



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Quantificação de custos externos ambientais no sector dos transportes rodoviários:

Aplicação a veículos pesados de mercadorias

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente

Autor

Ana Margarida Casimiro da Silva

Orientador

Oxana Anatolievna Tchepele

(Professora Doutorada da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra)

Co-orientador

Kelly Ann Pitera

(Professora Doutorada da Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia)

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2014

AGRADECIMENTOS

Com este trabalho chego ao final de uma etapa académica e pessoal, durante a qual cresci imenso com base em todas as conquistas, que não são possíveis sem algumas quedas.

Um muito obrigada à minha orientadora, Professora Oxana Tchepel, por toda a disponibilidade e amabilidade, por todas as sugestões e esclarecimentos prestados, desde o processo de escolha do tema de tese até ao culminar deste trabalho.

Agradeço à Professora Kelly Pitera pela receptividade em me auxiliar durante o período que estive na NTNU a realizar este trabalho, fazendo-me sentir em casa com a sua simpatia.

Os meus agradecimentos ao investigador Tomas Levin pelo seu tempo, que sei ser escasso, e pelas recomendações pertinentes.

A todas as entidades que me disponibilizaram dados para o presente trabalho expresso a minha gratidão: Instituto Nacional de Estatística (INE), Estradas de Portugal, Brisa e IMT/INIR.

Ao projeto EMSURE - Energy and Mobility for SUstainable REgions¹ agradeço a oportunidade de permitir que estudos nesta área sejam valorizados. Este projeto tem por desafio desenvolver modelos, metodologias e tecnologias que assistam decisores e companhias no processo de decisão de tornar a Região Centro de Portugal mais sustentável no que toca a mobilidade e energia.

Obrigada pelos momentos especiais aos que durante o percurso académico entraram na minha vida e a conseguiram fazer brilhar.

Ao meu companheiro, grande amigo e braço direito, não há palavras para agradecer a preciosa ajuda, apoio e força durante este período.

À minha família, em especial à minha Mãe, pelos esforços que tem feito por mim, desde sempre. Obrigada por acreditarem constantemente em mim.

¹ CENTRO-07-0224-FEDER-002004

RESUMO

A fim de implementar um sistema de transporte mais sustentável e justo, que é um elemento-chave da política comum de transportes, os custos associados às externalidades do sector dos transportes, p.e. poluição atmosférica, devem ser internalizados na economia. Para tal é fundamental que os custos externos sejam estimados.

O objetivo desta dissertação de mestrado é estimar os custos externos da poluição atmosférica do sector dos transportes rodoviários, com foco em veículos pesados de mercadorias, sendo ainda necessário para este fim estimar as emissões associadas à poluição atmosférica.

Com base em abordagens atualmente disponíveis, selecionadas a partir de uma revisão da literatura, a metodologia proposta na Diretiva Eurovinheta foi utilizada para quantificar os custos externos da poluição do ar e a metodologia ARTEMIS foi utilizada para quantificar os fatores de emissão de NO_x e PM. Aplicaram-se estas metodologias a uma área de estudo, no Distrito de Coimbra, utilizando informações sobre velocidade média de circulação, inclinação de estrada, contagens de tráfego, composição da frota e distâncias percorridas.

Os resultados obtidos neste trabalho fornecem informações quantitativas sobre os custos externos do transporte rodoviário, relevantes no quadro da legislação europeia no que concerne os impactes da poluição do ar e transportes sustentáveis, podendo ser úteis no processo de decisão a nível local. Os valores de custos externos obtidos variam entre 0.5 a 14 cent.km⁻¹ por veículo, dependendo principalmente do peso, tecnologia (classe de emissão) e tipo de veículo (Articulado ou Rígido). O custo total da poluição atmosférica na área de estudo seria cerca de quatro milhões de euros por ano, tendo em conta os dados de tráfego de 2012, para a área de estudo.

Palavras-chave: custos externos; poluição do ar; emissões do transporte rodoviário; Veículos pesados de mercadorias.

ABSTRACT

In order to implement a more sustainable and fair transport system, which is a key-element of the common transport policy, the costs associated with the externalities of the transport sector, p.e. atmospheric pollution, must be internalized into the economy. In order to do so, it is fulcral that the external costs be estimated.

The purpose of this Master thesis is to estimate the external costs of air pollution and emissions related derived from the road transport sector, focusing on Heavy Goods Vehicles. To this end, it is necessary to estimate the emissions associated with atmospheric pollution.

Based on currently available approaches, selected from a literature review, the methodology proposed in the Eurovignette Directive was used to quantify the external costs of air pollution, and the ARTEMIS methodology was used to quantify the emission factors of NO_x and PM. These methodologies were applied to a selected study area, in the district of Coimbra, by using data on the average velocity of circulation, road slope, traffic count, vehicle pool composition and travelled distance.

The results obtained in this paper provide quantitative information on the external costs of road transport relevant in the framework of European legislation in what concerns air pollution impacts and sustainable transport, being potentially useful in the decision process on a national level. The obtained external costs values vary between 0.5 to 14 cent.km⁻¹ per vehicle, depending mainly on the vehicle weight, technology (emission class) and vehicle type (articulated or rigid). The total cost of atmospheric pollution in the study area would be around four million of euros per year, when taking in account traffic data for the year of 2012, in respect to this study area.

Key words: external costs; air pollution; road transport sector emissions; Heavy Goods Vehicles.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento e Motivação.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da Dissertação.....	3
2. ESTADO DA ARTE.....	4
2.1. Transportes Rodoviários.....	4
2.1.1. Evolução dos Transportes Rodoviários de Mercadorias.....	4
2.1.2. Externalidades.....	6
2.1.3. Diretiva Eurovinheta.....	7
2.2. Poluição Atmosférica.....	8
2.2.1. Considerações gerais.....	8
2.2.2. Emissões no setor dos transportes rodoviários.....	10
2.2.3. Medidas e Estratégias para redução de emissões.....	12
2.2.4. Metodologias de quantificação das emissões.....	13
2.2.5. Estado Atual da Poluição do Ar.....	15
2.3. Custos externos.....	17
2.3.1. Definição e enquadramento.....	17
2.3.2. Metodologias de quantificação de custos externos.....	18
2.3.3. Moneterização da Poluição do Ar.....	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1. Área de Estudo.....	23
3.1.1. Caracterização Geral.....	23
3.1.2. Geografia.....	24
3.1.3. Rede Viária.....	25
3.2. Metodologia de cálculo de emissões.....	26
3.2.1. Modelo ARTEMIS.....	26
3.2.2. Cálculo de fatores de emissão baseado na metodologia ARTEMIS.....	29
3.2.2.1. Considerações Gerais.....	29
3.2.2.2. Aplicação de metodologia.....	31
3.3. Metodologia de cálculo de custo externo da Poluição do ar.....	32
3.4. Dados de Entrada.....	35

3.4.1. Altimetria.....	35
3.4.2. Rede de Estradas.....	36
3.4.3. Dados Estatísticos de tráfego.....	36
3.4.3.1. Tráfego por tipo de estrada.....	36
3.4.3.2. Distribuição do Tráfego por subgrupos de veículos.....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1. Quantificação de emissões.....	42
4.1.1. Fatores de Emissão.....	42
4.1.2. Emissões.....	46
4.2. Quantificação de custo externo da poluição atmosférica.....	48
4.2.1. Valor estimado para a área em estudo.....	48
4.2.2. Custo externo total na área em estudo.....	50
5. CONCLUSÃO.....	51
5.1. Considerações Finais.....	51
5.2. Limitações.....	52
5.3. Trabalho Futuro.....	53
BIBLIOGRAFIA.....	54
ANEXO A.....	A-1
ANEXO B.....	B-9
ANEXO C.....	C-10

SIMBOLOGIA

E – emissão total de poluente ($\text{g.km}^{-1}.\text{unidade tempo}^{-1}$ ou $\text{g.unidade tempo}^{-1}$)

$EF = e$ – fator de emissão por unidade de atividade de transporte ($\text{g.km}^{-1}.\text{v}^{-1}$)

I – Custo total externo ($\text{€}.\text{km}^{-1}.\text{unidade tempo}^{-1}$ ou $\text{€}.\text{unidade tempo}^{-1}$)

M – Percentagem de veículos (%)

PC – custo monetário de um poluente ($\text{€}.\text{g}^{-1}$)

PCV – custo da poluição atmosférica de um veículo ($\text{€}.\text{km}^{-1}.\text{v}^{-1}$)

V – Tráfego Médio Diário Anual de veículos pesados de mercadorias (v.dia^{-1})

$\%PM$ – percentagem total de pesados de mercadorias a circular nos segmentos de autoestrada (%) fornecida pelo INE.

α – constante determinada empiricamente para determinar o efeito a nível de saúde.

δc – variação da concentração (g.m^{-3})

P – fração afetada da população (%).

R – resposta a um impacte (nr de casos, nr de dias)

a – atividade de transporte (TMDA ou vkt).

i – classe de emissão de um veículo (Convencional, Euro I, Euro II ...Euro V)

j – localização de estrada (Suburbana, Interurbana)

k – tipo de poluente (NO_x , PM)

n – categoria de peso do veículo

q – tipo de estrada (AE ou IC/IP)

r – estrada (A1, A13, A14, A17, IC2, IC6, IC7, IC8, IP3)

s – segmento de estrada

ss – subsegmento de estrada

t – tipo de veículo (articulado ou rígido)

d – inclinação média (%)

f – categoria de inclinação ARTEMIS (0, 2, 4, 6)

l – comprimento (m)

ABREVIATURAS

ACAP – Associação Automóvel De Portugal

AE – Autoestrada

AEA – Agência Europeia do Ambiente

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

ARTEMIS - Assessment and Reliability of Transport *Emission* Models and Inventory Systems

AT – Articulated Truck

CAFE- Clean Air for Europe

CE – Comunidade Europeia

CEE – Comunidade Económica Europeia

CH₄ – metano

CO – monóxido de carbono

CO₂ – dióxido de carbono

COPERT - Computer Program to calculate Emissions from Road Transport

COST – European Cooperation in Science and Technology

COV – Compostos Orgânicos Voláteis

COVNM - Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos

DEHM – Danish Eulerian Hemispheric Model

DEM – Digital Elevation model

DEM – Digital Elevation Model

DPF – Diesel Particles Filter

ECE – Economic Comission for Europe

EEA – European Environment Agency

EEE – Espaço Económico Europeu

EFV – Emissões totais de poluentes

ELR – European Load Response

EMEP – European Monitoring and Evaluation Program

EMEP – European Monitoring and Evaluation Programme

EPA – US Environment Protection Agency

ESC – European Stationary Cycle

ESCAPE – European Study of Cohorts for Air Pollution Effects

ETC – European Transient Cycle

EU – European Union
EVA – Economic Valuation of Air pollution
EXIOPOL – A New Environmental Accounting Framework Using Externality Data and Input-Output Tools for Policy Analysis
ExternE – Externalities of Energy
GEE – Greenhouse gas emissions
GEIA/EDGAR – Global Emission Inventory Activity / Emission Database for Global Atmospheric Research
Hab – habitantes
HBEFA – HandBook Emission FACTors for road transport
HC – hidrocarbonetos
HDV – Heavy Duty Vehicles
HEIMTSA – Health and Environment Integrated Methodology and Toolbox for Scenario Assessment
HGV – Heavy Goods Vehicles
IC – Itinerário Complementar
INE – Instituto Nacional de Estatística
INE – Instituto Nacional de Estatística
INTARESE – Integrated Assessment of Health Risks of Environmental Stressors in Europe
IP – Itinerário Principal
IPA – Impact Pathway Approach
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
km² – quilómetro quadrado
m – metro
MM5v3 – Mesoscale Numerical Model
MOVES – Motor Vehicle Emission Simulador
NH₃ – Amónia
NO_x – Óxidos de Azoto
NUT – Nomenclatura das Unidades Territoriais para fins estatísticos
O₃ – Ozono
OMS – Organização Mundial de Saúde
PHEM – Passenger car and Heavy duty *Emission Model*
PM – Particulate Matter
R² – coeficiente de determinação
RT – Rigid Truck
SCR – Selective Catalytic Redution
SO₂ – dióxido de enxofre
TFEIP – Task Force on Emission Inventories and Projections
THC – Hidrocarbonetos Totais

tkm – tonelada-quilómetros percorridos

TMDA – Tráfego Médio Diário Anual

TMDM – Tráfego Médio Diário Mensal

v - veículo

vkt – veículo-quilómetros percorridos

VSL – Value of a Statistical Life

WHO – World Health Organization

WHSC – World Harmonized Stationary Cycle

WHTC – World Harmonized Transient Cycle

WTA – Willingness To Accept

WTP – Willingness To Pay

YOLL – Years Of Life Lost

ZER – Zona Emissões Reduzidas

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Motivação

É inegável a preciosa importância que o sector dos transportes tem para a sociedade, eliminando barreiras geográficas que desde sempre têm servido de entrave ao pleno desenvolvimento global da humanidade. Desta forma, este sector contribui para o crescimento económico permitindo a criação de um mercado globalizado e sem fronteiras.

No entanto, nem só benefícios advêm deste sector. Os transportes são responsáveis por efeitos negativos, nomeadamente a nível ambiental, denominando-se estes por efeitos externos. Destaca-se a poluição atmosférica, poluição sonora, bem como efeitos a nível de alterações climáticas, sendo que estes problemas afetam o meio ambiente natural, como também provocam incidências a nível social e económico. Estes efeitos, na maioria dos casos, não são suportados pelo causador, mas sim pelos afetados, o que não é desejável do ponto de vista económico-ambiental.

Para alcançar uma mobilidade mais sustentável, objetivo da Política Comum de Transportes, um caminho possível será a internalização destes efeitos externos, através de mecanismos de mercado que permitam que estes sejam incluídos no processo de decisão dos utilizadores dos transportes, como por exemplo taxas. Este objetivo é mencionado no “Livro Branco sobre os Transportes” de 2011. Esta internalização é habitualmente conhecida pelo princípio do “poluidor-pagador” e princípio do “utilizador-pagador”, os quais têm raízes na legislação da União Europeia (van Essen et al., 2012). Podem-se distinguir três objetivos, segundo (van Essen et al., 2008), para introduzir políticas de internalização no sector dos transportes:

- ✓ Influenciar o comportamento, para melhorar a eficiência do sistema de transportes, através de, por exemplo, redução de impactes ambientais do tráfego e diminuição do congestionamento.
- ✓ Gerar receita para possíveis melhorias ou criação de novas infraestruturas e/ou para cobrir os custos de gestão, operação e manutenção das infraestruturas.
- ✓ Aumentar a justiça social.

Focando-nos especificamente nos veículos pesados de mercadorias e nas suas consequências a nível de efeitos na saúde devido a poluição atmosférica, estima-se que este efeito externo custe aos países membros do Espaço Económico Europeu (EEE) entre 43 a 46 biliões de euros por

ano, o que corresponde a cerca de metade do custo da poluição do ar pela totalidade do sector do transporte rodoviário (EEA, 2013d).

Torna-se portanto evidente a relevância de minimizar os efeitos externos, concretamente da poluição atmosférica devido a veículos pesados de mercadorias que tem tamanho impacte na saúde. A Diretiva Eurovinheta (2011/76/EU) trouxe novas recomendações neste sentido, indicando que os estados membros devem internalizar este custo externo a partir de 2013, por forma a introduzir no mercado incentivos para usar veículos mais limpos e adaptar a escolha dos modos de transporte de mercadorias.

É neste contexto que surge esta dissertação, que pretende estimar o custo externo da poluição atmosférica devido aos veículos pesados de mercadorias, para uma área em estudo em Portugal, no Distrito de Coimbra, a qual até ao momento presente não teve um estudo detalhado debruçado sobre esta temática.

1.2 Objetivos

Nesta dissertação pretende-se obter informação quantitativa relativamente ao custo externo da poluição atmosférica devido ao sector rodoviário, especificamente, veículos pesados de mercadorias. Para tal, com base no estado atual do conhecimento, definir-se-á a metodologia a implementar, sendo que esta implica a quantificação das emissões da poluição atmosférica, nomeadamente para matéria particulada (PM) e óxidos de azoto (NO_x).

O objeto em estudo serão os Itinerários Principais (IP), Itinerários Complementares (IC) e Autoestradas (AE), no distrito de Coimbra.

As emissões e o custo externo, para cada poluente, serão calculados por classe de emissão do veículo, peso de veículo, tipo de veículo (Rígido ou Articulado) e tipo de estrada. Para o efeito, ter-se-á em conta a inclinação das estradas em estudo, a velocidade de circulação dos veículos bem como informação estatística relativa a contagem de tráfego e composição da frota.

Para atingir os objetivos definidos podem implementar-se as seguintes tarefas:

- Cálculo de fatores de emissão por veículo, estrada e poluente ($\text{g.v}^{-1}.\text{km}^{-1}$).
- Cálculo de emissões ($\text{g.km}^{-1}.\text{dia}^{-1}$) para a área em estudo.
- Cálculo do custo da poluição do ar por veículo e estrada percorrida ($\text{€}.\text{v}^{-1}.\text{km}^{-1}$).
- Cálculo de custos externos totais ($\text{€}.\text{km}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ ou $\text{€}.\text{dia}^{-1}$) para a área em estudo.

Para concretizar estas tarefas e atingir os objetivos far-se-á uma revisão da bibliográfica e, posteriormente, definir-se-á o modelo conceptual de cálculo. De seguida, aplicar-se-á o modelo na área de estudo e, por fim, analisar-se-ão os resultados.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos principais.

O capítulo 1, *Introdução*, ostenta a importância da temática patente neste estudo, com base no enquadramento e motivação, onde se apresenta a relevância social e científica do tema e, portanto, as razões que levam à necessidade da concretização deste estudo. São identificados, de modo conciso, os objetivos a que se propõe esta dissertação, e por fim, apresenta-se a presente estrutura da dissertação.

No capítulo 2, *Estado da Arte*, apresenta-se uma revisão bibliográfica de estudos desenvolvidos nesta área.

O capítulo 3, *Materiais e Métodos*, expõe o procedimento adotado a fim de obter os resultados propostos nos objetivos, com base nos métodos apresentados no estado da arte. Aqui são expostos, em detalhe, os métodos escolhidos, as aproximações consideradas, bem como os dados necessários.

No capítulo 4, *Resultados e Discussão*, é revelado o produto final da dissertação bem como a análise crítica deste.

Por fim, no capítulo 5, *Conclusão*, apresentam-se as principais conclusões obtidas do trabalho e são sugeridos algumas recomendações para desenvolvimentos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo em questão pretende analisar o conhecimento atual de três pontos-chave associados aos objetivos deste trabalho: Transportes rodoviários, Poluição Atmosférica e Custo Externo. É efetuado um enquadramento teórico a nível de definições, são expostas as metodologias mais atualizadas e melhor recomendadas, e é analisada a evolução temporal de determinados parâmetros relevantes.

2.1 Transportes Rodoviários

No contexto do presente trabalho, esta secção pretende elucidar acerca da forma como os transportes de mercadorias rodoviários têm vindo a evoluir a nível Europeu e Nacional. Adicionalmente, pretende esclarecer de uma forma breve acerca das externalidades associadas a este sector e dos mecanismos que atualmente existem para as minimizar. Por fim, enquadra-se a nível legal a diretiva europeia sobre taxação de veículos pesados de mercadorias, a qual dá suporte a este trabalho.

