 µg	49,5 µg		
<i>Particle exposure and inhaled dose during commuting in Singapore</i> Tan et al. (2017)	Autocarro	205,7 µg	8,8 µg	-	$D_i = T_i * [\text{Poluente}] * t$	
	Metro	111,0 µg	8,9 µg	-		
	Carro (táxi)	292,9 µg	10,5 µg	-		
<i>Commuter exposure to PM_{2,5}, BC, and UFP in six common transport microenvironments in Sacramento, California</i> Ham et al. (2017)	Autocarro	-	0,3 µg/km	-	$D_i = \frac{T_i * [\text{Poluente}] * t}{d}$	
	Bicicleta	-	2,1 µg/km	-		
	Carro	-	0,3 µg/km	-		
	Metro	-	0,2 µg/km	-		
<i>A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona</i> De Nazelle et al. (2012)	Autocarro	3,0 µg	20,0 µg	-	$D_i = T_i * [\text{Poluente}] * t$	
	Bicicleta	3,3 µg	35,5 µg	-		
	Carro	9,0 µg	22,1 µg	-		
<i>Personal exposure to fine particulate air pollution while commuting: an examination of six transport modes on an urban arterial roadway</i> Chaney et al. (2017)	Autocarro	-	10,2 µg	-	$DI = TI * [\text{Poluente}] * t$	
	Bicicleta	-	18,0 µg	-		
	Carro	Janela aberta	-	10,8 µg		-
		Janela fechada	-	3,7 µg		-
<i>Air pollutant exposure and inhaled dose during urban commuting: a comparison between cycling and motorized modes</i> Ramos et al. (2016)	Autocarro	43,8 µg/km	2,3 µg/km	2,9 µg/km	$D_i = \frac{T_i * [\text{Poluente}] * t}{d}$	
	Bicicleta	48,8 µg/km	21,1 µg/km	24,0 µg/km		
	Carro	29,1 µg/km	1,8 µg/km	2,1 µg/km		
	Metro	12,2 µg/km	3,5 µg/km	4,3 µg/km		

Legenda:

D_i = Dose inalada;
T_i = Taxa de inalação;

[Poluente] = Concentração do poluente;
t = Tempo despendido;

d = Distância percorrida.

como o meio de transporte que envolve maior dose inalada. Para o NO₂ a dose inalada não foi determinada nos estudos apresentados.

Discussão

De acordo com os artigos recolhidos e com a análise da Tabela 1, e atendendo a que o presente trabalho passa por analisar os contextos de cada estudo (como o país) que têm condições de estudo distintas, verifica-se que as concentrações de poluentes obtidas nos movimentos pendulares são influenciadas por diversos fatores, como: o local de amostragem, uma vez que cada país/cidade possui características antropogénicas (urbanização) e condições atmosféricas diferentes; condições de tráfego, considerando o tipo de meios de transporte disponíveis (autocarro, bicicleta, carro e metro), dado que nem todos analisaram o mesmo tipo de transporte; o tipo de combustível utilizado (e.g., carro a diesel ou elétrico); idade do veículo, entre outros fatores. As doses inaladas, para além dos fatores referidos anteriormente que influenciam a exposição, dependem também da população em estudo, uma vez que a dose inalada de cada poluente é influenciada pela suscetibilidade individual, idade, género e condição física, do tempo de exposição e do tipo de meio de transporte (e.g., meio de transporte ativo ou passivo) utilizado (que influenciará a taxa de inalação).

Em relação aos artigos que referem o carro como o meio de transporte com maior concentração de CO, alguns relacionam as elevadas concentrações com o aumento da densidade de tráfego³² e a respetiva proximidade à fonte emissora^{17,19,31}. Estas concentrações estão também dependentes das condições de ventilação das cabines dos veículos, pois quando se encontram em zonas de maior tráfego, se a janela estiver aberta, a concentração tende a ser maior e, se a janela estiver fechada, a concentração tende a ser menor³⁴, na medida em que ocorrerá menor infiltração deste poluente. Considerando o sistema de ventilação dos veículos motorizados, nomeadamente o carro, Tan¹⁹ afirma que o CO, ao contrário das PM, não é removido pelos filtros de ar condicionado dos veículos, o que combinado com a recirculação de ar (ausência de entrada de ar fresco) aumenta a concentração de CO, devido à autocontaminação pelas emissões do escape¹⁹.