2.1.1 Evolução dos Transportes Rodoviários de Mercadorias

Nos países da EU-27, estatísticas do Eurostat mostram que a procura pelo transporte de mercadorias em meio rodoviário cresceu durante as últimas décadas, como se pode observar na figura 2.1. O principal fator que estimulou este crescimento no transporte de mercadorias está associado à liberalização do mercado interno europeu (Boer *et al.*, 2009). No entanto, nos últimos anos, desde 2007, tem-se verificado um decréscimo de transporte de mercadorias, tanto no modo rodoviário como nos restantes, devido à situação de crise económica dentro do espaço europeu.

Em 2011, o transporte rodoviário de mercadorias efetuado dentro do espaço Europeu (EU-27) foi estimado em 1732 biliões de tkm, isto é o volume de mercadorias transportado por veículos rodoviários, medido em biliões de toneladas vezes o número de quilómetros viajados. O modo rodoviário apresenta-se como sendo o mais utilizado para o transporte de bens, representando no ano 2011 cerca de 45% do total, seguindo-se o modo marítimo com cerca de 37% e o ferroviário com 11% (Publications Office of the European Union, 2013).

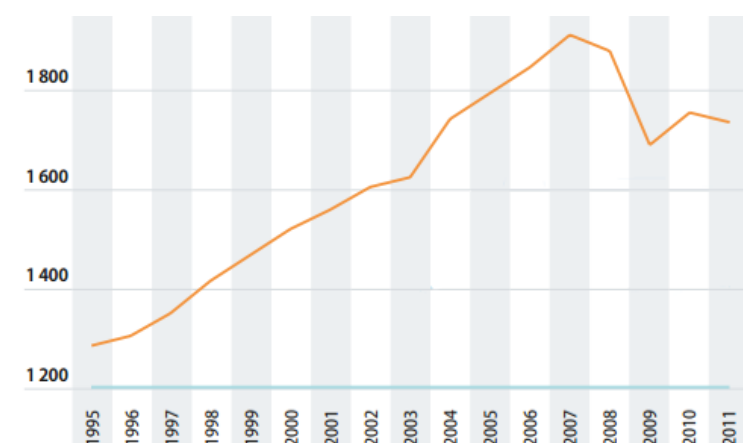


Figura 2.1 – Transporte rodoviário de mercadorias na EU-27 em bilhões de tkm. Fonte: (Publications Office of the European Union, 2013)

Também em Portugal, desde 2007, é notório um decréscimo do número de veículos-quilómetros percorridos, como expresso na seguinte figura 2.2.

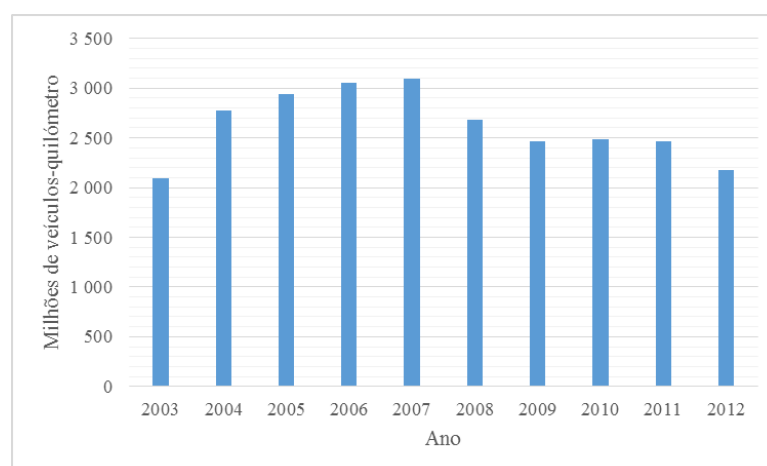


Figura 2.2 – Evolução do transporte de mercadorias em Portugal. Fonte: eurostat@

Segundo o INE, em 2012, a atividade do transporte rodoviário de mercadorias apresentou um decréscimo face a 2011, expressa pelos decréscimos apresentados na quantidade de mercadorias transportadas (-32,9%), na distância percorrida (-21,3%) e no volume de transporte (-20,6% de toneladas-quilómetro) (Instituto Nacional de Estatística, 2013).

2.1.2 Externalidades

Apesar dos benefícios associados ao sector dos transportes rodoviários, são diversos os prejuízos que provocam na sociedade. Os efeitos negativos podem ser intrasectoriais, como é o caso dos congestionamentos, acidentes e danos nas vias. Por outro lado, podem ser intersectoriais, como é o caso da poluição do ar e sonora, emissões de gases com efeito de estufa, efeitos na natureza, dependência de combustíveis fósseis, efeitos a montante/jusante (p.e. gastos de energia para fabrico dos veículos) e efeitos urbanos (p.e. perdas de tempo causadas a peões e redução de espaço para circulação de bicicletas). Estes efeitos afetam terceiros, devido a quem faz a escolha de usar o sector dos transportes não ter incluído estas consequências na decisão de utilizar este sector. Quando tal acontece fala-se de externalidades. A razão para tal deve-se à não existência de um mercado funcional, onde quem origina os efeitos externos possa comprar o direito de o fazer diretamente a quem é afetado (van Essen *et al.*, 2012).

Por forma a lidar com o problema das externalidades do sector dos transportes a Economia oferece dois tipos de instrumentos legais: políticas de comando-e-controle e as políticas de incentivo (Santos *et al.*, 2010).

As políticas de comando-e-controle são as regulamentações governamentais que obrigam os consumidores e os produtores a mudar o seu comportamento, incluindo padrões de emissão de veículos, padrões de combustível, criação de zonas de emissões reduzidas e restrições à circulação. Estas apresentam um custo baixo de implementação, e portanto são vastamente utilizadas, mas no entanto os seus resultados são pouco eficientes e viáveis para alcançar um mercado eficiente.

As políticas de incentivo podem basear-se no controlo da quantidade, nomeadamente controlo das emissões de GEE através de um mercado de emissões, as quais até à data nunca foram implementadas no sector dos transportes. Por outro lado, estas políticas podem basear-se em instrumentos fiscais, nomeadamente taxas e ou subsídios sobre a compra e posse do veículo (subsídios para incentivar a compra de veículos com emissões reduzidas), taxa sobre uso do veículo (relativa a emissões, combustível, distância percorrida, congestionamento). Este tipo de medidas pode levar a um mercado eficiente.

Conclui-se que existem diversos mecanismos económicos que os governos podem utilizar para alcançar um modelo de transporte rodoviário mais sustentável, podendo estes instrumentos ser usados separada ou em conjunto, sendo indiscutível a sua necessidade de implementação.

No presente trabalho o foque em estudo será o mecanismo de taxação de emissões durante o uso do veículo.

2.1.3 Diretiva Eurovinheta

Em 2011, surgiu uma emenda à Diretiva 1999/62/CE do Parlamento Europeu, também conhecida por Diretiva Eurovinheta, relativa à aplicação de imposições aos veículos pesados de mercadorias pela utilização de certas infraestruturas (Autoestradas). Essa emenda, dada pela Diretiva 2011/76/EU, veio introduzir uma permissão aos Estados-Membros para que incorporem nas portagens cobradas aos veículos pesados de mercadorias, acima de 3.5ton, para além do custo da utilização de infraestrutura, um montante correspondente ao custo da poluição sonora e atmosférica originada pelo tráfego. A Comissão Europeia usou os resultados do *Handbook on external costs* para elaborar a revisão (European Commission, 2011).

O objetivo é promover uma tarifação diferenciada com base nos custos externos, como meio para fomentar a sustentabilidade dos transportes, sendo que as receitas adicionais geradas pelas taxas de externalidade deverão ser utilizadas em benefício do sector dos transportes. Incluir o custo externo ambiental através de portagens constitui um instrumento económico equilibrado e eficiente para instituir uma política de transportes sustentável, sem que se criem distorções de concorrência no mercado interno, uma vez que são pagas por todos os operadores, independentemente do Estado-Membro de que sejam. Esta emenda apresenta a metodologia para calcular o custo externo, juntamente com certos valores limite apresentados no quadro 2.1. No caso do custo externo da poluição do ar, a metodologia sugerida baseia-se na equação (1):

$$PCV_{i,j} = \sum_k EF_{i,k} \times PC_{j,k} \quad (1)$$

Sendo, $PCV_{i,j}$ o custo da poluição atmosférica devido a um veículo de classe i , numa estrada de localização do tipo j ($\text{€} \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$); $EF_{i,k}$ o fator de emissão do poluente k por um veículo de classe i ($\text{g} \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$); $PC_{j,k}$ o custo monetário do poluente k por estrada de localização j ($\text{€} \cdot \text{g}^{-1}$).

Quadro 2.1 – Custo máximo imputável da poluição atmosférica. Fonte: Diretiva 2011/76/EU

(Cêntimos.veículo ⁻¹ .km ⁻¹)	Estradas Suburbanas	Estradas Interurbanas
Euro 0	16	12
Euro I	11	8
Euro II	9	7
Euro III	7	6
Euro IV	4	3
Euro V	3	2

Se o declive das estradas, a altitude e/ou inversões térmicas o justificarem, estes valores podem ser multiplicados por um fator máximo de 2 nas zonas montanhosas.

2.2 Poluição Atmosférica

A presente secção pretende esclarecer conceitos relativos às emissões de poluentes do ar devido ao sector dos transportes rodoviários, nomeadamente os veículos pesados de mercadorias que são o objeto em estudo.

2.2.1 Considerações gerais

A poluição atmosférica consiste numa alteração da composição química natural da atmosfera, devido a emissões de poluentes, provocando efeitos desde escala local até a escala global. O estudo desta dissertação debruça-se sobre a poluição atmosférica a escala regional. Portanto, exclui-se o estudo de poluentes a escala global, associados a alterações climáticas por exemplo. A qualidade do ar é o termo que se usa, normalmente, para traduzir o grau de poluição no ar (qualar.apambiente@).

Diversos sectores contribuem para a poluição do ar: indústria, agricultura, residências e transportes. Os poluentes mais relevantes a nível do sector dos transportes são: NO_x, PMs, monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COV¹), dióxido de enxofre (SO₂) e como poluente secundário, o Ozono (O₃)² (EEA, 2013c). Os efeitos da poluição do ar afetam diversas áreas, nomeadamente, a saúde, os ecossistemas (água, solo, biosfera) e edifícios e materiais. Existe um vasto leque de projetos de investigação que foca a sua atenção no estudo dos efeitos da poluição do ar. Segundo Korzhenevych *et al.* (2014), os projetos mais recentes da União Europeia que se destacam são o ESCAPE (European Study of Cohorts for Air Pollution Effects; 2008-2012), EXIOPOL (2007-2011), HEIMTSA (Health and Environment Integrated Methodology and Toolbox for Scenario Assessment; 2007-2011), INTARESE (Integrated Assessment of Health Risks of Environmental Stressors in Europe; 2005-2010). Os efeitos na saúde são os de maior importância, sendo por essa razão que o foco deste trabalho recai nesta temática.

2.2.1.1 Efeitos na Saúde

Desde a Revolução Industrial que os efeitos da poluição atmosférica na saúde humana têm sido objeto de estudo. Apesar dos progressos significativos realizados, continuam a existir repercussões graves, sendo o ozono troposférico e as partículas, os poluentes que suscitam maior preocupação do ponto de vista da saúde, não se conhecendo para ambos um nível de

¹ COV inclui o metano CH₄ (metano) e os COVNM (compostos orgânicos voláteis não metânicos).

² Poluente secundário, resultando maioritariamente da interação entre radiação solar, oxigénio e poluentes precursores, principalmente NO_x e COVNM, mas também CO e CH₄.

exposição sem riscos (CCE, 2001). É por esta razão que o presente trabalho vai focar-se no estudo de PM e NO_x, que dá origem a O₃.

A poluição atmosférica atinge atualmente milhões de pessoas em todo o mundo, especialmente nos grandes centros urbanos. Anualmente ocorrem cerca de 350 000 mortes prematuras na Europa (EU-25) devido a poluição atmosférica. Para estas áreas, a OMS, refere que a poluição atmosférica, em especial as PM, conseguem reduzir a esperança média de vida nas áreas mais poluídas por mais de um ano (WHO, 2010). A figura 2.3 mostra a mortalidade que se prevê ocorrer na Europa devido à exposição por PM.

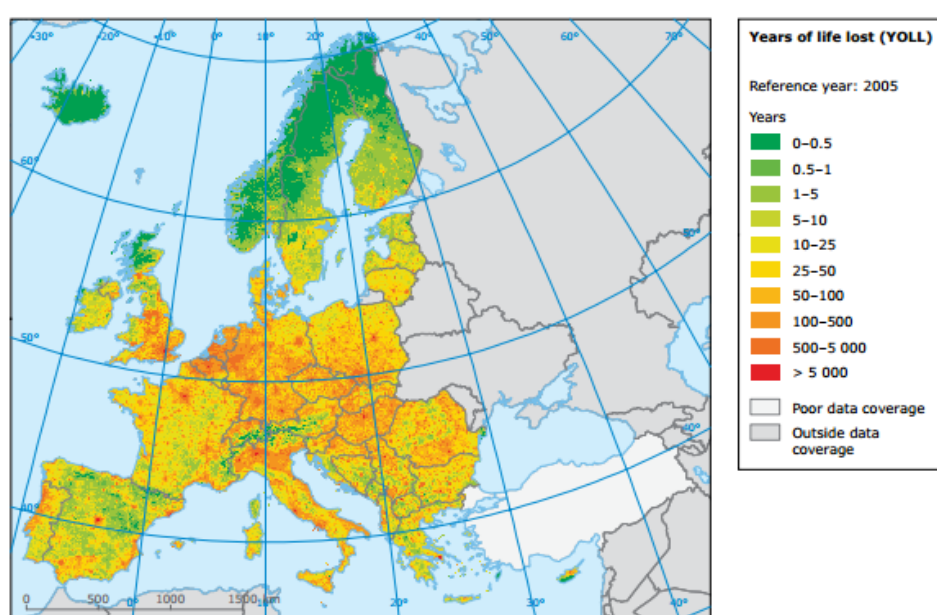


Figura 2.3 – Anos de vida (YOLL³) perdidos devido a exposição de longo termo a PM com tamanho inferior a 2.5µg. Fonte: (EEA, 2010)

Segundo a Agência Europeia do Ambiente (AEA), acima de um terço dos Europeus que vive em cidades, em 2011, estava exposto a níveis de poluição do ar que excedem os padrões Europeus de qualidade do ar e, cerca de 90% estava exposto a níveis de poluição prejudiciais à saúde, segundo os padrões mais estritos da OMS, destacando-se os níveis de O₃ e PM (EEA, 2013a). Em geral, o dano da poluição relativo à perda de anos de vida não afeta a população de uma forma uniforme, sendo que idosos, crianças, grávidas e pessoas vulneráveis são mais suscetíveis.

³ Indicador de mortalidade prematura, calculado pelo produto do número de mortes pela esperança média de vida.

São inúmeras as evidências que destacam a associação entre a poluição do ar atmosférico e os efeitos na saúde humana, essencialmente ao nível do aparelho respiratório e circulatório. Os efeitos observados na saúde humana passam por inflamações e alterações morfológicas, bioquímicas e funcionais nas vias respiratórias à diminuição das funções de defesa do hospedeiro. A concentração do poluente, a frequência e duração da exposição, assim como do nível de atividade do indivíduo durante a exposição influenciam a severidade do efeito na saúde (Moreira, 2010). No quadro 2.2 são apresentados os efeitos dos principais poluentes.

Quadro 2.2 – Principais efeitos por poluente

Fonte: (EEA, 2013a), (EEA, 2013b) e (cienciaviva@, 2014).

Poluente	Efeitos
NO _x	Efeitos adversos no sistema respiratório, fígado, sangue, irritação nos olhos e garganta.
PM	A diminuição do tamanho das partículas é diretamente proporcional ao seu potencial de provocar problemas a nível de saúde; As PM conseguem ser inaladas, atingindo os pulmões, provocando sérios problemas de saúde a nível respiratório e cardíaco. Afetam o sistema reprodutor, o sistema nervoso central e causam irritações oculares.
CO	Provoca efeitos prejudiciais à saúde, pela redução de oxigénio no organismo, causando dores de cabeça, perda de reflexos, podendo levar à morte. Provoca ainda doenças crónicas, do foro respiratório e circulatório.
COV	São carcinogénicos, letais em altas concentrações.
SO ₂	Causa efeitos adversos no sistema respiratório e provoca doenças de foro cardiovascular, dores de cabeça e ansiedade bem como irritações oculares.
O ₃	Penetra profundamente nas vias respiratórias, afetando os brônquios e os alvéolos pulmonares; Causa irritações nos olhos, nariz e garganta, seguindo-se tosse e dor de cabeça; Os efeitos manifestam-se mesmo para baixas concentrações e períodos curtos.

Os efeitos são distintos consoante a exposição seja de curto-prazo ou longo-prazo, sendo que a severidade dos mesmos aumenta com a duração do tempo de exposição. Felizmente, os efeitos mais severos afetam uma parcela da população menor enquanto que a maioria da população é afetada por efeitos menos severos.

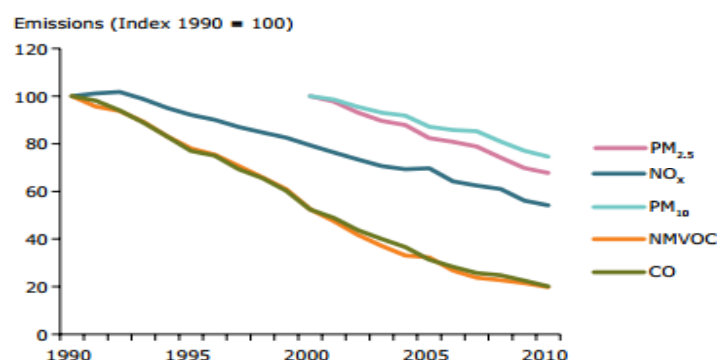
2.2.2 Emissões no sector dos transportes rodoviários

O sector dos transportes é uma fonte de poluição do ar denominada por “fonte em linha”, uma vez que se limita aproximadamente a um traçado estreito e longo. Os poluentes de transportes rodoviários são emitidos próximo à superfície da terra, e desta forma exibem um padrão diferente de dispersão comparativamente com poluentes emitidos em alturas elevadas (tais como chaminés industriais) (EEA, 2013d). Tal resulta em concentrações de poluentes mais elevadas junto à superfície.

O processo de combustão completa produz CO_2 e H_2O como produtos primários. No entanto, a maioria das vezes este processo não se dá de forma completa, produzindo-se sub-produtos originários da oxidação incompleta do combustível (CO , HC , PM) e ainda substâncias com origem da oxidação de espécies não-combustíveis presentes no motor (NO_x proveniente de N_2 no ar, SO_x proveniente do lubrificante e combustível) (EEA, 2013c).

Na EU-27, em 2010, segundo estatísticas da AAE (EEA, 2012), o sector dos transportes rodoviários contribuía, com 42% das emissões totais de NO_x , sendo o seu maior contribuidor, cerca de 16% do total das PM e cerca de 29% do total de emissões de CO , 2º maior contribuidor destes poluentes e cerca de 16% do total de emissões de COVNM , 3º maior contribuidor deste último. A figura 2.4 mostra a tendência da evolução das emissões no sector rodoviário.

Figura 2.4 – Tendência das emissões do sector rodoviário na EU-27. Fonte: (EEA, 2012)



Podemos distinguir os seguintes tipos de emissões: quente (exaustão), frio (exaustão), que correspondem ao uso do motor quando iniciado, evaporativas (do combustível, óleo do carter), por desgaste dos pneus e uso de travões e estrada. As causas de emissões poluentes a nível do sector dos transportes devem-se a uma multitude de fatores, que revelam a complexidade do problema: composição do combustível, condições de combustão, riqueza da mistura, conceção e condições de funcionamento do motor, níveis de manutenção do motor e escape, total de quilómetros percorridos, existência ou não de filtros de partículas, tipo de catalisador, tipo de circulação, tipo de condução do automobilista, tempo de uso do veículo, tipo de marcha.

De acordo com Borrego (2004), entre estes fatores o tipo de combustível é o mais relevante, sendo que existem especificações legais sobre as propriedades físicas e químicas dos combustíveis por forma a assegurar uma maior eficácia e menor poluição. O gasóleo é considerado o combustível mais poluente. Os pesados de mercadorias, usam na sua maioria motor a *diesel* devido à maior eficiência e torque (EEA, 2013). As emissões de exaustão provenientes de motores a *diesel* foram recentemente consideradas como carcinogénicas, pela

agência internacional de investigação do cancro. O grupo de investigação não especifica que poluentes estão associados a este efeito, classificando a totalidade das emissões de motores a *diesel* como carcinogénicas (@DieselNet, 2012a).

2.2.3 Medidas e Estratégias para redução de emissões

Diversas soluções com o objetivo de minimizar e mitigar a poluição do ar devido ao sector dos transportes têm vindo a ser discutidas e criadas ao longo dos tempos. Em 1970, a CEE adotou regulamentação para reduzir as emissões, sendo descrita pela Diretiva 70/220/EEC, a qual foi seguida por emendas que regem os “padrões europeus de emissões” (DieselNet@, 2012b). Trata-se de uma norma que regula os limites aceitáveis de emissões de exaustão para veículos motorizados, para um dado período de tempo, dividindo os veículos em diferentes classes de emissões (Euro I, Euro II...)⁴. Esta norma regula as emissões de NO_x, hidrocarbonetos totais, COVNM, CO e PM.

Em 1988, surgiu legislação específica para os veículos com motor a gasóleo de peso superior a 3.5ton (veículos pesados), com a Diretiva 88/77/EEC, à qual se seguiram diversas emendas até que em 2005 a Diretiva 05/55/EC consolidou as regulamentações existentes até então. Estas regulamentações são diretamente aplicáveis nos estados membros.

A primeira regulamentação introduzida foi a *ECE Regulation No. 49*, a qual está associada ao teste de ciclos estacionário de motor a *diesel ECE R49*. Estes testes de ciclos são testes ao veículo, nos quais se testam diferentes padrões de condução (velocidade, aceleração, carga), executados durante um dado período de tempo. Para além dos testes de estado estacionário existem testes em estado transiente. Distinguem-se assim dois conjuntos de limites de emissões, um para condições estacionárias e outro para transientes.

Os veículos em conformidade com a ECE R49, bem como os anteriores à introdução desta regulamentação, são classificados como do tipo "convencional". A Diretiva 91/542/CEE, implementada em duas etapas, trouxe dois conjuntos de limites de redução de emissões, válidos para os períodos 1992-1996 (Euro I) e 1997-1999 (Euro II).

A Diretiva 1999/96/CE tornou-se válida a partir de 2000 (Euro III), e apresentou uma redução de 30 % de todos os poluentes em relação ao Euro II. O testes de ciclo *ECE R49*, a partir da norma Euro III, foi substituídos pelos testes ESC (European Stationary Cycle) e ELR (European

⁴ Os veículos pesados têm as classes definidas com números romanos, enquanto que os ligeiros são descritos por numeração árabe.

Load Response) para o estado estacionário e pelo teste ETC (European Transient Cycle) para o estado transiente.

Surgiram novas recomendações que começaram a ser aplicadas em 2005 (Euro IV) e, novamente, em 2008 (Euro V). A norma Euro V é muito rigorosa, exigindo uma redução de mais de 70% de NO_x e uma redução de mais de 85 % de PM, relativamente à norma Euro II. Para tais limites serem alcançados, devem ser implementadas medidas como afinação precisa do motor, catalisadores de oxidação e sistemas de redução catalítica seletiva (SCR).

Já foram acordados novos limites de emissões, para o nível Euro VI, com vista de serem executados a partir de 2013/2014, seguindo o teste de ciclo WHSC (World Harmonized Stationary Cycle) e WHTC (World Harmonized Transient Cycle). Pretende-se uma redução de 50% na emissão de PM e uma redução adicional de 80% de emissões de NO_x em relação ao limite Euro V. As medidas previstas para atingir estes objetivos passam pela utilização de filtros de partículas, afinação do motor, etc. (EEA, 2013c).

Para além de medidas políticas, surgiram estratégias para diminuir a poluição a nível da tecnologia inerente aos veículos (p.e. catalisador⁵, filtro de partículas de gasóleo (DPFs), motor elétrico, biocombustíveis, etc.) e ao nível da gestão do tráfego (criação de zonas de emissão reduzida – ZER, medidas para controlar o congestionamento, etc.). Recentemente, em Abril de 2014, o parlamento europeu votou a favor de um *design* mais aerodinâmico dos veículos pesados, por forma a reduzir o consumo de combustível e as emissões (quercus@, 2013).

2.2.4 Metodologias de quantificação das emissões

Os modelos de emissão permitem estimar dados de emissões em diferentes escalas temporais e espaciais, utilizando diversas metodologias (Universidade de Aveiro). As metodologias usadas distinguem-se pela escala usada para o cálculo (microscópica, i.e. para um veículo individual, ou para uma estrada; macroscópica, i.e. regional, nacional ou global) e, ainda, pela forma como contabilizam os seguintes parâmetros: poluentes; tipo de emissões (quente, frio, evaporativas); composição da frota (categoria do veículo, idade); tipo de condução; combustível usado; carga transportada; local de condução (urbano, rural, autoestrada). No caso de veículos rodoviários o método mais comum para calcular emissões baseia-se na atividade de transportes. Este método tem por base a equação (2):

$$E = e \times a \quad (2)$$

Em que E é a emissão total, e corresponde ao fator de emissão por unidade de atividade (g.km^{-1} ou $\text{g.km}^{-1}.\text{v}^{-1}$), e a corresponde a dados da atividade de transporte (vkt ou TMDA).

⁵ Estes equipamentos produzem pequenas quantias de poluentes, como o NH₃ e o N₂O, no seu funcionamento.

Este método está de acordo com as indicações do documento de referência “*EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook*”, cujas recomendações são aconselháveis de seguir.

As emissões totais incluem emissões quentes, emissões a frio e emissões evaporativas, sendo o total correspondente ao somatório de cada uma destas contribuições. Neste trabalho o foque será apenas a contribuição das emissões a quente, uma vez que são as que têm um maior peso para as emissões totais.

Para calcular o fator de emissão das emissões a quente existem diversas metodologias, sendo as mais comuns baseados na velocidade média de circulação, destacando-se nesta categoria as metodologias dos projetos COPERT, ARTEMIS e TREMOVE, os quais estão intimamente relacionados e apresentam semelhanças. Outras metodologias incluem uma combinação da velocidade e dinâmica de ciclos de condução, designando-se modelos de situação de tráfego, por exemplo a metodologia presente no *Handbook of Emission Factors* (HBEFA). Por último existem metodologias que incorporam a velocidade e aceleração, conhecidos por modelos de emissões instantâneas, por exemplo o modelo MOVES (modelo oficial da EPA – aplicado às condições dos Estados Unidos). Os modelos de emissões instantâneas são considerados mais rigorosos e próximos da realidade, mas para a maioria das aplicações (e.g. para aplicação a um nível estratégico) os modelos baseados na velocidade média e num conjunto de típicas situações de tráfego permitem obter estimativas de emissão com exatidão suficiente (PORTAL, 2003). Por esta razão no presente trabalho o foque serão os modelos de velocidade média.

Nos modelos de velocidade média, os fatores de emissão a quente são derivados de medições repetidas de emissões, com base num suficiente número de testes de veículos em condições laboratoriais que refletem a diversidade de padrões de condução, incluindo paragens, arranques, acelerações e desacelerações. A relação com a velocidade média é determinada através da combinação de resultados de testes que usem ciclos com diferentes médias de velocidade. Este procedimento é realizado para os diversos poluentes e para diferentes tipos de veículos. A forma das curvas emissão-velocidade revela geralmente: emissões elevadas a velocidades médias reduzidas, quando a operação do veículo é ineficiente devido a situações de paragens e arranques (*stop-and-go*); uma tendência para emissões elevadas a velocidades elevadas devido à necessidade de grandes quantidades de energia do motor; emissões mínimas nas velocidades medianas (cerca de 50-60km.h⁻¹). Estes modelos são aplicados preferencialmente a escala local e regional (PORTAL, 2003).

A metodologia do projeto COPERT é a metodologia mais utilizada na Europa e é base de cálculo das emissões do projeto TREMOVE. A metodologia do projeto ARTEMIS é a mais recente na Europa, combinando as melhores características das metodologias COPERT e HBEFA, tendo sido incluído nas versões mais atualizadas do COPERT e TREMOVE (Sjödin et al, 2008). A metodologia COPERT é preferencial para cálculos de emissões a nível nacional,

sendo que para escalas regionais causa incertezas, sendo preferível o uso do ARTEMIS que se adapta a situações locais (TFEIP Expert Panel on Transport, 2007). A versão mais atualizada da metodologia COPERT teve por base os avanços desenvolvidos pelo ARTEMIS dado o seu elevado nível de detalhe, nomeadamente a nível de classificação de veículos (Boulter, 2005). A metodologia ARTEMIS tem sido implementada e utilizada em projetos recentes. Tomas Levin desenvolveu um *software* baseado nas funções da metodologia ARTEMIS, o SEMBA (SINTEF Emission Module Based on ARTEMIS), que contém procedimentos para o cálculo de emissões detalhadas em SIG para todos os modos de transporte, na Noruega. A metodologia ARTEMIS é atualmente a mais desenvolvida a nível de cálculo de fatores de emissão de veículos pesados de mercadorias (Levin, 2012), sendo este o método recomendado atualmente para tal cálculo e, portanto, é a metodologia usada no presente trabalho.

2.2.5 Estado atual da poluição do ar

As emissões de poluentes do ar na Europa têm vindo a decrescer significativamente nos últimos anos, mas os seus níveis continuam a ser um problema em algumas áreas (urbanas, grandes centros metropolitanos) e especificamente para alguns poluentes. Segundo o relatório “*Air quality in Europe – 2013 report*”, o problema da poluição do ar na Europa está longe de ser resolvido. Os poluentes que apresentaram maiores excedências no ano 2011, segundo este relatório foram as PM e NO_x, razão da importância de estudar estes dois poluentes. Na figura 2.5 apresenta-se um gráfico que mostra a percentagem de população residente em áreas urbanas, de países da EU-27, potencialmente exposta a níveis de poluentes que se encontram acima do limite legal⁶ definido para proteção da saúde humana.

O número de veículos pesados de mercadorias em circulação é um fator de relevância para que os níveis de poluição se mantenham elevados em algumas zonas, refere a EEA com o relatório “*Road user charges for HGV*”. O mesmo relatório frisa que os veículos pesados de mercadorias são responsáveis por cerca de metade do óxido de azoto (NO_x) emitido pelo transporte rodoviário nos países cobertos pelo Espaço Económico Europeu (EEE). Os veículos pesados foram os maiores responsáveis pela emissão deste poluente em 2010 (EEA, 2012). Apesar de tudo, as emissões relativas a circulação de veículos pesados de mercadorias decresceram desde a década de 90, como resultado de medidas de mitigação (Boer *et al.*, 2009). Espera-se que esta

⁶ PM - 50 µg.m⁻³ (concentração média diária a não ser excedida mais do que 35 dias num ano neste valor);

NO₂ - 40 µg.m⁻³ (concentração média anual a não ser excedida ao longo do ano);

O₃ - 120 µg.m⁻³ (concentração média medida ao longo de oito horas máxima diária, a não ser excedida mais do que 25 vezes por ano. Valor médio medido ao longo de 3 anos a ser atingido onde possível até 2010);

SO₂ - 125 µg.m⁻³ (concentração média diária a não ser excedida mais do que 3 dias por ano).

tendência se mantenha com a introdução de novas medidas regulamentares cada vez mais estritas.

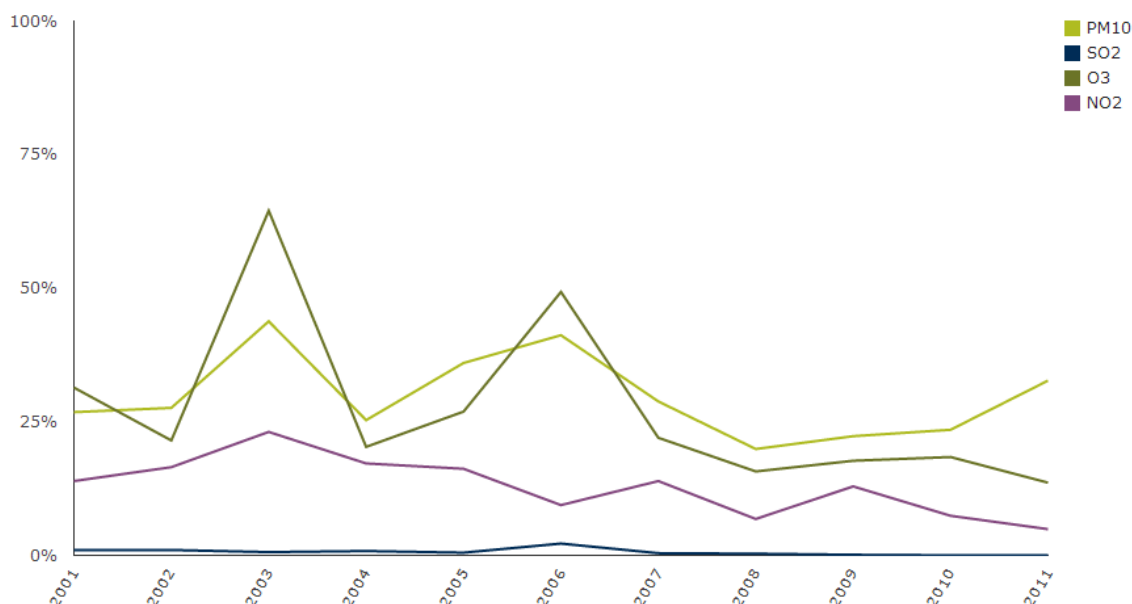


Figura 2.5 – Percentagem de população residente em áreas urbanas onde a concentração dos poluentes ultrapassa o limite legal. (Apenas estações de monitorização urbanas e suburbanas foram consideradas. Não está incluído o Chipre, Grécia e Malta) Fonte: eea@ (2013a)

Em Portugal no ano 2010, segundo o relatório do Estado do Ar Ambiente (APA, 2012), os níveis de emissões de NO_x e COVNM, como substâncias precursoras do ozono troposférico, cumpriram as metas legais. Contudo, o sector dos transportes foi o que mais contribuiu para as emissões destes poluentes, com 37% do total, apesar do decréscimo de cerca de 50% da contribuição deste sector durante o período 1990-2010. No que toca às concentrações de O_3 em Portugal, tendo por base a média anual de todos os valores de ozono relativos às concentrações máximas diárias das médias octo-horárias, verifica-se que no período 2001-2011 o valor limite foi excedido em estações rurais e urbanas.

2.3 Custos externos

Esta secção pretende apresentar noções sobre o conceito de custo externo bem como os métodos para calcular o este valor monetário, no âmbito do sector dos transportes.

2.3.1 Definição e enquadramento

Em primeiro lugar, o conceito de externalidade refere-se a situações em que o efeito da produção ou consumo de um bem e serviço impõe um efeito negativo ou benéfico, em terceiros, não estando esse efeito refletido no preço cobrado pelo bem ou serviço (OECD, 2002). Constata-se que, desta forma, de um ponto de vista social o mercado não é eficiente nem equilibrado, uma vez que estes custos não são pagos pelo utilizador do bem, havendo prejudicados.

A definição de custo externo surge na literatura da economia, com Pigou (em 1912), sendo que estes são custos para a sociedade, que sem intervenção legislativa, não são pagos pelo utilizador do serviço ou bem. Mais concretamente, o custo externo é a diferença entre os custos sociais e os custos privados, quando os primeiros são superiores aos segundos (van Essen *et al.*, 2008).

- Os custos privados são apenas os custos que o utilizador efetivamente suporta. (No caso dos transportes: custos do desgaste, uso e energia do veículo, tarifas e impostos sobre os transportes).
- Os custos sociais consistem na totalidade dos custos. (No caso dos transportes: custos devido à criação, uso e desgaste da infraestrutura, custos de congestionamento, custos dos acidentes, custos ambientais e custos privados).

Quando as externalidades negativas são geradas devem ser internalizadas na economia de mercado, ou seja, deve-se incluir os custos externos no preço do bem ou serviço (van Essen *et al.*, 2008). Para tal usa-se o custo externo médio ou o custo externo marginal, sendo que na maioria das situações é preferível utilizar o custo externo marginal. Quando se fala em custo marginal externo refere-se ao valor monetário correspondente à produção de uma unidade extra. No caso da poluição do ar o custo marginal é semelhante ao custo médio uma vez que se usam funções de dose resposta lineares.

2.3.2 Metodologias de quantificação de custos externos

A perda de bem-estar associada a externalidades negativas pode ser expressa em termos monetários pelo custo externo. Contudo, não é um caminho direto valorizar monetariamente alguns dos efeitos (Coutinho, M. *et al.*). As preferências individuais são o indicador mais importante e que melhor valoriza as externalidades. Para algumas externalidades usam-se preferências coletivas, por exemplo para avaliar riscos de longo termo. Por forma a valorizar as preferências individuais as seguintes abordagens são relevantes:

- WTP: *Willingness To Pay*. – é o valor máximo que uma entidade está disposta a despende para uma melhoria e/ou para evitar algo indesejável.
- WTA: *Willingness To Accept*. – é o valor monetário mínimo que uma entidade está disposta a aceitar para conviver com algo negativo, como compensação do mal.

Segundo (van Essen *et al.*, 2007) vários métodos podem ser utilizados. Para custos de recursos a WTP é refletida pelo preço de mercado de um dano, por exemplo o preço para recuperar os danos numa cultura.

Se os custos dos recursos não tiverem um preço de mercado terão que se criar situações de mercado hipotéticas. Nesta situação podem ser usados vários métodos para avaliar a WTP ou a WTA, todos com pontos fortes e fracos:

As *preferências declaradas* envolvem estudos, incluindo questionários que avaliem a predisposição do entrevistado para pagar pela externalidade. Este tipo de método mede diretamente o WTP, usando por exemplo uma abordagem de avaliação contingente. Depende do *design* do inquérito e do detalhe de informação recolhido, sendo útil apenas para a valorização de valores chave individuais, como o valor de uma vida humana (dado pelo valor de uma vida estatística - VSL) (Maibach *et al.*, 2008). Para estimar custos ambientais relativos à natureza são necessárias abordagens mais diferenciadas do que esta.

Por sua vez, as *preferências reveladas* são métodos indiretos que se guiam pelo comportamento dos consumidores ou produtores (p.e. hábitos de compra) ou por métodos hedônicos, que são limitados a valorização habitacional e necessitam de amostra larga, podendo ser pouco viáveis.

Para estimar a WTP de um problema ambiental de longo termo, como as alterações climáticas, é necessário considerar diferentes cenários de risco que incluam custos diretos e indiretos para diminuir e reparar o dano ou compensar o dano que não pode ser reparado. A abordagem mais recomendada é a *Impact Pathway Approach* (IPA), sendo usada pelo projeto ExternE (Externalities of Energy), o qual representa um marco na avaliação dos custos externos na Europa. A IPA foi especificamente desenvolvida para a poluição do ar, baseando-se numa metodologia que considera quatro passos:

- **Fonte:** emissões de poluentes;
- **Dispersão:** Transporte e conversão química dos poluentes pelo ambiente, resultando em alterações na exposição a poluentes;
- **Exposição e Impacte:** Resposta física da exposição através de funções dose-resposta;
- **Valorização monetária:** Equivalente monetário de cada impacte (na saúde e natureza).