Para as concentrações de NO₂ os artigos selecionados assinalaram a bicicleta e o carro como os meios de transporte com maior concentração deste poluente. Para a bicicleta, MacNaughton *et al.*³⁰ justificam que as concentrações foram elevadas devido à ciclovia estar muito próxima da faixa de rodagem³⁰. No estudo de Zak *et al.*²², o carro foi o meio de transporte com maior concentração de NO₂. De acordo com os autores, os carros têm um sistema de ventilação mais próximo do solo (ao contrário dos autocarros que possuem este sistema de ventilação a uma altura mais elevada), ficando, deste modo, mais expostos às emissões do escape²². As amostragens efetuadas nos dois estudos não foram realizadas para o mesmo período do dia, ou para o mesmo ano, ou até para as mesmas condições de tráfego, pelo que outro motivo que pode influenciar a variação destas concentrações são as condições meteorológicas, nomeadamente as condi-

ções do vento que permitem uma maior diluição/dispersão do poluente no ambiente. A hora do dia influencia igualmente a exposição ao poluente, uma vez que, por exemplo, em horas de ponta existe um maior número de deslocações tanto de indivíduos como de transportes⁴¹.

É de realçar que, para o NO₂, os resultados não são relevantes tendo em conta o reduzido número de artigos encontrados sobre este tema, que são apenas dois.

Para as PM foi possível verificar que o metro é o meio de transporte com maior destaque. As razões que levam ao aumento das concentrações são o desgaste constante dos carris, das rodas e do sistema de travagem^{13,27,29,37}, a tipologia das diversas estações, dos túneis ferroviários, bem como do desgaste dos cabos metálicos por onde passa a corrente elétrica que permite a deslocação das carruagens¹⁴. Adicionalmente a estes fatores existe também uma ressuspensão das partículas devido à forte ventilação proveniente da passagem sucessiva dos veículos e à deslocação de passageiros^{13,37}.

Dentro do horário de circulação do metro também é possível observar variações nas concentrações das PM_{2,5} e PM₁₀, pois a hora do dia (hora de ponta) vai implicar um maior número de viagens dos metros, ou seja, uma maior ressuspensão de partículas²⁴. O facto de existirem estações subterrâneas e ao nível da superfície origina igualmente a variação das concentrações das partículas, pois influenciam as condições de ventilação, nomeadamente na entrada de ar fresco, permitindo a dispersão das partículas ou a diluição das concentrações quando as estações se encontram à superfície^{13,23,27}. Dentro das condições de ventilação distingue-se a ventilação ao nível da plataforma e também a dos túneis e dentro das carruagens, que pode ser controlada automaticamente de acordo com as temperaturas registadas ou manualmente pelo maquinista²⁹.

A exposição a PM_{2,5}, em particular nos carros, pode estar relacionada com as condições meteorológicas/estações do ano, uma vez que quando as temperaturas são mais baixas o motor dos veículos demora mais tempo a aquecer, logo existe maior emissão de poluentes para o ar²⁶.

O uso de ventilação pode igualmente influenciar as concentrações de PM. Os filtros dos veículos são eficazes na sua remoção, especialmente da PM₁₀, existindo assim uma diminuição da exposição a este poluente¹³.

Estabelecendo uma relação entre os pressupostos anteriores e as doses inaladas, descritas na Tabela 2, verifica-se que dois artigos referem que as doses inaladas de CO foram superiores no carro^{17,19}. Tan *et al.*¹⁹ referem que as paragens de táxi e de autocarro e os sinais de trânsito provocam uma redução da velocidade e, consequentemente, um aumento da concentração de poluentes, razão pela qual o táxi (carro), seguido do autocarro, são os meios de transporte que envolveram uma maior dose inalada. Já Nazelle *et al.*¹⁷ explicam que o carro é o meio de transporte que origina as maiores doses inaladas, devido à maior proximidade que os carros têm do escape dos outros veículos. De referir que, neste estudo, a janela do carro encontrava-se aberta durante as medições¹⁷. Moreno *et al.*³⁴ mostram também que existe um aumento das

concentrações de CO quando as janelas do veículo se encontram abertas³⁴.

Ramos *et al.*³¹ destacaram a bicicleta como o transporte que envolveu a maior dose inalada de CO, porque a taxa de inalação é maior nos ciclistas devido ao aumento do metabolismo, o que acaba por originar uma maior dose inalada neste meio de transporte³¹.