Em alternativa à IPA, existe uma metodologia alemã que considera 7 passos (van Essen *et al.*, 2008). Se não for possível modelar o nível do dano, pode ser necessário combinar a IPA com uma abordagem de preço padrão, podendo-se para tal usar uma abordagem que calcule o custo para um certo nível de dano. O quadro 2.3 resume as melhores metodologias para aplicar a cada externalidade do sector dos transportes.

Quadro 2.3 – Metodologia de estimação de custos externos no sector dos transportes rodoviários

Externalidade	Melhor metodologia de estimação de custo
Acidentes	Custo de recursos para melhorar a saúde. WTP para estimar o valor de uma vida estatística, baseada em preferências declaradas para a redução de riscos de tráfego.
Poluição do ar (saúde)	IPA fazendo uso de WTP para valorizar a vida humana (baseada nos anos de vida perdidos) e uso de custos de hospitalização e tratamento para valorizar problemas diversos.
Poluição do ar (Danos em materiais)	IPA usando custos de reparação.
Poluição do ar (Danos na natureza)	IPA usando custo de perdas.
Ruído	WTP baseada em métodos hedônicos. IPA para a saúde humana, usando WTP para a valorizar a vida humana.
Alterações climáticas	Custo para evitar danos baseados em cenários de redução de emissões.
Natureza e Paisagem	Custos de reparação/compensação.

2.3.3 Moneterização da Poluição do Ar

Tendo em conta as considerações acerca das melhores metodologias a ser utilizadas para cada externalidade associada ao sector dos transportes, no que toca aos efeitos na saúde pela poluição atmosférica a melhor abordagem é a *Impact Pathway Approach*, usando valores monetários baseados na WTP. A estimativa do custo da poluição do ar obriga à modelação de complexos processos físicos e consequentes respostas biológicas a nível de efeitos na saúde, bem como estimativas complexas dos custos monetários dessas respostas (Coutinho, M. *et al.*)

A IPA serve-se de modelação atmosférica por forma a traçar os padrões de dispersão dos poluentes e as transformações químicas envolvidas. A concentração e dispersão de poluentes depende do ambiente onde se deu a emissão (Miola, A. *et al.* 2008) e do transporte de poluentes de longa distância. Por exemplo, em zonas montanhosas é maior a acumulação de poluentes enquanto que a proximidade ao mar facilita a dispersão devido a brisas marítimas. A densidade populacional é outro fator que afeta a gravidade do impacte. Desta forma, a partir da mesma fonte de emissão, consoante a dispersão e dose-resposta obtém-se um custo monetário do poluente distinto.

O trabalho realizado por Brandt *et al.* (2010), “*Marginal damage cost per unit of air pollution Emissions*”, baseado na IPA e usando o modelo EVA (*Economic Valuation of Air pollution*), apresenta valores monetários atribuídos a poluentes emitidos por diversos sectores, nomeadamente o sector dos transportes rodoviários. Os resultados dizem respeito aos custos associados aos danos na saúde.

O conceito geral do modelo EVA, é baseado na *Impact Pathway Approach*, e consiste nos seguintes elementos:

- Um modelo euleriano de transporte da poluição atmosférica a longa distância com reações químicas (modelo (DEHM)).
- Inventários detalhados de emissões, baseados na informação relativa à Europa (2010) do *European Monitoring and Evaluation Programme* (EMEP) e dados para o hemisfério norte do *Global Emission Inventory Activity / Emission Database for Global Atmospheric Research* (GEIA/EDGAR);
- Dados da população em grelha;
- Coeficientes de exposição-resposta atualizados;
- Avaliação monetária dos impactes da poluição do ar na saúde humana aplicáveis a condições europeias.

O DEHM é um modelo tridimensional que cobre a maior parte do hemisfério norte. O modelo descreve campos de concentração de 58 espécies químicas, devido a emissões de NO_x, SO₂, COVs, CO e NH₃ e nove classes de PMs. Este inclui um total de 122 reações químicas. Utiliza um modelo meteorológico (MM5v3) que fornece dados dos campos meteorológicos para o modelo DEHM numa base horária, com dados dum ano médio meteorológico (Brandt, 2010). Calcula, desta forma, os dois primeiros passos da IPA, cálculo de emissões e dispersão.

Para calcular o impacto a nível de saúde, concentrações de poluentes e dados de população são combinados para estimar a exposição humana. A função exposição-resposta usa-se para quantificar o impacto na saúde atribuído à poluição atmosférica e, tem a forma apresentada na equação (3) (Brandt., J. *et al.*, 2010):

$$R = \alpha \cdot \delta c \cdot P \quad (3)$$

onde R é a resposta (p.e. em número de casos, dias ou episódios), δc é a variação da concentração, P é a fração da população afetada e α é uma constante determinada empiricamente para o efeito a nível de saúde em análise, tipicamente obtido de estudos biomédicos publicados. Este modelo trata a relação exposição-resposta como sendo uma função linear.

Por forma a obter o valor monetário total das externalidades de um certo efeito, multiplica-se R pela avaliação monetária desse efeito, a qual é baseada em WTP ou preferências declaradas (p.e. em € por caso, € por dias). Dado que existem vários impactes com origem no mesmo poluente, o valor monetário associado a um poluente é dado pelo custo dos vários impactes a que dá origem.

Para estimar os custos externos a nível nacional, em euros por quilograma de poluente emitido, de todas as espécies químicas em análise, é requerida informação sobre as emissões totais para cada país, de cada espécie química emitida e cada sector (Brandt, 2011).

Segue-se na figura 2.6 um gráfico comparativo do valor do custo monetário de emissão de NO_x e PM em Portugal com os outros países, segundo o modelo EVA.

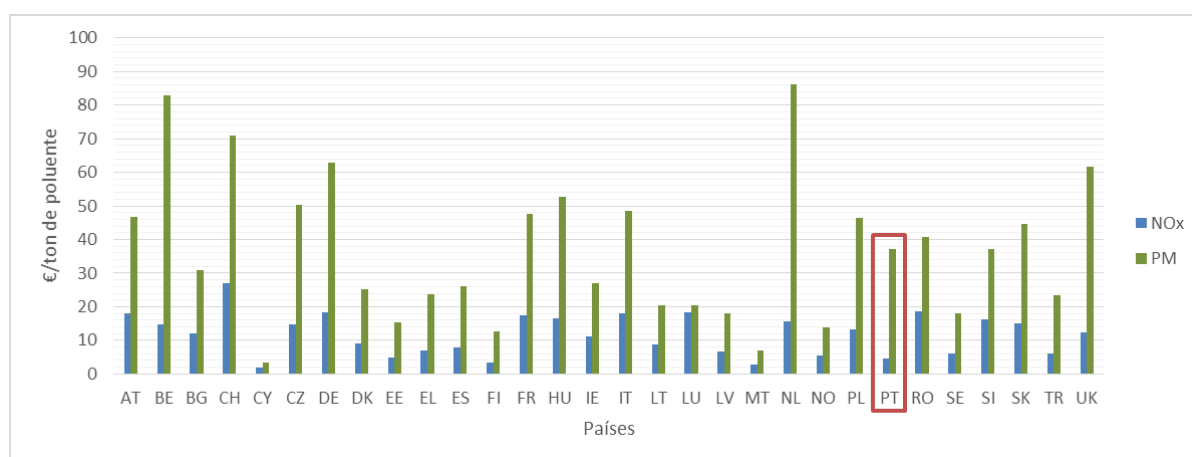


Figura 2.6 – Custo marginal da poluição por transporte rodoviário (Brandt *et al.*, 2010)

Os custos de PM são superiores aos de NO_x uma vez que as PMs são um poluente que afeta uma maior fração da população devido a ser um poluente associado a um transporte atmosférico de curta distância, que resulta numa exposição próxima da fonte de emissão.

É possível verificar que em países mais próximos do mar, menos populosos e menos montanhosos, o custo dos poluentes é menor, como é o caso do Chipre (CY) e Malta (MT). Em países como a Áustria (AT), Bélgica (BE), Suíça (CH), República Checa (CZ), França (FR), Hungria (HU), Holanda (NL), Polónia (PL), Eslovénia (SE) e Eslováquia (SK), que têm uma costa marítima pequena, montanhosos e populosos, são estimados custos mais elevados. Outro fator que influencia o custo dos poluentes poderá estar associado aos diferentes custos de hospitalização entre os países. Portugal (PT), sendo um país com uma vasta costa marítima, mas por outro lado com algumas zonas montanhosas, é-lhe atribuído por este modelo um custo intermédio associado aos poluentes em comparação com os outros países.

Os resultados do modelo EVA são os mais atualizados e cientificamente mais corretos até ao momento (EEA, 2013d), e portanto os que serão usados no presente trabalho. O modelo EVA diferencia um custo monetário do poluente consoante a localização da estrada j : interurbana, suburbana, autoestrada. Contudo, para Portugal o valor recomendado para NO_x e PM não varia em função da localização de estrada j , portanto para o presente estudo podemos descrever a variável da equação (1), PC_{jk} , como apenas PC_k . Assim, o custo unitário utilizado para o NO_x e PM, em Portugal, é, respetivamente, $0,004481\text{€}\cdot\text{g}^{-1}$ e $0,037078\text{€}\cdot\text{g}^{-1}$ (valores em moeda de 2010, posteriormente ajustados à inflação entre o período Jan/2010 – Jan/2014, de acordo com a taxa de inflação para este período, de 8.304% segundo a Pordata).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na presente seção é apresentada uma descrição da metodologia usada para calcular o custo externo associado a poluição atmosférica relacionada com veículos pesados de mercadorias. Em primeiro lugar, apresentar-se-á a área de estudo, para a qual é feita a sua descrição. Segue-se a metodologia utilizada para o cálculo dos fatores de emissões, *EF*. Por fim, aplica-se a equação (1), descrita na Diretiva Eurovinheta e apresentada na secção 2.1.3, para calcular o custo externo associado a poluição atmosférica, *PCV*.

São ainda apresentados os dados de entrada necessários, bem como o tratamento desta informação, nomeadamente, dados relativos à atividade de transporte.

Foram utilizados os programas ArcGIS e Excel como ferramentas de apoio. Para calcular os fatores de emissão usou-se a base de dados ARTEMIS para veículos pesados. O custo unitário dos poluentes é resultado do modelo EVA.

3.1 Área de Estudo

Optou-se por cingir o estudo deste trabalho ao Distrito de Coimbra, uma vez que é o distrito onde a Universidade de Coimbra se insere, sendo à partida mais fácil encontrar dados do referido distrito.

3.1.1 Caraterização geral

O distrito de Coimbra, pertencente à Região Centro (NUT 2), é formado por 17 municípios, ocupando uma área de 3.974 km². Segundo estatísticas do INE, em 2011, a população residente era de 429 714 habitantes, correspondente a 4.1% do total nacional. A capital de Distrito, Coimbra, apresentava uma população de 143 396 habitantes em 2011. Esta cidade e Figueira da Foz (com 10.132hab) são as únicas localidades do distrito com população acima de 10 000 habitantes. O valor da densidade populacional do distrito, no referido ano, era de 109 hab.km⁻², ligeiramente abaixo do valor médio nacional: 114.5 hab.km⁻² (Censos, 2011).

Analisando a densidade populacional por município, figura 3.1, torna-se notória a importância de Coimbra, com 448.95 hab.Km⁻², valor claramente superior aos restantes, verificando-se uma maior concentração da população nos municípios mais próximos do litoral.

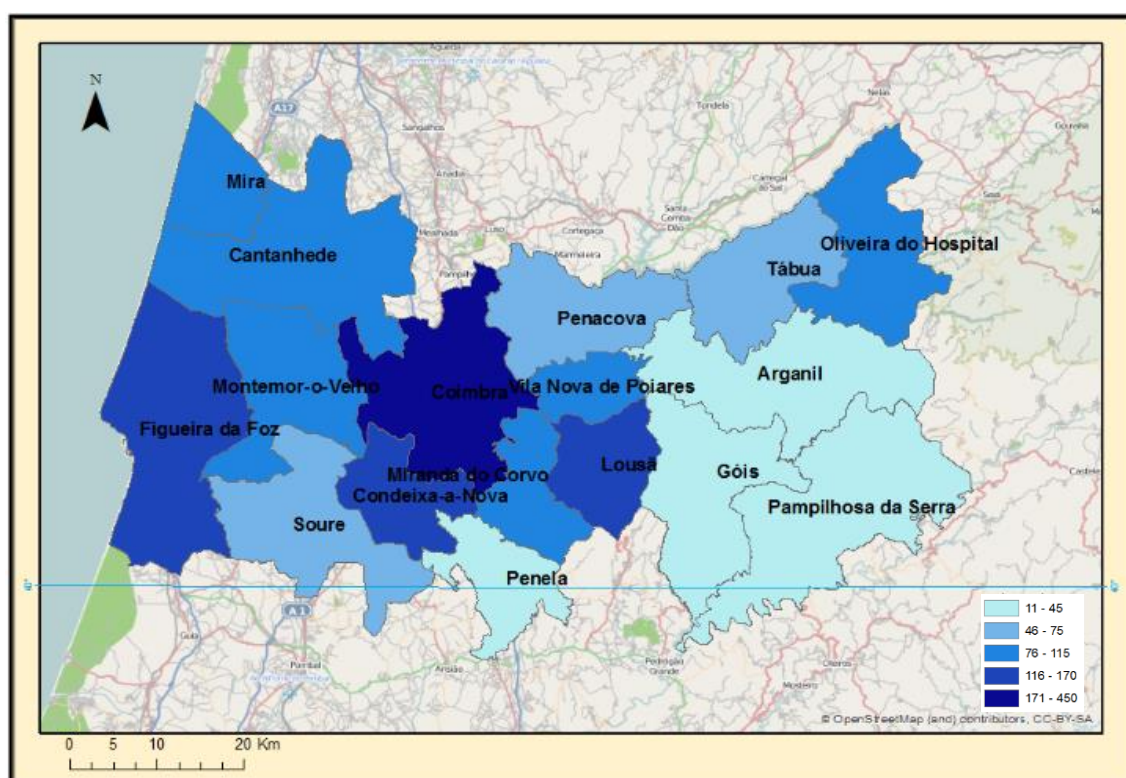


Figura 3.1 – Densidade populacional nos municípios do distrito de Coimbra, expresso em número médio de indivíduos por km², segundo os Censos. Fonte: (PORDATA@, 2011)

3.1.2 Geografia

A principal característica geográfica do distrito de Coimbra é o rio Mondego, que modela a paisagem do distrito. Este nasce a este, na Serra da Estrela, desaguando a oeste, na Figueira da Foz. Assim o distrito divide-se em duas metades:

A oriente apresentam-se zonas montanhosas, principalmente na zona a sueste, onde domina a cordilheira central com a Serra do Açor (altitude máxima a 1417 m) e a Serra da Lousã (altitude máxima de 1205 m). A noroeste o relevo não é muito pronunciado, com a serra do Buçaco a atingir apenas 549 m de altitude, próximo da costa marítima.

A ocidente do distrito estende-se uma planície costeira, delimitada pelo Oceano Atlântico. A costa litoral é em geral arenosa e baixa, com exceção do Cabo Mondego. Para norte estendem-se dunas extensas, que se prolongam por vários quilómetros para o interior, semeadas de pequenas lagoas.

3.1.3 Rede Viária

O Distrito de Coimbra, no que toca à acessibilidade, tem sofrido diversas modificações ao longo dos anos. Outrora ocupava uma centralidade inquestionável no sistema rodoviário nacional, uma vez que a principal via de acesso à Europa, a EN1, partia de Coimbra. Esta permitia que o distrito de Coimbra tivesse uma boa ligação com os distritos adjacentes. Com a construção de novas vias, as cidades de Distritos vizinhos ao de Coimbra passaram a ter ligações privilegiadas ao Porto e a Lisboa, enfraquecendo-se a ligação destas cidades a Coimbra. Face a este problema definiu-se nos últimos anos um vasto conjunto de melhorias e construção de novas vias de comunicação que melhoraram a acessibilidade do distrito.

A figura 3.2 apresenta as estradas que são o objeto de estudo no presente trabalho.

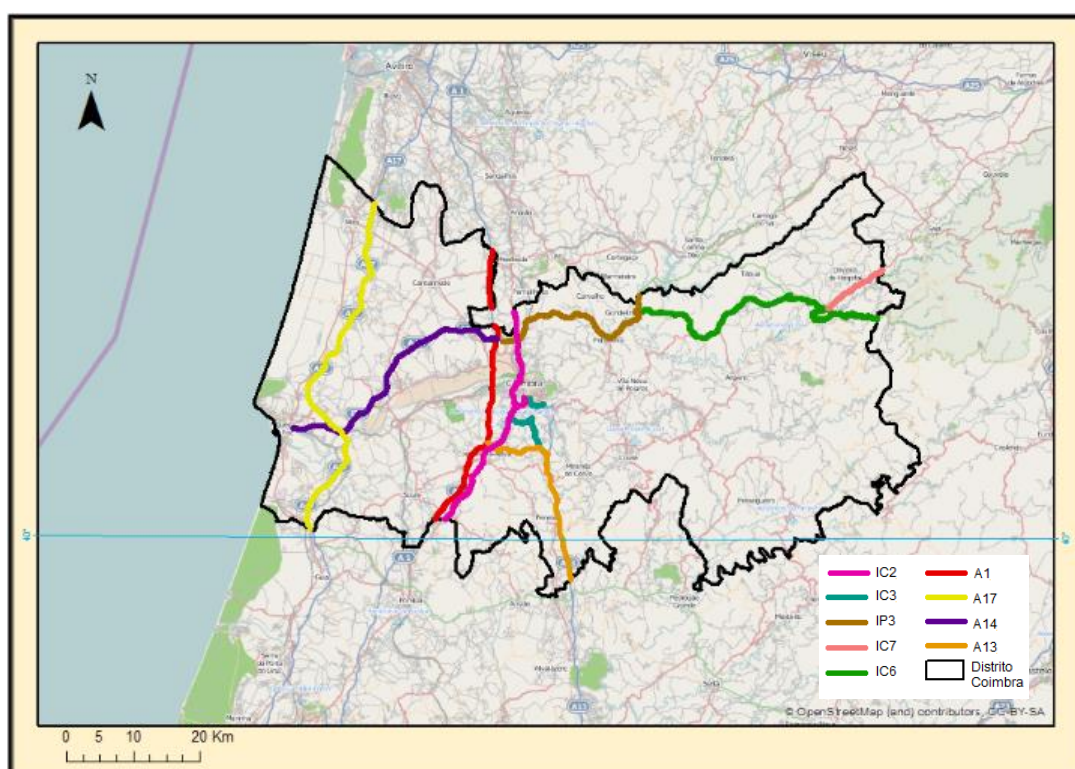


Figura 3.2 – Localização geográfica das estradas em estudo, no distrito de Coimbra.

3.2 Metodologia de cálculo de emissões

Esta secção divide-se em duas partes: uma primeira onde é explicada a metodologia utilizada para calcular os fatores de emissão, *EF*, tendo em conta o projeto ARTEMIS; A segunda parte diz respeito à aplicação dos fatores de emissão resultantes da metodologia ARTEMIS na área em estudo.

3.2.1 Modelo ARTEMIS

O projeto da Comissão Europeia ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems) foi desenvolvido por forma a criar um modelo de emissões harmonizado para o sector dos transportes - rodoviários, ferroviários, aéreos e náuticos -, e para fornecer estimativas das emissões consistentes a nível nacional, internacional e regional. No âmbito desta tese, destaca-se o *workpackage 400* do projeto ARTEMIS, o qual está relacionado com o estabelecimento de fatores de emissão plausíveis para os veículos pesados de mercadorias (HDV). Este trabalho sobre os HDV teve apoio do projeto COST Action 346 e do documento Handbook of Emission Factors (HBEFA), tendo-se traduzido na criação do modelo PHEM (Passenger car and Heavy-duty Emission Model).

A base de dados utilizada no modelo PHEM é a mais extensa base de dados de emissões de HDV na Europa. O modelo resultante estima as emissões com base na velocidade do motor durante um ciclo de condução. Os poluentes estudados pelo modelo são o CO, NO_x, PM e THC (Total HydroCarbons). Com base no modelo PHEM, compilou-se a base de dados dos fatores de emissão de HDV para cerca de 170 000 combinações de categorias de veículos (e classes de emissões), ciclos de condução, carga de veículo e inclinação de estrada, gerando-se, a partir desta base de dados, funções de cálculo de fatores de emissão baseadas na velocidade média (Boulter, 2005). Desta forma, o tipo de veículo, a carga transportada, a velocidade e a inclinação de estrada são os *inputs* necessários para o cálculo dos fatores de emissão a partir das funções ARTEMIS, expressos em $\text{g.km}^{-1}.\text{v}^{-1}$.

Seguem-se diversas especificações desta metodologia por forma a compreendê-la melhor, de acordo com Boulter, P. e Barlow, T. (2005).

Categorias de Veículos

No projeto ARTEMIS é definida uma classificação hierárquica dos veículos pesados, que inclui “autocarros”, “autocarros urbanos” e “veículos pesados de mercadorias”. Estas categorias são subdivididas em grupos de acordo com o seu peso e esses grupos são ainda divididos em sub-grupos pelas classes de emissão (Convencional, Euro I, Euro II, Euro III, Euro IV, Euro IV).

Segue-se a categorização ARTEMIS, na figura 3.3, para os veículos pesados de mercadorias (Heavy Goods Vehicles – HGV):

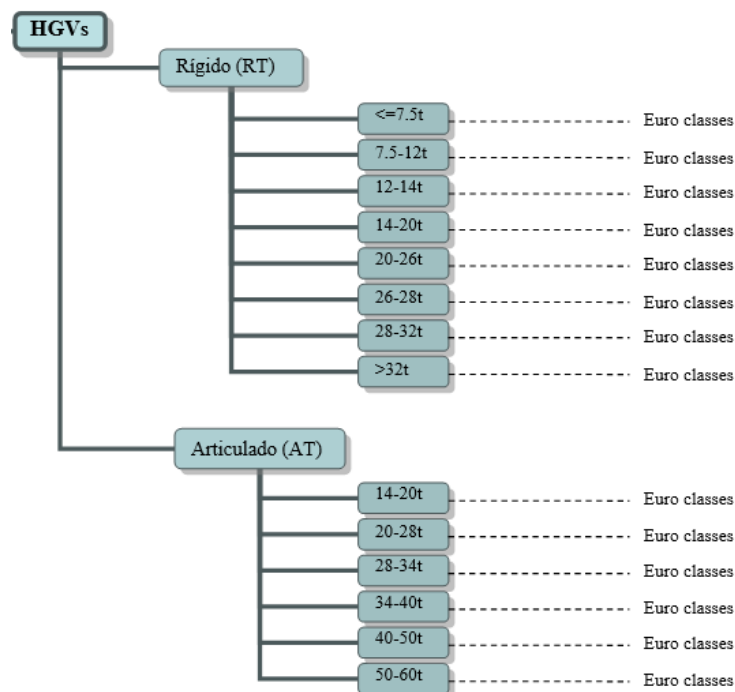


Figura 3.3 – Classificação Artemis para veículos pesados de mercadorias.

Distingue-se um total de 84 categorias de veículos pesados de mercadorias (sub-grupos).

Ciclos de Condução

Para gerar a base de dados dos fatores de emissão a metodologia ARTEMIS utiliza diferentes ciclos de condução, os quais estão diretamente relacionados com o estilo de condução, distinguindo a área de condução (urbana/rural), o tipo de estrada (autoestrada, estrada local, etc.), o limite de velocidade (50,60,70,80,90,100,110,120,130 km.h⁻¹) e o nível de tráfego (*freeflow*, *heavy*, *saturated*, *stop+go*). Os ciclos diferem individualmente consoante a categoria do veículo, a inclinação e a carga transportada, sendo impossível descrever todos os ciclos em detalhe aqui.

Ao utilizar-se este ou outro modelo para calcular as emissões, há que ter em conta que a realidade do comportamento de condução nem sempre se poderá ajustar ao utilizado nos ciclos de condução.

Outros critérios: Carga Transportada e Inclinação de estrada

As funções de fatores de emissão distinguem 3 diferentes níveis de carga do veículo (0%, 50% e 100%) e discriminam 7 diferentes inclinações da estrada possíveis (-6%,-4%,-2%,0%,+2%,+4%,+6%) (Boulter, P., Barlow, T., 2005).

Derivação das funções base dos fatores de emissão

Para cada combinação de sub-grupo, inclinação, carga transportada e poluente, foi ajustada uma curva de regressão aos dados de emissão, descrevendo desta forma o fator de emissão ($\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$) como uma função de velocidade média. Usaram-se 16 diferentes modelos de regressão (quadro B.1, em anexo), sendo que o selecionado foi o que tinha um maior r^2 . Nos casos em que modelo escolhido deu origem a resultados pouco plausíveis (valores de emissões negativas ou muito elevadas) foi selecionado outro mais realista.

No geral, os modelos ajustaram-se bem aos dados de entrada, com um r^2 superior a 0.9. A figura 3.4 ilustra um exemplo para um veículo do tipo RT, $\leq 7.5\text{t}$, Euro III.

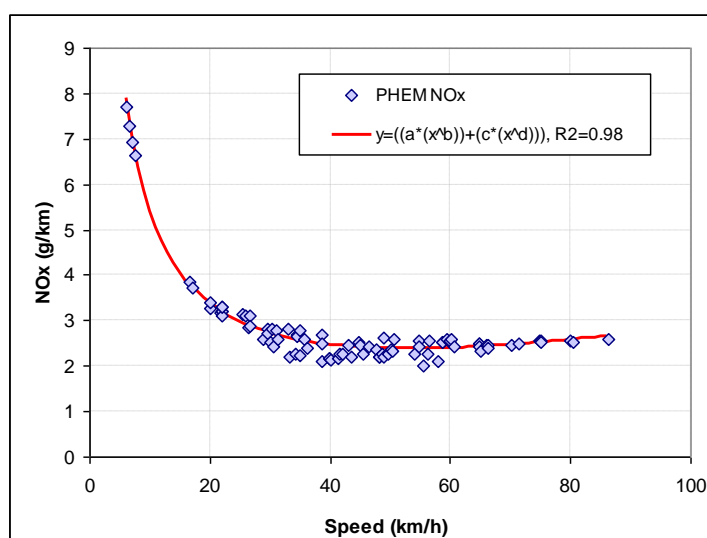


Figura 3.4 - Ajuste da curva de regressão para o subgrupo $t=RT$, $n = \leq 7.5\text{t}$, $i=\text{Euro III}$. (Boulter, 2005)

3.2.2 Cálculo de fatores de emissão baseado na metodologia ARTEMIS

Por forma a calcular os fatores de emissão dos veículos pesados de mercadorias utilizaram-se as funções⁷ recomendadas pelo projeto ARTEMIS.

3.2.2.1 Considerações Gerais

Em primeiro lugar, por forma a calcular os fatores de emissão para a zona em estudo considere-se a seguinte informação relativa à categorização das estradas em estudo:

Categorias de Estradas

No presente trabalho, consideraram-se dois tipos de estrada, designados por q : AE e IC/IP.

Cada tipo de estrada q é constituído por um conjunto de estradas que estão representadas na figura 3.2, sendo estas designadas por r .

Cada estrada r é dividida em segmentos, designados por s . No caso das estradas do tipo AE, esta subdivisão teve origem nas entradas e saídas da autoestrada, entre as quais existem contagem de tráfego (mais detalhe na secção 3.4.3). No caso das estradas do tipo IC/IP, cada estrada r é o único segmento s em estudo, portanto, para $q = IC/IP$ vem $r=s$, pois não se conseguiram localizar os pontos de referência do início e fim de segmentos de estrada entre os quais existem contagem de tráfego (apresentadas na secção 3.4.3).

Cada segmento s foi ainda dividido em subsegmentos, designados por ss , com aproximadamente 100m (Ferramenta do ArcMap: Editor → Split) com o objetivo de analisar a inclinação de estrada em cada subsegmento. No total, estudaram-se 3111 subsegmentos, 1694 relativos a estradas do tipo AE e 1417 relativos a estradas do tipo IC/IP.

Apresenta-se em anexo o quadro A.1 que descreve a codificação das estradas r , respetivos segmentos s e subsegmentos ss .

Seguem-se algumas considerações que foram tidas em conta com base na metodologia ARTEMIS por forma a seleccionar as funções a utilizar:

Categorias de Veículos

Todos os veículos presentes na categoria “veículos pesados de mercadorias” segundo a classificação ARTEMIS serão alvo de estudo. Cada veículo tem três atributos que o identifica:

⁷ Retiradas de: <http://www.inrets.fr/ur/ite/publi-autresactions/fichesresultats/ficheartemis/artemis.html>

o facto de ser articulado ou rígido, a categoria de peso e a respetiva classe de emissão, os quais serão identificados no presente estudo pelas seguintes identificações respetivamente: t , n e i .

Velocidade

As funções ARTEMIS são expressas em função da velocidade de circulação, sendo que o domínio da função apresenta um mínimo e um máximo admissível. Desta forma, em relação à velocidade, para cada veículo de um subgrupo t,n,i assumiu-se o máximo admissível da função velocidade-emissão, desde que esse valor se encontrasse dentro dos limites legais de velocidade⁸. Segue-se no quadro 3.1 um resumo das velocidades utilizadas para calcular os fatores de emissão.

Quadro 3.1 – Velocidade utilizadas para o cálculo dos fatores de emissão (km.h⁻¹)

		Categoria de inclinação (%)						
t	q	-6	-4	-2	0	2	4	6
RT	AE	72	86	86	86	84-86	65-71*	52-68*
	IC/IP	72	80	80	80	80	65-71*	52-68*
AT	AE	72	80	80	80	79-80	54-71**	38-68*
	IC/IP	70	70	70	70	70	54-70**	38-68*

*- Dado um certo veículo pertencente a um qualquer subgrupo t,n,i , a sua velocidade considerada será igual quer esteja numa AE, ou num IC/IP; **- Similarmente ao anterior caso, as velocidades são iguais, excepto em 8 casos, onde nas AE se assumiu 71 km.h⁻¹ e nos IC/IP 70 km.h⁻¹.

Carga Transportada

Para o presente estudo será considerada uma carga transportada de 50%.

Inclinação da estrada

Por forma a calcular a inclinação da estrada utilizou-se um *Digital Elevation Model* (DEM) da área em estudo (secção 3.4.2).

Para cada subsegmento ss calculou-se a sua inclinação média, designada por d , através da ferramenta do ArcMap: 3D Analyst Toolbox → Functional Surface → Add Surface Information Tool, que extrai essa informação ao DEM. Converteram-se as inclinações obtidas para as categorias de inclinações compatíveis com a metodologia ARTEMIS, designadas por f , de acordo com a conversão do quadro 3.2.

⁸ Para veículos pesados de mercadorias do tipo $t=RT$, o limite é de 90 km.h⁻¹ em AE e 80 km.h⁻¹ em estradas do tipo IC/IP. Para veículos do tipo $t=AT$, o limite é de 80 km.h⁻¹ em AE e 70 km.h⁻¹ em IC/IP. Fonte: (IMTT@, 2014a)

Quadro 3.2 – Critério de conversão das inclinações retiradas do ArcGIS para a categoria de inclinação ARTEMIS

Inclinação estimada, d (%)	Categoria de inclinação ARTEMIS, f
$0 < d \leq 0.5$	0
$0.5 < d \leq 2$	2
$2 < d \leq 4$	4
$d > 4$	6

De notar que, dependendo do sentido em que se viaja, a inclinação de estrada é positiva ou negativa. Como não se conseguiu determinar tal característica apenas se calculou o valor da inclinação de estrada em termos absolutos (valor positivo).

Poluentes

Os poluentes em estudo correspondem ao NO_x e PM, sendo que o tipo de poluente em estudo é designado por k , conforme a equação (1).

3.2.2.2 Aplicação de metodologia

Fatores de Emissão

Em cada subsegmento ss individual⁹ foi calculado um fator de emissão associado a um poluente k , para cada subgrupo de veículo (t, n, i) . As funções base de cálculo dos fatores de emissão que foram utilizadas tiveram em conta a categoria de inclinação f do subsegmento ss . Assim, para cada subsegmento ss , calculou-se um fator de emissão associado a uma inclinação positiva, $EF_{ss,s,r,q,k,t,n,i}^{+f}$, e outro a uma negativa, $EF_{ss,s,r,q,k,t,n,i}^{-f}$. Por exemplo, se num dado subsegmento a categoria de inclinação é $f=2$, calculou-se um fator de emissão para uma inclinação de 2% e outro para uma inclinação de -2%.

Por forma a calcular o fator de emissão para cada sentido do subsegmento ss , $\overline{EF}_{ss,s,r,q,k,t,n,i}$, considerou-se que este seria a média dos fatores de emissão associados ao sentido com uma inclinação de estrada positiva, $EF_{ss,s,r,q,k,t,n,i}^{+f}$, e ao sentido com uma inclinação de estrada negativa, $EF_{ss,s,r,q,k,t,n,i}^{-f}$. A equação (4) expressa esta ideia:

$$\overline{EF}_{ss,s,r,q,k,t,n,i} = \frac{EF_{ss,s,r,q,k,t,n,i}^{+f} + EF_{ss,s,r,q,k,t,n,i}^{-f}}{2} \quad (4)$$

⁹ subsegmento ss de cada segmento s , de cada estrada r , de um tipo de estrada q . Segue-se sempre esta lógica.

Na secção 3.3.1, para cada estrada r do tipo q , calcular-se-á o custo externo da poluição em cada segmento s . Desta forma, será necessário obter um fator de emissão ao nível do segmento s , designado por $EF_{s,r,q,k,t,n,i}$ ($\text{g}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{v}^{-1}$). Este corresponde à média dos fatores de emissão dos subsegmento ss , $\overline{EF}_{i,n,t,k,ss,s,r,q}$, tendo em conta o comprimento de cada subsegmento, l_{ss} , como fator de ponderação. Assim, para cada segmento, s , vem a equação (5):

$$EF_{s,r,q,k,t,n,i} = \frac{\sum_{ss}(\overline{EF}_{ss,s,r,q,k,t,n,i} \times l_{ss})}{l_s} \quad (5)$$

Os comprimentos dos segmentos s , l_s , estão apresentados no quadro A.2 em anexo.

Emissões

De acordo com a equação (2), as emissões totais calculam-se através do produto do fator de emissão pelos dados de uma atividade, por exemplo TMDA. Desta forma, para cada subsegmento ss calcularam-se as emissões, associadas ao tráfego que o percorre em ambos os sentidos ao longo de um dia para cada subgrupo t, n, i , designadas por $E_{ss,s,r,q,k}$ ($\text{g}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$). A equação (6) expressa esta ideia:

$$E_{ss,s,r,q,k} = \sum_t \sum_n \sum_i (\overline{EF}_{ss,s,r,q,k,t,n,i} \times V_{ss,s,r,q,t,n,i}) \quad (6)$$

A origem dos dados da variável $V_{ss,s,r,q,t,n,i}$, associados ao TMDA de um veículo pertencente a um subgrupo t,n,i a percorrer um subsegmento ss , serão explicados na secção 3.4.3.

3.3 Metodologia de cálculo de Custo externo da Poluição do ar

Para se calcular o custo externo relativo à poluição atmosférica, seguindo a metodologia recomendada pela Diretiva Eurovinheta (equação 1), necessitamos dos fatores de emissão, EF , quantificados através da metodologia ARTEMIS no subcapítulo 3.2.2, e ainda do custo monetário do poluente, PC ($\text{€}\cdot\text{g}^{-1}$). Para esta última parcela, assumiu-se os valores tabelados a partir do trabalho realizado por Brandt *et al.* (2010), que segue o modelo EVA, estando estes descritos na secção 2.3.3.

A metodologia proposta na Diretiva Eurovinheta foi aplicada com as devidas adaptações a este caso de estudo. Nomeadamente, o fator de emissão para além de variar com a classe de emissão i e com o tipo de poluente k também varia com a classe de peso n , com o tipo de veículo t , com o segmento s , estrada r e tipo de estrada q , enquanto que o valor monetário dos poluentes não depende do tipo de localização de estrada j .

Com a finalidade de estimar um custo externo de poluição atmosférica entre cada entrada e saída de autoestrada, correspondente aos segmentos em estudo, calculou-se o custo externo da poluição atmosférica ao nível do segmento.

Assim, para cada sentido de cada segmento s calculou-se o custo externo da poluição de NO_x e PM associado a um veículo pertencente ao subgrupo (t, n, i) , que corresponde ao produto do fator de emissão do poluente pelo seu valor monetário. O custo externo da poluição atmosférica devido a estes poluentes, $PCV_{s,r,q,t,n,i}$ (expresso em $\text{€} \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$) é dado pelo somatório do custo externo associado a cada um dos poluentes k , como vem expresso na equação (7):

$$PCV_{s,r,q,t,n,i} = \sum_k EF_{s,r,q,k,t,n,i} \times PC_k \quad (7)$$

em que $PCV_{s,r,q,t,n,i}$ corresponde ao custo da poluição atmosférica ($\text{€} \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$) atribuído a um veículo do tipo t , categoria de peso n , classe de emissão i num sentido do segmento de estrada s ; $EF_{s,r,q,k,t,n,i}$ é o resultado da equação 4, associado ao fator de emissão para um sentido de circulação ($\text{g} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{v}^{-1}$); PC_k é o custo monetário associado ao poluente k ($\text{€} \cdot \text{g}^{-1}$).

Optou-se por agregar os valores de custo dos diferentes segmentos num valor único para todos os tipos de estrada q , designando-se $PCV_{q,t,n,i}$ ($\text{€} \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$). Para tal fez-se uma média ponderada do custo $PCV_{s,r,q,t,n,i}$, tendo por fator de ponderação o comprimento de cada segmento s , l_s . Na equação (8) está transcrita esta ideia:

$$PCV_{q,t,n,i} = \frac{\sum_r \sum_s (PCV_{s,r,q,t,n,i} \times l_s)}{\sum_s l_s} \quad (8)$$

Com o objetivo de verificar se os custos obtidos $PCV_{q,t,n,i}$ estão em concordância com o valor máximo admissível recomendado pela Diretiva Eurovinheta (quadro 2.1), procedeu-se a uma comparação de ambos os valores, sendo que nos casos em que se ultrapassava o limite foi considerado esse valor como o custo a pagar. Dado que a maioria das AE não atravessa localidades, considerou-se o limite das estradas interurbanas, enquanto que nas restantes vias (IP e IC) usou-se o limite das estradas suburbanas, pois atravessam localidades.