Em relação à PM, os artigos de Correia *et al.*, Chaney *et al.*, Nazelle *et al.*, Ham *et al.* e Ramos *et al.* afirmam ser a bicicleta o meio de transporte que provoca uma maior dose inalada. A bicicleta é um meio de transporte ativo que implica um maior esforço físico e que, conseqüentemente, leva a uma maior taxa de inalação. Adicionalmente, a duração do deslocamento tem um grande impacto nas doses inaladas associadas a este meio de transporte^{17,20,30-32,37}.

Ham *et al.*²⁰ afirmam ainda que a escolha do trajeto, assim como a distância entre a faixa de rodagem e a ciclovia, pode influenciar entre 15% a 75% a exposição dos ciclistas aos poluentes e, conseqüentemente, as doses inaladas.

Considerando que, em geral, as doses inaladas na bicicleta são maiores que nos outros transportes, devido à elevada taxa de inalação, deve-se atender a alguns fatores aquando da construção das ciclovias. Estas devem estar localizadas longe do tráfego e das estradas mais movimentadas¹⁷. Na construção destas vias deve ser dada prioridade à passagem das ciclovias em zonas verdes. Dois artigos observaram que as rotas longe do tráfego levavam a uma redução significativa da exposição^{13,20}.

Todos os países têm o dever de fazer cumprir as diretrizes estabelecidas para a limitação da poluição do ar. A OMS estabeleceu um conjunto de valores-guia para alguns dos poluentes, como a PM_{2,5}, a PM₁₀ e NO₂¹⁸. Contudo, para o CO não existe um valor-guia definido a nível mundial; porém, ao nível da União Europeia existe uma diretiva que estabeleceu valores limite de exposição (VLE) para este poluente⁴². Todos os valores-guia e VLE considerados estão representados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores-guia para PM e NOx e valor limite de exposição para o CO

Poluentes atmosféricos	PM _{2,5}	PM ₁₀	NOx	CO
Valores-guia da OMS e VLE da UE	25 µg/m ³ para 24h (OMS)	50 µg/m ³ para 24h (OMS)	200 µg/m ³ para 1h (OMS)	10 000 µg/m ³ para 8h (UE)

Desta forma, avaliando a conformidade dos valores obtidos na Tabela 1, verificou-se que todos os valores de CO estão conformes com os VLE estabelecidos pela Agência Europeia do Ambiente⁴². Para o NO₂, verificou-se que 75% das concentrações medidas nos estudos realizados cumprem com os valores-guia da OMS¹⁸. Para as PM_{2,5} e para as PM₁₀, 41,3% e 44,8% das concentrações, respetivamente, estão abaixo dos valores-guia da OMS¹⁸.

Conclusão

Neste estudo de revisão foram analisados artigos com o objetivo de informar a população sobre qual o melhor meio de transporte a utilizar durante os seus movimentos pendulares, tendo em conta a exposição em cada transporte. De forma a dar resposta aos objetivos deste estudo de revisão, o autocarro é aquele que, no geral, apresenta menores concentrações em relação a todos os poluentes analisados. Os transportes onde se verifica uma maior exposição são o carro e o metro, sendo aconselhado substituir estes por outro meio de transporte como o autocarro e/ou bicicleta. Também podem ser melhoradas as condições de ventilação destes transportes, usando, para esse efeito, filtros mais eficazes na remoção de poluentes.

Para esta revisão foi importante considerar que cada artigo apresenta variáveis específicas que podem influenciar nas concentrações e dose inalada dos poluentes estudados e, desta forma, cada artigo analisado apresentou condições específicas, como as condições atmosféricas, a morfologia

do trajeto, as condições de ventilação dos veículos (janelas), a estação do ano, a densidade populacional, a densidade de tráfego e os hábitos e a deslocação da população (e.g., no autocarro e metro podem provocar ressuspensão de partículas).

Conclui-se que a utilização do transporte ativo, a bicicleta, é a que apresenta maiores benefícios para a saúde, pois envolve mais atividade física. No entanto, as maiores doses inaladas podem desaconselhar a sua utilização. Por isso, é necessário definir adequadamente a localização das ciclovias, dando preferência à passagem por áreas verdes ou ciclovias mais afastadas do tráfego e, ainda, à utilização de barreiras para as separar das faixas de rodagem, por exemplo, árvores.

Agradecimentos

Este trabalho teve o apoio de fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto ExpoLIS (Lisboa-01-0145-FEDER-032088).