Os custos entre os dois tipos de estrada q não apresentam diferenças significativas para veículos do mesmo subgrupo t, n, i . Desta forma apresenta-se um custo único por veículo, independentemente do tipo de estrada, sendo calculado pela média dos custos para um mesmo veículo entre os dois tipo de estrada, designando-se por $PCV_{t,n,i}$.

Calculou-se um custo que apenas variasse com a classe de emissão i , por forma a agregar ainda mais a informação. Utilizou-se informação estatística relativa ao peso e tipo de veículos pesados de mercadorias a circular em Portugal para se obter o custo PCV_i ($\text{€} \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$), calculado conforme a equação (9):

$$PCV_i = \sum_t \left[\sum_n \left(PCV_{t,n,i} \times \frac{M_n}{100} \right) \right] \times \frac{M_t}{100} \quad (9)$$

em que $PCV_{t,n,i}$ corresponde ao custo externo ambiental pago por um veículo de um subgrupo t,n,i ; M_n ¹⁰ é a percentagem de veículos a circular em Portugal com classe de peso n e M_t ¹¹ é a percentagem de veículos a circular em Portugal do tipo rígido (RT) ou articulado (AT).

Custo Externo Total

O custo externo total, $I_{(s,r,q)}$, associado ao tráfego de todos os veículos para a distância que percorrem por segmento s , é dado por:

$$I_{(s,r,q)} = \left[\sum_t \sum_n \sum_i (PCV_{q,t,n,i} \times V_{s,r,q,t,n,i}) \right] \times l_s$$

em que $I_{(s,r,q)}$ é o custo externo total da poluição atmosférica para todos os veículos que percorrem um segmento s ao longo de um dia ($\text{€} \cdot \text{dia}^{-1}$) por tipo de estrada q ; $PCV_{q,t,n,i}$ é o custo externo da poluição atmosférica associado a um veículo t,n,i a percorrer uma estrada do tipo q ; $V_{s,r,q,t,n,i}$ ¹² é o TMDA associado a um veículo que percorre um segmento de estrada s ; l_s é o comprimento do segmento s .

¹⁰

¹¹ Valores descritos com maior detalhe na secção 3.4.3.2

¹²

3.4 Dados de Entrada

Segue-se uma descrição da origem e tratamento dos dados de entrada necessários para efetuar os cálculos de fatores de emissão, emissões e custos.

3.4.1 Altimetria

Por forma a calcular as inclinações de estrada foi necessária informação de altimetria da zona em estudo. Para o efeito retirou-se do site da AEA¹³ um ficheiro DEM do tipo .tif. As elevações deste DEM correspondem a um *raster* com uma malha de 30x30 metros, fornecendo desta forma uma resolução elevada. A imagem 3.5 ilustra o DEM sob a área em estudo.

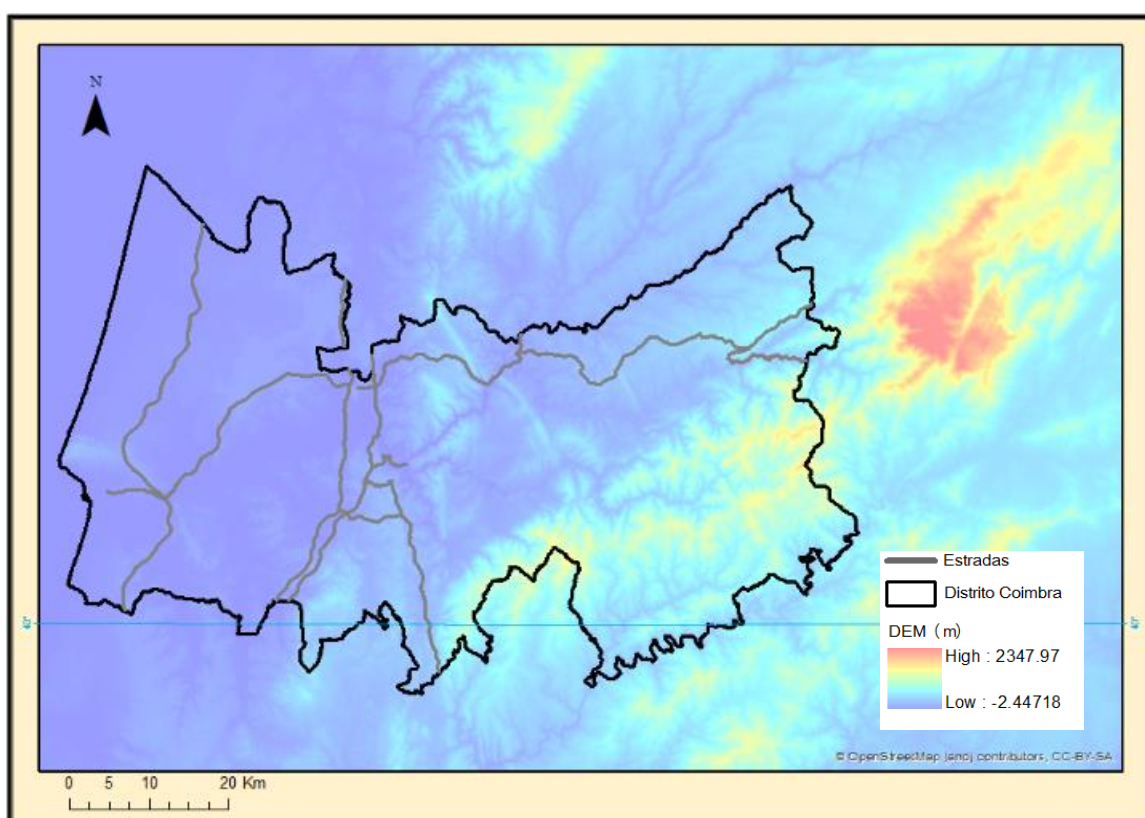


Figura 3.5 – Representação do modelo digital de elevação do terreno (DEM) na área em estudo

Esta informação foi utilizada para calcular as inclinações a nível dos subsegmentos *ss*, com auxílio de ferramentas do ArcGIS, conforme descrito na secção 3.2.2.1.

¹³ <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eu-dem#tab-european-data>

3.4.2 Rede de Estradas

O ficheiro *shapefile* das estradas do tipo AE foi obtido com o auxílio do *OpenStreetMap*, que se encontra mais atualizado a nível de estradas que percorrem a área em estudo. O *shapefile* das estradas do tipo IC/IP foi cedido pela entidade “Estradas de Portugal”.

Utilizou-se a carta administrativa de Portugal¹⁴, que permitiu, com base nos limites administrativos do Distrito de Coimbra, delimitar as r estradas em estudo. Utilizou-se o sistema de coordenadas do *Lisbon Hayford Gauss IPCC*.

3.4.3 Dados Estatísticos de tráfego

Compilaram-se dados estatísticos relativamente a contagens de tráfego (Tráfego Médio Diário Anual – TMDA) e composição da frota (% veículos pesados de mercadorias – rígidos e articulados, distribuição dos veículos pelas categorias de peso n e classe de emissões i). Segue-se uma descrição do procedimento de compilação e processamento desses dados.

3.4.3.1 Tráfego por tipo de estrada

Auto Estrada

Em relação ao TMDA, para os segmentos de AE, utilizou-se informação do *Relatório de tráfego na rede nacional de Auto-Estradas – 4º trimestre de 2014* (Instituto da Mobilidade e dos Transportes (IMT), 2014). Neste relatório os dados são apresentados em termos de tráfego médio diário mensal (TMDM), para cada mês do ano 2012, para cada segmento s de cada AE. Tendo em conta os dados do relatório, considerou-se que o TMDA para cada segmento s de estrada r do tipo $q=AE$, designado por $TMDA_{s,r,q}$, correspondia à mediana do TMDM ao longo do ano 2012.

Na figura 3.6 pode-se visualizar a variação do TMDM ao longo do ano de 2012 para cada segmento s . O gráfico mostra o valor máximo, o 3º quartil, a mediana, o 1º quartil, o valor mínimo e o valor médio.

¹⁴ Retirada de:

http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal_caop/caop_em_vigor/

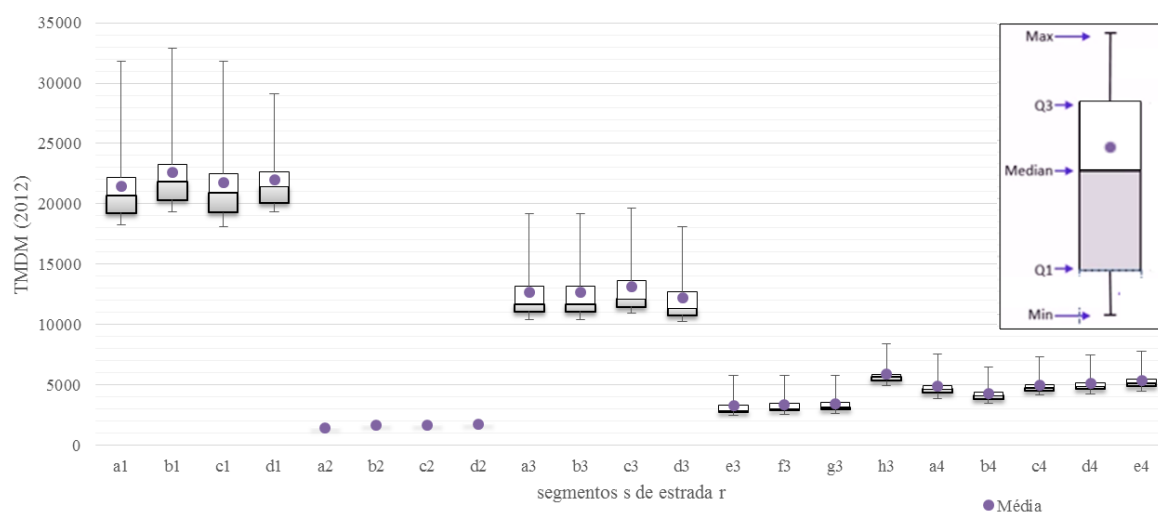


Figura 3.6 – Variação do TMDM ao longo do ano 2012, para cada segmento s de estrada r do tipo $q=AE$.

Para cada segmento de estrada, é notória a variação do TMDM ao longo dos meses do ano 2012, estando esta relacionada com a estação do ano: observou-se pelos dados que em meses de verão o TMDA é superior ao dos meses de inverno. Comparando o TMDM entre os vários segmentos, observa-se que os segmentos pertencentes à mesma estrada têm um TMDM idêntico, com exceção da A14 (a3, b3...g3, h3). Comparando o TMDM entre as diferentes estradas observa-se que é superior na A1 (a1, b1,c1, d1) e, de seguida, em alguns segmentos A14 (a3, b3, c3, d3).

Para os segmentos da A13 (a2,b2,c2,d2), para o ano 2012 apenas se registaram dados no mês de dezembro, portanto apenas se teve em conta esse valor. Tal deve-se ao facto da abertura à circulação nestes segmentos ter iniciado neste período.

Em relação à percentagem de pesados de mercadorias a circular nos segmentos s , designada por $\%PM_{s,r,q}$, foi cedida pelo INE, para o ano 2012. Para os segmentos da estrada A13 não foi fornecida esta informação. Assim, considerou-se que a percentagem de pesados de mercadorias a circular nos segmentos da estrada A13 corresponde à média da percentagem destes a circular nos segmentos das restantes autoestradas em estudo. Estes valores estão apresentados no quadro A.3 em anexo.

O TMDA correspondente aos veículos pesados de mercadorias que percorrem um segmento s , de uma estrada r , de um tipo de estrada $q=AE$, designado por $V_{s,r,q}$, é dado pela equação (10):

$$V_{s,r,q} = \frac{TMDA_{s,r,q} \times \%PM_{s,r,q}}{100} \quad (10)$$

Segue-se na figura 3.7 o TMDA de veículos pesados de mercadorias, $V_{s,r,q}$, a circular nos segmentos de AE.

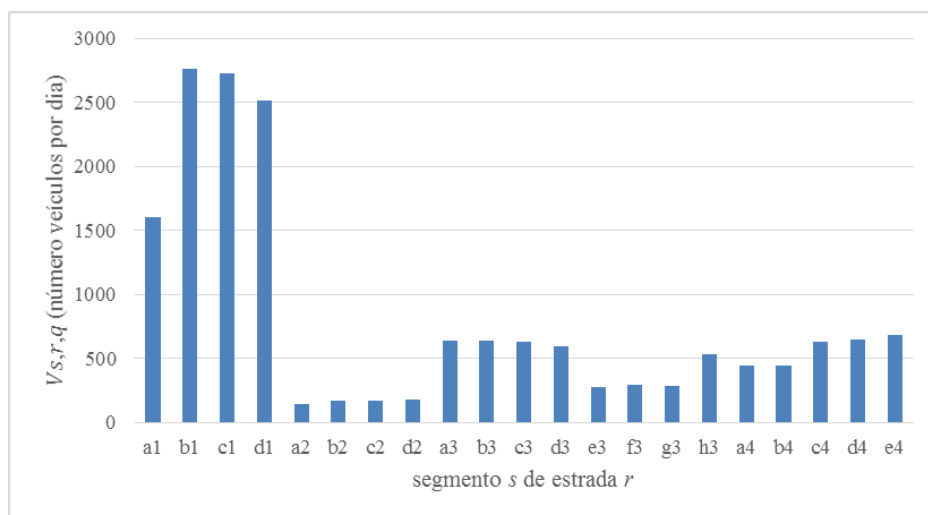


Figura 3.7 – TMDA de veículos pesados de mercadorias, $V_{s,r,q}$, a circular em segmentos s de estrada r do tipo $q=AE$ ($v.\text{dia}^{-1}$)

IC/IP

Em relação às restantes vias, IC/IP, a empresa *Estradas de Portugal* forneceu dados relativos ao TMDA associado a veículos pesados (de mercadorias), para o ano 2012. Segue-se no quadro A.4, em anexo, esta informação.

A figura 3.8 revela a variação do TMDA de veículos pesados de mercadorias ao longo dos vários troços de estrada para os quais foram fornecidos dados, para cada estrada. O IC2 é notoriamente a estrada com maior circulação diária.

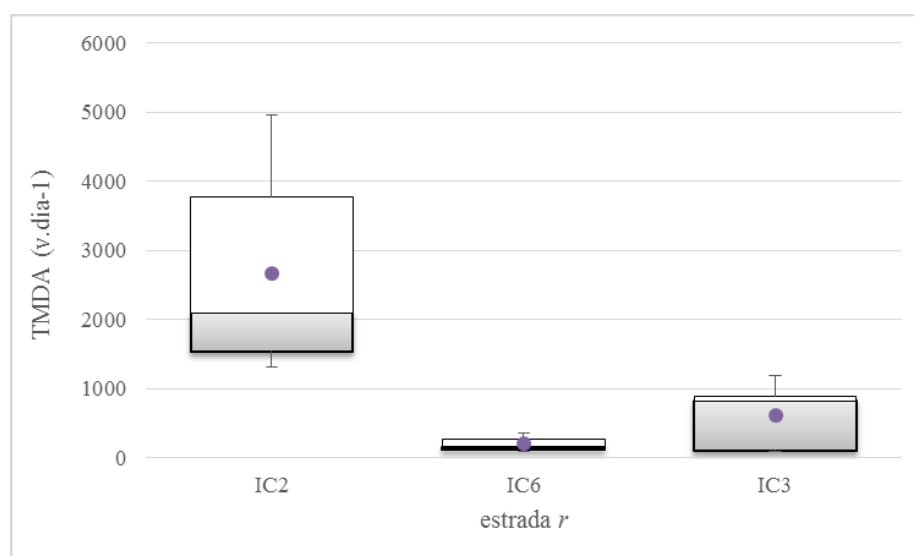


Figura 3.8 – Variação do TMDA de veículos pesados de mercadorias ao longo dos troços de estrada para os quais foram fornecidos dados, para cada estrada

Dado a dificuldade em localizar geograficamente os troços apresentados no quadro A.4, optou-se por estudar as estradas do tipo $q=IC/IP$ sem as dividir em segmentos s . Desta forma, assumiu-se que o tráfego de veículos pesados de mercadorias que passa ao longo de cada estrada r corresponde à mediana do TMDA ao longo dos troços dessa mesma estrada r , sendo este valor apresentado no quadro A.4. Assim, assumiu-se a estrada r como um único segmento s , $r=s$, tal como justificado em 3.2.2.1.

A entidade *Estradas de Portugal* apenas forneceu dados estatísticos para o IC2, IC6 e IC3, tendo por isso sido feita uma aproximação do TMDA das vias para as quais não se tinham dados. Nomeadamente para o IP3 e o IC7, assumiu-se o TMDA da estrada mais próxima geograficamente, neste caso o IC6.

Segue-se no quadro 3.3 o valor assumido de TMDA de veículos pesados de mercadorias que percorrem cada segmento s , de estrada r do tipo $q=IC/IP$, tendo em conta as considerações mencionadas.

Quadro 3.3 – TMDA de veículos pesados de mercadorias assumido para cada segmento s de estrada r do tipo $q=IC/IP$ (v.dia⁻¹)

Estrada=Segmento	IC2	IC3	IC6	IC7	IP3
$V_{s,r,q}$	2097	821	157	157	157

3.4.3.2 Distribuição do Tráfego por subgrupos de veículos

Tendo em conta o TMDA que percorre cada segmento s , de cada estrada r , de cada tipo de estrada q , $V_{s,r,q}$, distribuiu-se esse tráfego pelos subgrupos t,n,i de veículos, de acordo com as categorias da metodologia ARTEMIS.

Veículos Rígidos e Veículos Articulados

Em relação à distinção entre veículos rígidos (*Rigid Truck* – RT) e veículos articulados (*Articulated Truck* - AT), o relatório *Estatísticas dos Transportes e Comunicações* (Instituto Nacional de Estatística, 2013) contém esta informação para o Continente, para o ano 2012, com base em dados do *Inquérito ao Transporte Rodoviário de Mercadorias*. O quadro A.5 em anexo apresenta essa informação.

De notar que a terminologia utilizada para designar o tipo de veículo é distinta da terminologia usada pela metodologia ARTEMIS. No quadro A.5, segundo o INE, “camião” corresponde a “veículo rígido” (RT), por sua vez “comboio rodoviário” e “veículo articulado” correspondem ambos à categoria “veículo articulado” (AT).

Com base nesta informação calculou-se a percentagem de veículos do tipo t , M_t , sendo que $M_{t=RT}=55.1\%$ e $M_{t=AT}=44.9\%$.

Categoria de Peso

Por forma a distribuir o TMDA pelas categorias de peso n , teve-se em conta as informações do quadro A.5. Uma vez que os intervalos dos escalões de peso apresentados no quadro A.5 são diferentes dos intervalos das categorias de peso considerados pela metodologia ARTEMIS, teve que se fazer uma conversão entre os dois sistemas.

No final da conversão foi possível calcular a percentagem de veículos de categoria de peso n para o total dos veículos do tipo t , M_n .

Classe de Emissões

Em relação à distribuição pelas classes de emissões i teve-se em conta estatísticas da Associação Automóvel de Portugal (ACAP), relativas à percentagem de veículos de pesados de mercadorias em circulação em Portugal por intervalo de idade de fabrico do carro. No quadro A.6 em anexo apresentam-se estes dados, para o ano 2010.

Dado que os dados de TMDA dizem respeito ao período de 2012, considerou-se que estas estatísticas se mantêm para 2012, já que não se encontrou informação mais atualizada. Uma vez que os intervalos das idades apresentadas no quadro A.6 são diferentes dos intervalos das classes de emissão¹⁵ padronizadas, fez-se uma conversão calculando-se a percentagem de veículos por classe de emissão i , M_i . Como os veículos com idade superior a 21 anos incluem-se na classe de emissão Euro I e Convencional, distribuíram-se estes veículos em 90% na classe Euro I e 10% na classe convencional.