Referências bibliográficas

1. World Health Organization. Air pollution [homepage]. WHO; 2018 [cited 2020 May 17]. Available from: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
2. European Environment Agency. Air quality in Europe 2019 [Internet]. EEA; 2019 Jun 24 [cited 2020 May 16]. Available from: <https://www.eea.europa.eu/themes/publications/air-quality-in-europe-2019>

3. OMS. Ambient air pollution: Pollutants [Internet]. World Health Organization. World Health Organization; [citado 16 de Maio de 2020]. Disponível em: <https://www.who.int/airpollution/ambient/pollutants/en/>
4. Karagulian F, Belis CA, Dora CF, Prüss-Ustün AM, Bonjour S, Adair-Rohani H, et al. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): a systematic review of local source contributions at global level. *Atmos Environ*. 2015;120:475-83.
5. Wilson RC, Saunders PJ, Smith G. An epidemiological study of acute carbon monoxide poisoning in the West Midlands. *Occup Environ Med*. 1998;55(11):723-8.
6. European Environment Agency. Air quality in Europe: 2017 report [Internet]. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2017 [cited 2020 May 22]. Available from: <http://dx.publications.europa.eu/10.2800/850018>
7. Von Schneidemesser E, Steinmar K, Weatherhead EC, Bonn B, Gerwig H, Quedenau J. Air pollution at human scales in an urban environment: impact of local environment and vehicles on particle number concentrations. *Sci Total Environ*. 2019;688:691-700.
8. Antrop M. Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landsc Urban Plan*. 2004;67(1-4):9-26.
9. Raza W, Forsberg B, Johansson C, Sommar JN. Air pollution as a risk factor in health impact assessments of a travel mode shift towards cycling. *Glob Health Action*. 2018;11(1):1429081.
10. Almeida-Silva M, Canha N, Freitas MC, Dung HM, Dionísio I. Air pollution at an urban traffic tunnel in Lisbon, Portugal: an INAA study. *Appl Radiat Isot*. 2011;69(11):1586-91.
11. Instituto Nacional de Estatística. Estatísticas dos transportes e comunicações 2018 [Internet]. Lisboa: INE; 2019 [cited 2020 May 16]. Available from: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=358630755&PUBLICACOESstema=55488&PUBLICACOESmodo=2
12. Instituto Nacional de Estatística. Mobilidade e funcionalidade do território nas Áreas Metropolitanas do Porto e de Lisboa 2017 [Internet]. Lisboa: INE; 2018. Available from: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=349495406&PUBLICACOESmodo=2&xlang=pt
13. Correia C, Martins V, Cunha-Lopes I, Faria T, Diapouli E, Eleftheriadis K, et al. Particle exposure and inhaled dose while commuting in Lisbon. *Environ Pollut*. 2020;257:113547.
14. Karanasiou A, Viana M, Querol X, Moreno T, de Leeuw F. Assessment of personal exposure to particulate air pollution during commuting in European cities: recommendations and policy implications. *Sci Total Environ*. 2014;490:785-97.
15. Alameddine I, Abi Esber L, Bou Zeid E, Hatzopoulou M, El-Fadel M. Operational and environmental determinants of in-vehicle CO and PM_{2.5} exposure. *Sci Total Environ*. 2016;551-552:42-50.
16. Koolen CD, Rothenberg G. Air pollution in Europe. *ChemSusChem*. 2019;12(1):164-72.
17. de Nazelle A, Fruin S, Westerdahl D, Martinez D, Ripoll A, Kubesch N, et al. A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona. *Atmos Environ*. 2012;59:151-9.
18. World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution [homepage]. WHO; 2018 May 18 [cited 2020 May 17]. Available from: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
19. Tan SH, Roth M, Velasco E. Particle exposure and inhaled dose during commuting in Singapore. *Atmos Environ*. 2017;170:245-58.
20. Ham W, Vijayan A, Schulte N, Herner JD. Commuter exposure to PM_{2.5}, BC, and UFP in six common transport microenvironments in Sacramento, California. *Atmos Environ*. 2017;167:335-45.
21. Strasser G, Hiebaum S, Neuburger M. Commuter exposure to fine and ultrafine particulate matter in Vienna. *Wien Klin Wochenschr*. 2018;130(1-2):62-9.
22. Žak M, Melaniuk-Wolny E, Widziewicz K. The exposure of pedestrians, drivers and road transport passengers to nitrogen dioxide. *Atmos Pollut Res*. 2017;8(4):781-90.
23. Carteni A, Cascetta F, Campana S. Underground and ground-level particulate matter concentrations in an Italian metro system. *Atmos Environ*. 2015;101:328-37.
24. Cusack M, Talbot N, Ondráček J, Minguillón MC, Martins V, Klouda K, et al. Variability of aerosols and chemical composition of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ on a platform of the Prague underground metro. *Atmos Environ*. 2015;118:176-83.
25. Heberle SM, Lorini C, Rosa MS, Barros N. Evaluation of bus driver exposure to nitrogen dioxide levels during working hours. *Atmos Environ*. 2019;216:116906.
26. Juda-Rezler K, Reizer M, Maciejewska K, Błaszczak B, Klejnowski K. Characterization of atmospheric PM_{2.5} sources at a Central European urban background site. *Sci Total Environ*. 2020;713:136729.
27. Rivas I, Kumar P, Hagen-Zanker A. Exposure to air pollutants during commuting in London: are there inequalities among different socio-economic groups? *Environ Int*. 2017;101:143-57.
28. Chaney RA, Sloan CD, Cooper VC, Robinson DR, Hendrickson NR, McCord TA, et al. Personal exposure to fine particulate air pollution while commuting: an examination of six transport modes on an urban arterial roadway. *PLoS One*. 2017;12(11):e0188053.
29. Ramos MJ, Vasconcelos A, Faria M. Comparison of particulate matter inhalation for users of different transport modes in Lisbon. *Transp Res Procedia*. 2015;10:433-42.
30. MacNaughton P, Melly S, Vallarino J, Adamkiewicz G, Spengler JD. Impact of bicycle route type on exposure to traffic-related air pollution. *Sci Total Environ*. 2014;490:37-43.
31. Ramos CA, Wolterbeek HT, Almeida SM. Air pollutant exposure and inhaled dose during urban commuting: a comparison between cycling and motorized modes. *Air Qual Atmos Health*. 2016;9:867-79.