Com base nestas considerações sobre o processamento de dados, pode-se escrever a equação (11) que descreve a fórmula de cálculo do TMDA associado a um veículo de classe de emissão i , categoria de peso n e do tipo t , a percorrer um segmento s , designado por $V_{s,r,q,t,n,i}$:

$$V_{s,r,q,t,n,i} = V_{s,r,q} \times \frac{M_t}{100} \times \frac{M_n}{100} \times \frac{M_i}{100} \quad (11)$$

Note-se que os dados de TMDA fornecidos são ao nível dos segmentos s , sendo que este é igual ao TMDA dos subsegmentos ss . A distribuição percentual dos veículos pelos diferentes subgrupos t,n,i , encontra-se nos quadros A.7 e A.8, em anexo. Todos os segmentos de todas as estradas seguem esta distribuição.

¹⁵ Convencional-1988–1991; Euro I -1992–1996; Euro II - 1997–1999; Euro III -2000–2005; Euro IV -2006–2008; Euro V - 2009–2012

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na metodologia utilizada, seguem-se os resultados obtidos relativamente a quantificação de emissões, de PM e NO_x, e quantificação de custo externo relativo à poluição atmosférica destes poluentes devido à circulação de veículos pesados de mercadorias.

4.1 Quantificação de emissões

A presente secção contém os resultados referentes aos fatores de emissão utilizados e ainda uma estimativa das emissões totais na área em estudo, tendo por base os dados estatísticos de tráfego que a percorre.

4.1.1 Fatores de Emissão

No gráfico da figura 4.1 pode-se analisar a variação dos fatores de emissão $\overline{EF}_{ss,s,r,q,k,t,n,i}$ com a classe de emissão i e categoria de peso n , de um veículo do tipo $t=RT$, ao longo de um qualquer subsegmento ss com categoria de inclinação $f=0$, pertencente a uma estrada do tipo $q=AE$.

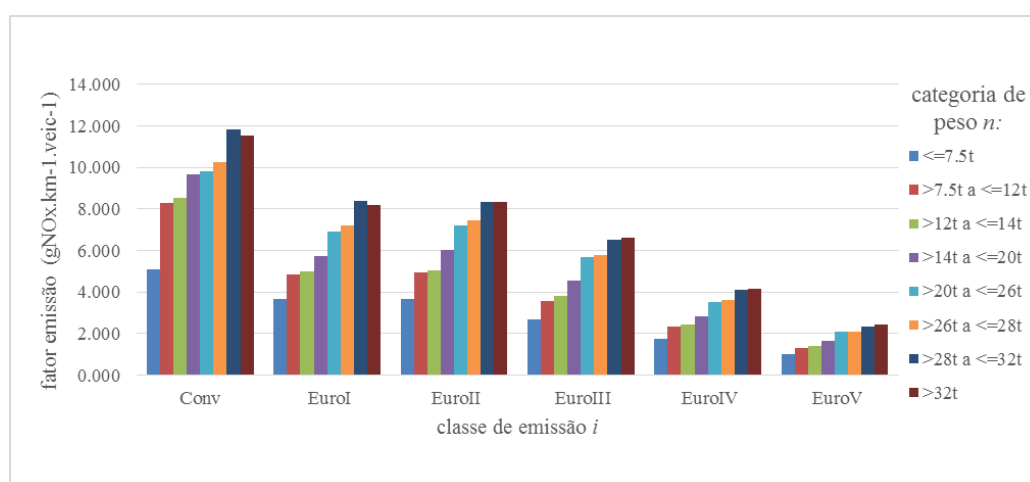


Figura 4.1 – Variação dos fatores de emissão $\overline{EF}_{ss,s,r,q,k,t,n,i}$ (g.km⁻¹.v⁻¹), de um veículo do tipo $t=RT$, a circular em estrada do tipo $q=AE$. Considerou-se $k=NO_x$ e um subsegmento ss com categoria de inclinação $f=0$.

Os fatores de emissão têm uma tendência crescente à medida que o peso do veículo aumenta para uma dada classe de emissão i . Outro aspeto que se infere do gráfico é o facto dos fatores de emissão de um veículo pertencente a uma dada categoria de peso n terem uma tendência decrescente à medida que a classe de emissão i é mais recente. Uma possível justificação para as exceções encontradas pode ser o facto das funções de cálculo dos fatores de emissão serem distintas para cada subgrupo (t,n,i) , devido aos diferentes ciclos de condução utilizados em cada caso pela metodologia ARTEMIS. Como em todos os modelos, poderão existir discrepâncias da realidade devido a simplificações desta.

Os gráficos aqui apresentados são para estradas do tipo $q=AE$ uma vez que em estradas do tipo $q=IC/IP$ a tendência mantém-se. Comparando os fatores de emissão de todos os subgrupos de veículos e categorias de inclinação¹⁶, os fatores de emissão utilizados associados a estradas do tipo $q=IC/IP$ são na sua maioria ligeiramente superiores aos fatores de emissão de estradas do tipo $q=AE$. Para uma mesma inclinação, o que faz diferir estes valores é a velocidade média de circulação utilizada, sendo que para estradas do tipo IC/IP a velocidade é tenuemente inferior, ou igual, à velocidade considerada para as AE, como descrito na secção 3.2.2.1 – “Velocidade”.

Por forma a analisar a variação dos fatores de emissão $\overline{EF}_{ss,s,r,q,k,t,n,i}$ ao longo de subsegmentos ss com diferentes categorias f de inclinação e entre diferentes subgrupos de veículos, criaram-se os gráficos apresentados nas figuras 4.2 e 4.3. Agruparam-se os veículos do mesmo tipo t e classe de emissão i para diferentes pesos n , com base na percentagem de veículos de cada categoria de peso que circula em Portugal, M_n .

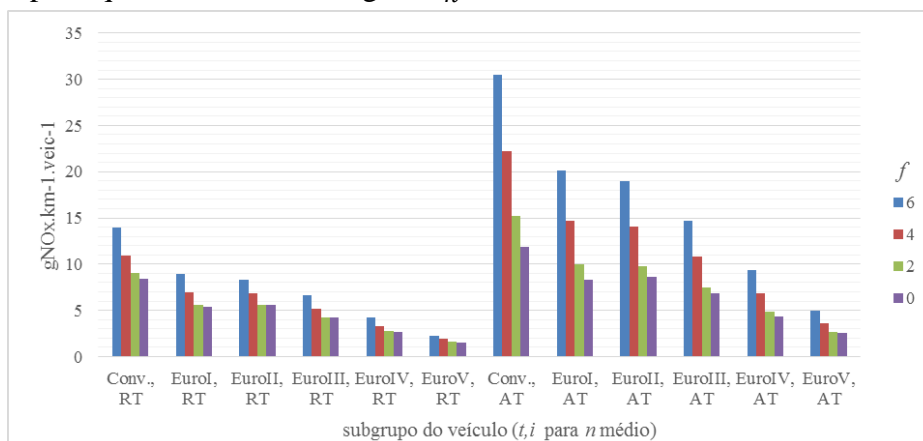


Figura 4.2 -Variação dos fatores de emissão $\overline{EF}_{ss,s,r,q,k,t,n,i}$ ($\text{g.km}^{-1}.\text{v}^{-1}$), de um veículo de classe de emissão i e tipo t com a categoria de inclinação f . Para $k= \text{NO}_x$, em estradas do tipo $q=AE$.

¹⁶ Não é possível apresentar aqui os fatores de emissão $\overline{EF}_{ss,s,r,q,k,t,n,i}$, associados a subsegmentos ss correspondentes a categoria de inclinação f , dada a extensão dos resultados (112 fatores de emissão distintos para cada tipo de estrada q , perfazendo 224).

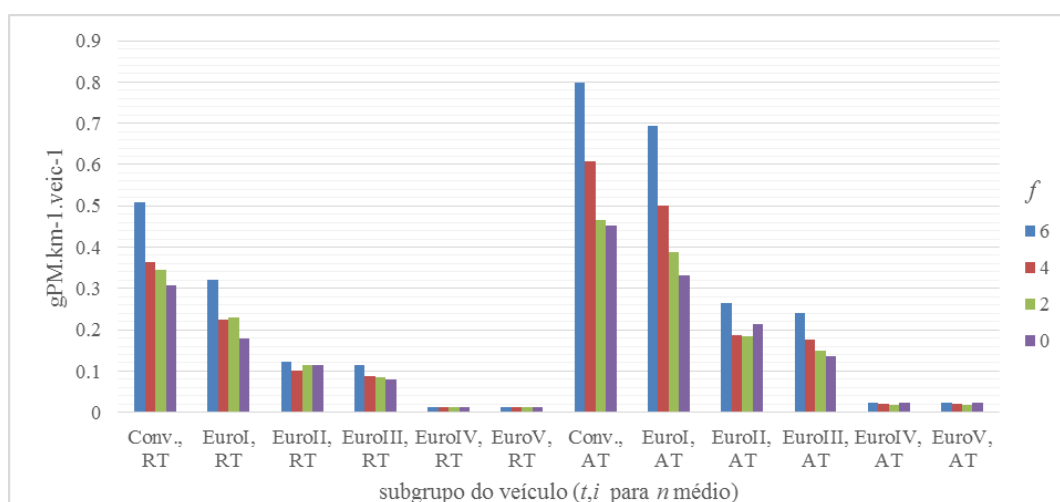


Figura 4.3 - Variação dos fatores de emissão $\overline{EF}_{ss,s,r,q,k,t,n,i}$ ($\text{g.km}^{-1}.\text{v}^{-1}$), de um veículo de classe de emissão i e tipo t com a categoria de inclinação f . Para $k=PM$, em estradas do tipo $q=AE$.

Entre veículos rígidos e articulados, os articulados têm uma gama de fatores de emissão superiores, uma vez que pesam mais. É ainda possível observar que para ambos os poluentes, os fatores de emissão têm uma tendência decrescente à medida que a classe de emissão i é mais recente.

Existe uma diferença notória entre os fatores de emissão dos dois poluentes para um veículo pertencente a um subgrupo com a mesma classe de emissão i e mesmo tipo t . Para o poluente NO_x , à medida que a categoria de inclinação f diminui, os fatores de emissão tendem a diminuir, o que seria de esperar para todos os casos. No entanto, para o poluente PM, existem diversos casos em que esta tendência não é seguida. Nestes casos, tal acontece devido aos fatores de emissão $EF_{ss,s,r,q,k,t,n,i}^{+f}$ e $EF_{ss,s,r,q,k,t,n,i}^{-f}$ que lhes deu origem, pela aplicação da equação (4), terem uma gama de valores idêntica para um veículo pertencente à mesma classe de emissão i e tipo t , como é possível verificar na figura 4.4.

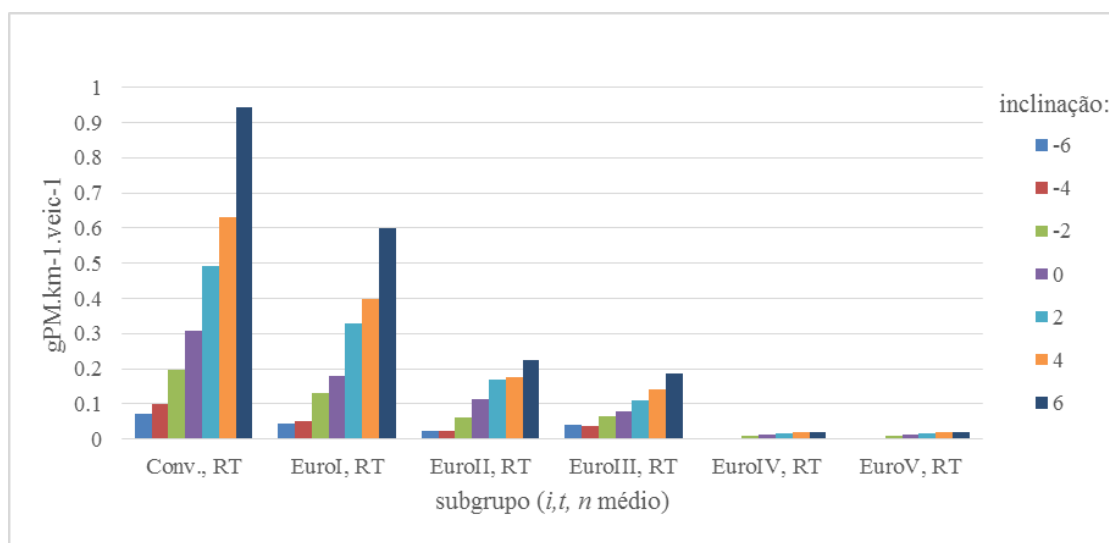


Figura 4.4 –Variação dos fatores de emissão base, associados a inclinações positivas e negativas, com a classe de emissão i e com a inclinação. Para $k=PM$, $q=AE$, $t=RT$.

No que toca aos fatores de emissão ao nível de cada segmento s , $EF_{s,r,q,k,t,n,i}$, o que faz diferir o seu valor entre os vários segmentos, para um mesmo veículo (t,n,i), é a frequência relativa com que cada categoria de inclinação f se encontra presente nos subsegmentos ss de um segmento. No quadro A.9, em anexo, apresentam-se estes dados. Na figura 4.5 podemos visualizar a distribuição da frequência relativa com que cada categoria de inclinação está presente ao longo de todos os segmentos s , distinguindo-se estradas de cada tipo q .

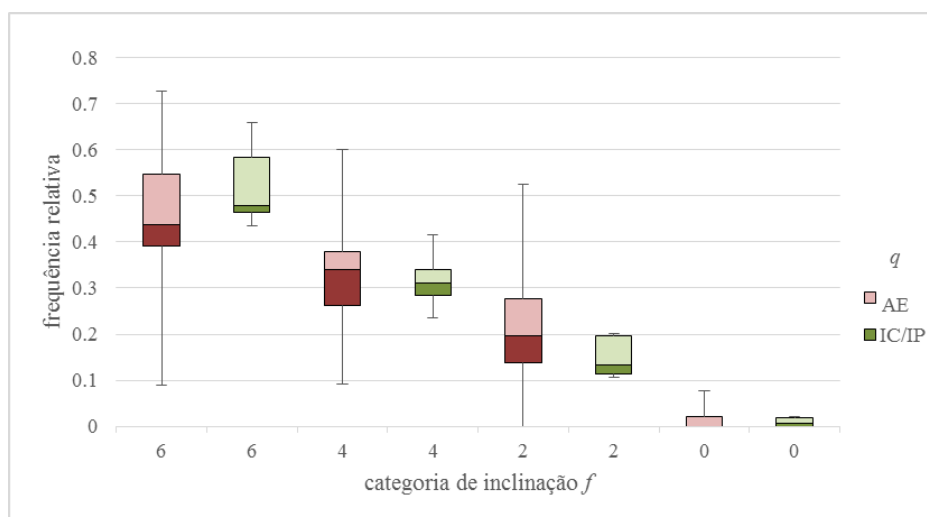


Figura 4.5 – Distribuição da frequência relativa com que cada categoria de inclinação f está presente ao longo de todos os segmentos s , para cada tipo de estrada q

4.1.2 Emissões

Esta secção tem em conta os dados estatísticos de tráfego que percorre a área de estudo por forma a analisar a totalidade das emissões. Os gráficos do tipo *boxplot*, apresentados nas figuras 4.6 e 4.7, mostram a variação das emissões ao longo de cada estrada r do tipo $q=AE$, com base nas emissões a nível de cada subsegmento ss dessa mesma estrada. Os valores utilizados correspondem a $E_{k,ss,s,r,q}$ (aplicação da equação (6)). Em cada gráfico está representado o valor máximo, o 3º quartil, a mediana, o 1º quartil, o mínimo e a média (ponto roxo).

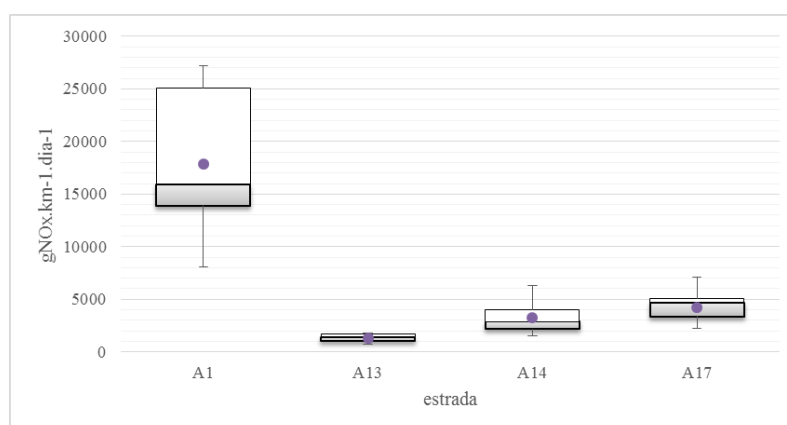


Figura 4.6 – Variação das emissões de NO_x , $E_{k,ss,s,r,q}$ em $\text{g.km}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, ao longo de todos os subsegmentos ss de cada estrada r do tipo $q=AE$.

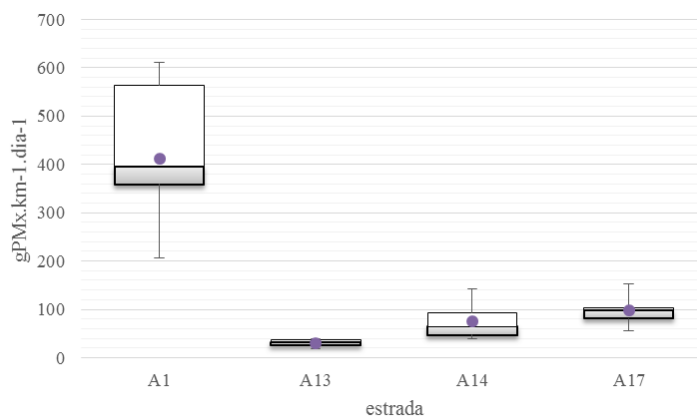


Figura 4.7- Variação das emissões de PM, $E_{k,ss,s,r,q}$ em $\text{g.km}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, ao longo de todos os subsegmentos ss de cada estrada r do tipo $q=AE$.

É possível verificar que nas estradas mais movimentadas as emissões são significativamente maiores, destacando-se a A1, como seria de esperar. A A13, dado que é uma estrada onde a circulação é recente, tem menos tráfego e, portanto, as emissões são mais reduzidas.

Em relação às estradas do tipo $q=IC/IP$ não é possível apresentar gráficos idênticos, uma vez o TMDA foi considerado o mesmo em todos os subsegmentos ss , sendo que é esta variável fator que provoca a variação apresentada no gráfico.

Nas figuras 4.8 e 4.9, apresentam-se, geograficamente, as emissões totais por quilómetro de segmento s e por dia, $E_{k,s,r,q}$, calculadas com base nos fatores de emissão a nível do segmento ($EF_{s,r,q,k,t,n,i}$). Não se apresentam as emissões ao nível dos subsegmentos ss uma vez que não se conseguiriam distinguir diferenças entre os subsegmentos, dada a escala reduzida do mapa comparada com o comprimento dos subsegmentos que têm cerca de 100m.