32. Van Wijnen JH, Verhoeff AP, Jans HW, van Bruggen M. The exposure of cyclists, car drivers and pedestrians to traffic-related air pollutants. *Int Arch Occup Environ Health*. 1995;67(3):187-93.
33. Moreno T, Reche C, Rivas I, Cruz Minguillón M, Martins V, Vargas C, et al. Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona. *Environ Res*. 2015;142:495-510.
34. Moreno T, Pacitto A, Fernández A, Amato F, Marco E, Grimalt JO, et al. Vehicle interior air quality conditions when travelling by taxi. *Environ Res*. 2019;172:529-42.
35. Molle R, Mazoué S, Géhin É, Ionescu A. Indoor-outdoor relationships of airborne particles and nitrogen dioxide inside Parisian buses. *Atmos Environ*. 2013;69:240-8.
36. Borrego C, Tchepel O, Costa AM, Martins H, Ferreira J, Miranda AI. Traffic-related particulate air pollution exposure in urban areas. *Atmos Environ*. 2006;40(37):7205-14.
37. Correia CG. Exposição a partículas atmosféricas e dose inalada em movimentos pendulares em Lisboa [dissertation]. Lisboa: Instituto Técnico Superior; 2018.
38. Almeida-Silva M, Pilou M, Housiadas C, Almeida SM. Internal dose of particles in the elderly: modeling based on aerosol measurements. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2018;25(24):23645-56.
39. Buonanno G, Giovinco G, Morawska L, Stabile L. Tracheobronchial and alveolar dose of submicrometer particles for different population age groups in Italy. *Atmos Environ*. 2011;45(34):6216-24.
40. United States Environmental Protection Agency. Inhalation rates. In: US EPA, editor. *Exposure factors handbook*. EPA; 2011. chapter 6.
41. Kendrick CM, Koonce P, George LA. Diurnal and seasonal variations of NO, NO₂ and PM_{2.5} mass as a function of traffic volumes alongside an urban arterial. *Atmos Environ*. 2015;122:133-41.
42. European Environment Agency. 6.7. Carbon monoxide (CO) [homepage]. EEA; 2016 Apr 20 [cited 2020 May 20]. Available from: <https://www.eea.europa.eu/publications/2-9167-057-X/page024.html>

Artigo recebido em 17.07.2020 e aprovado em 29.06.2021