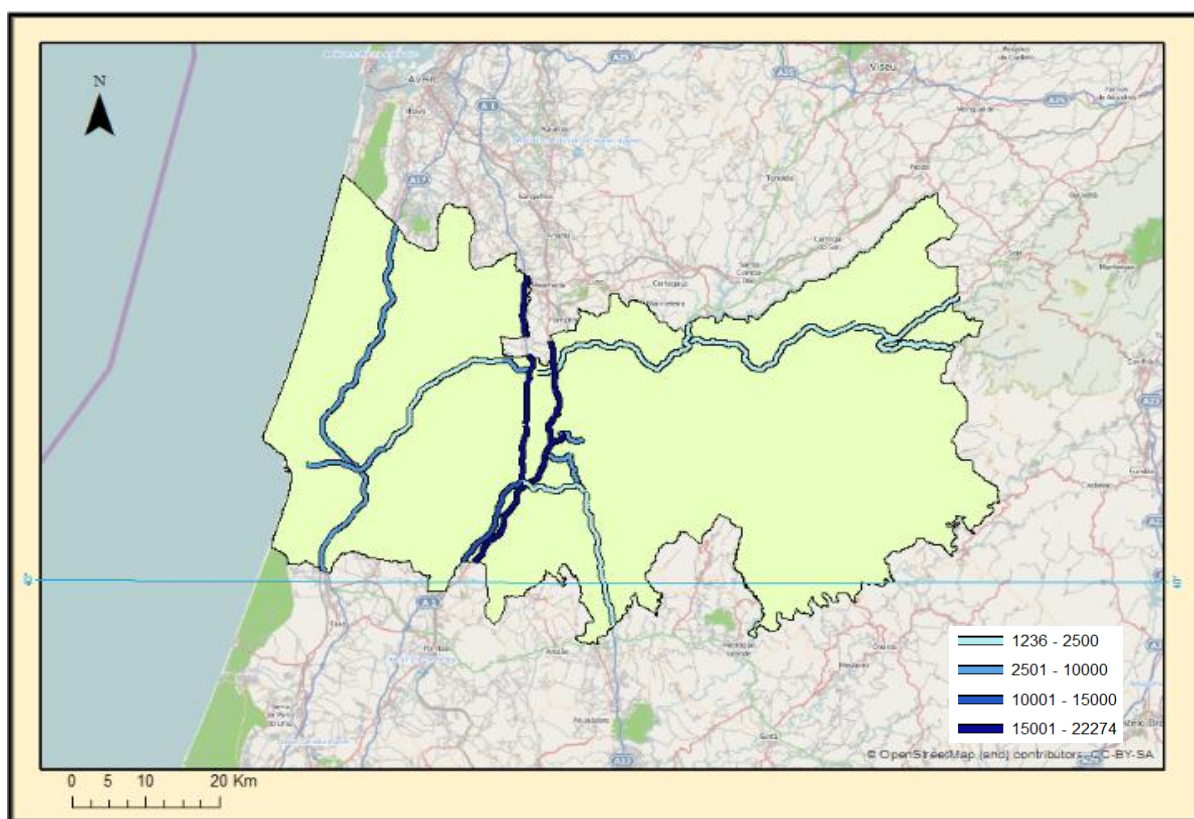


Figura 4.8 – Emissões de NO_x , $E_{k,s,r,q}$ em $g.km^{-1}.dia^{-1}$, por segmento s de estrada r

Os níveis de maiores de emissões de ambos os poluentes, emitidos por veículos pesados de mercadorias, são relativos às vias onde o tráfego é mais elevado, nomeadamente a A1 e IC2.

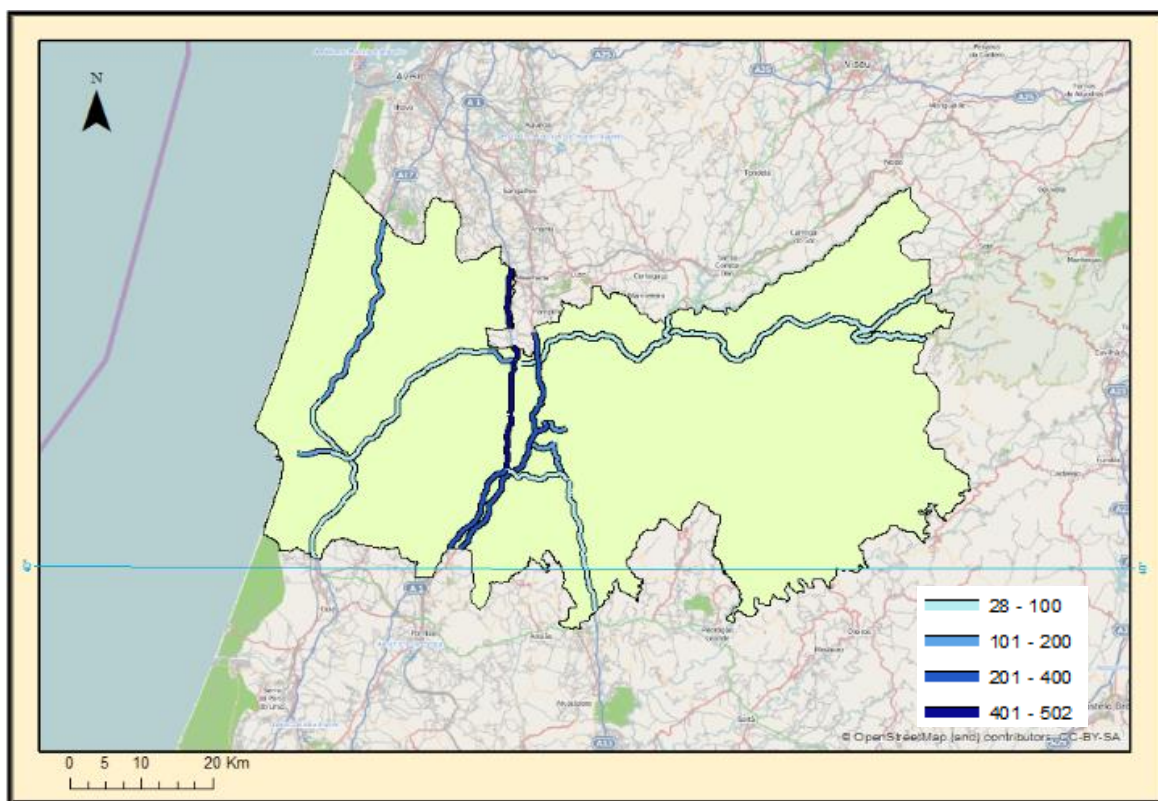


Figura 4.9 - Emissões de PM (g.km⁻¹.dia⁻¹) por segmento s de estrada r

4.2 Quantificação de custo externo da poluição atmosférica

Seguem-se os resultados relativos ao custo externo da poluição atmosférica devido a circulação de veículos pesados de mercadorias no Distrito de Coimbra.

4.2.1 Valor estimado para a área em estudo

Ao comparar-se a contribuição de cada um dos poluentes para o custo total, $PCV_{s,r,q,t,n,i}$, constata-se que a maior contribuição corresponde ao NO_x pelo facto de os fatores de emissão, $EF_{s,r,q,k,t,n,i}$, deste poluente serem superiores aos de PM (entre 16 a 380 vezes superiores, consoante o subgrupo a que o veículo pertence). No entanto, o custo unitário, PC_k (€·g⁻¹), das PM é superior ao de NO_x em cerca de 8 vezes, mas tal nunca compensa o facto do fator de emissão de NO_x ser superior.

Inicialmente pretendia-se apresentar um custo externo por segmento s que fosse distinto para cada veículo de um subgrupo t,n,i : $PCV_{s,r,q,t,n,i}$. No entanto, os resultados mostraram existir

pequenas variações do valor do custo externo de um veículo pertencente a um subgrupo t,n,i entre os diferentes segmentos s que percorre. Essas variações devem-se à frequência relativa com que cada categoria de inclinação f , correspondente aos segmentos ss , se encontra presente num segmento s . Da mesma forma, as variações dos custos associados a estradas de diferentes tipos q eram mínimas.

Assim, optou por se apresentar um custo que apenas variasse com o subgrupo t,n,i do veículo. Em anexo, nos quadros C.1 e C.2 é apresentada a estimativa deste custo externo, $PCV_{t,n,i}$, em $\text{cent.km}^{-1}.\text{v}^{-1}$.

Segue-se no quadro 4.10 uma estimativa simplificada do valor do custo externo da poluição do ar, que varia apenas com a classe de emissão i do veículo, custo esse designado por PCV_i . Estes valores são menos detalhados que os anteriores, podendo a sua implementação não refletir os valores reais. A sua vantagem passa por serem mais fáceis de atribuir aos veículos, sendo apenas necessário saber a classe de emissão do veículo pesado de mercadoria.

Quadro 4.10 - Custo da poluição atmosférica (NO_x+PM), PCV_i , a aplicar em cada sentido de estradas a veículos pesados de mercadorias, em $\text{cent.km}^{-1}.\text{v}^{-1}$

Classe de Emissão i	PCV_i ($\text{cent.km}^{-1}.\text{v}^{-1}$)
Convencional	10.45
Euro I	7.02
Euro II	5.84
Euro III	4.59
Euro IV	2.63
Euro V	1.45

4.2.2 Custo externo total na área em estudo

O custo externo total da poluição do ar, $I_{(s,r,q)}$, associado a todos os veículos pesados de mercadorias que circulem a área em estudo rondaria 4 000 00 euros por ano (com base nos dados estatísticos de TMDA e comprimento do respetivo segmento). O custo externo total em estradas do tipo AE estimou-se em 2 213 020 €. ano^{-1} e em estradas do tipo IC/IP em 1 811 180 €. ano^{-1} .

Em anexo encontra-se no quadro C.5 uma descrição mais detalhada do custo externo total (em €. $\text{unidade tempo}^{-1}$), para cada segmento de estrada.

Na figura 4.10, apresenta-se, geograficamente, o custo externo total, por quilómetro de segmento s e por dia (com base nos dados estatísticos de TMDA, sem afetar pelo comprimento). É possível verificar que o custo total é superior na A1 e IC2, devido ao maior tráfego que percorre estas estradas.

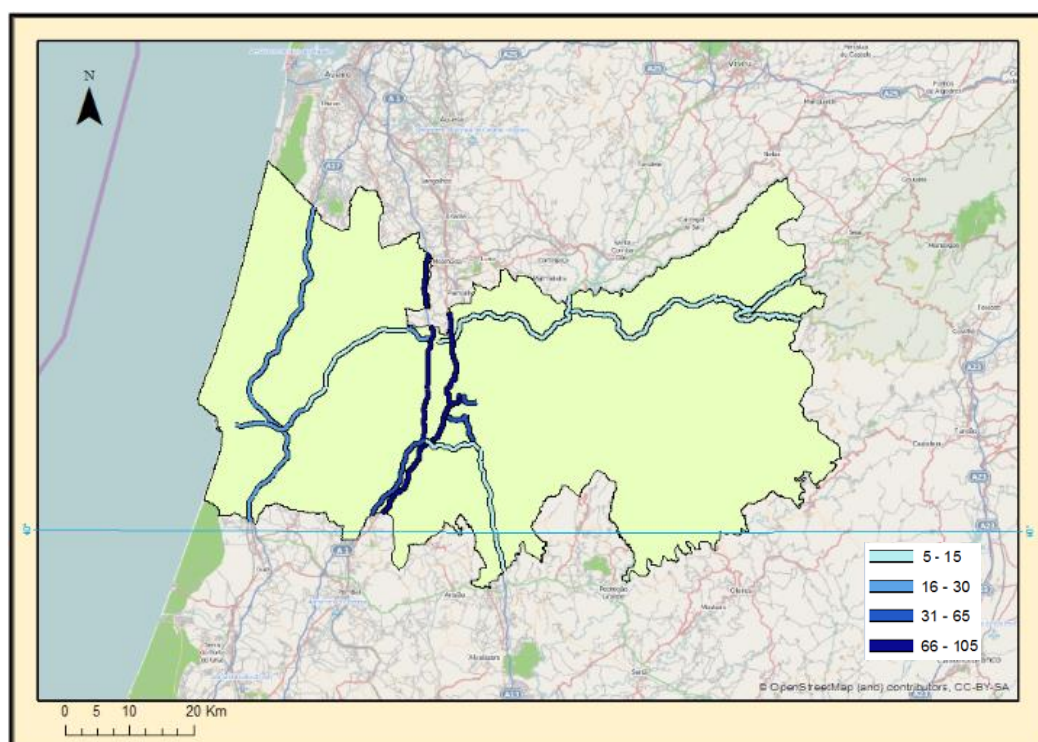


Figura 4.10 – Custo total por segmento s , $I_{(s,r,q)}/l_s$, em €. $\text{km}^{-1}.\text{dia}^{-1}$

5 CONCLUSÃO

5.1 Considerações Finais

Com este trabalho conseguiu-se cumprir os objetivos propostos relativamente ao cálculo das emissões e custo externo dos poluentes NO_x e PM, emitidos por veículos pesados de mercadorias a percorrer as vias do distrito de Coimbra.

Os valores apresentados referentes ao custo externo da poluição atmosférica foram obtidos por uma metodologia de cálculo de fatores de emissão, o mais atualizada possível para o conhecimento atual, e com base nos valores de uma técnica de valorização monetária do custo dos poluentes que reflete as especificações de Portugal.

Os resultados mostram que o prejuízo que os veículos pesados de mercadorias causam na saúde pela emissão de poluentes atmosféricos na área em estudo traduz-se num custo por veículo que varia entre 0.5 a 14 cent.km⁻¹, conforma a idade e peso do veículo. Os veículos com tecnologias mais recentes (p.e. classe Euro V) emitem menos poluentes e, portanto, é lhes atribuído o custo mínimo, sendo o custo diretamente proporcional à idade do veículo. Em relação ao peso do veículo constatou-se que também existe uma relação de proporcionalidade direta entre este e as emissões e custos estimados.

Neste trabalho estimou-se o custo externo com dois níveis diferentes de detalhe:

- a um nível mais detalhado, um custo distinto para veículos que tenham diferentes pesos e diferentes classes de emissões (associadas a diferentes tecnologias de redução de emissões);
- a um nível mais agregado, um custo que apenas seja distinto consoante a classe de emissão do veículo.

O custo externo total da poluição do ar, associado a todos os veículos pesados de mercadorias que circulam na área em estudo (com base nos dados estatísticos de TMDA usados) rondaria cerca de 4 000 000 € por ano.

Numa ótica de internalização dos custos externos, caberia às entidades competentes a decisão do nível de detalhe usado. Um nível mais detalhado permite que os veículos paguem um custo mais realista, de acordo com as suas emissões. Caberia ainda às entidades competentes pela

internalização do custo a decisão de incluir a totalidade, ou apenas uma percentagem, do custo, e se a todos os veículos ou não. Segundo a Diretiva Eurovinheta, os veículos com peso inferior a 12 ton podem ficar imunes de pagar este custo, desde que o Estado Membro justifique a razão dessa escolha.

A relevância do resultado deste trabalho liga-se ao facto de os custos externos serem um importante indicador de integração dos aspetos ambientais nas estratégias da política de transportes, no apoio à decisão e em avaliação de impacte ambiental, assumindo-se como um instrumento importante para a definição de políticas a implementar.

5.2 Limitações

Ao longo do trabalho foram efetuadas aproximações, por questão de falta de dados disponíveis, e agregações, para compactar a extensa informação. No entanto, como é sabido, ao agregar a informação perdem-se sempre dados.

Em relação às aproximações, em certos casos podemos estar a usar valores que não são os mais realistas, mas dado que não se tinha acesso à informação mais detalhada ou atualizada foi necessário efetuar tais aproximações. Por exemplo, não se teve acesso ao tráfego associado ao IP3 e IC7, assumindo-se para estas vias o TMDA da via geograficamente mais próxima, o IC6. Em relação aos dados de TMDA associados a vias do tipo IC/IP não se conseguiu identificar os troços de estrada para os quais foram fornecidos dados de TMDA, tendo-se usado o valor da mediana para a totalidade da estrada. No que toca às estatísticas da idade dos veículos, utilizadas para distribuir os veículos pelas classes de emissão, não foi possível ter acesso a essa informação para o mesmo ano dos dados de tráfego (2012), tendo-se usado para o ano 2010.

A inclinação é um fator determinante no cálculo dos fatores de emissão. Neste trabalho não foi possível atribuir o tráfego a cada sentido de circulação e tratar separadamente a inclinação positiva e negativa de forma a selecionar os fatores de emissão adequados. Desta forma considerou-se um fator de emissão médio igual em ambos os sentidos das estradas, o que resultou num custo igual em ambos os sentidos.

No que toca à valorização monetária dos poluentes (em $\text{€}\cdot\text{g}^{-1}$), a partir da metodologia selecionada, não foi encontrado um valor do custo unitário da poluição com maior detalhe do que a nível nacional. Desta forma, pode estar patente pelo uso deste valor uma alteração da realidade, já que as condições de dispersão e concentração da poluição diferem de zona para zona do país.

Os valores de custos dos poluentes utilizados são originados no trabalho de Brandt., J. *et al.*, “Marginal damage costs per unit of air pollution emissions”, o qual tem em conta a avaliação monetário dos diversos efeitos em preços do ano 2010 (€/caso⁻¹). Até ao presente ano essa avaliação monetária muito provavelmente sofreu alterações, devido por exemplo a diferenças dos custos de hospitalização e tratamento, sendo esta questão uma limitação. No entanto, o valor dos custos também sofre variações ao longo do tempo devido à constante alteração do valor da moeda, tendo-se para o efeito atualizado o valor do custo dos poluentes (€/g⁻¹) com a taxa de inflação entre o período 2010-2014.

5.3 Trabalho Futuro

Um dos objetivos da internalização do custo externo da poluição atmosférica passa por mover o tráfego de mercadorias para modos menos poluentes, nomeadamente o ferroviário. Um estudo que analisasse as emissões totais e custos externos pelo modo ferroviário poderia trazer mais força a este objetivo, permitindo comparar os dois modos de transporte. Com resultados de emissões e custos para diferentes modos de transporte poder-se-ia fazer uma análise multicritério e escolha de percurso ótimo, por forma a averiguar o modo de transporte de mercadorias que favoreça o desenvolvimento sustentável.

Seria interessante realizar um estudo que permitisse valorizar monetariamente o efeito da poluição atmosférica na saúde a nível mais local, através de uma metodologia *Impact Pathway Approach*, tendo em conta a população e características de cada local.

Sugere-se ainda a realização de estudos que recaiam sobre o custo de outras externalidades dos transportes para além da poluição do ar. No caso da poluição do ar no futuro poder-se-ia introduzir no cálculo de custo externo outros efeitos para além dos que afetam a saúde, nomeadamente danos sobre a natureza, culturas e materiais.

Por forma a criar soluções mais sustentáveis de mobilidade de mercadorias serão necessários estudos que se foquem sobre as melhores soluções onde investir a receita gerada pela internalização do custo externo da poluição atmosférica, e de outros custos externos.

Por fim, estudos sobre a receptividade da população à internalização dos custos externos, e sobre os efeitos que a sua introdução provocaria, seriam igualmente relevantes.

BIBLIOGRAFIA

- ACAP – Associação Automóvel de Portugal. (2010). “Estatísticas do sector automóvel – 2010”.
- Angelino, E. (2007). “TFEIP Expert Panel on Transport”. APAT.
- APA. (2012). “Relatório do Estado do Ar Ambiente 2012”.
- Belhaj, M., Fridell, E. (2010). “External costs in the transport sector: A literature review”. Swedish Environmental Research Institute.
- Bickel, Peter et al. (2005). “HEATCO -Deliverable 5 Proposal for Harmonised guidelines”.
- Boer, E. et al. (2009). “Are trucks taking their toll?” Delft
- Borrego, C. (2004). “Poluição Atmosférica I”. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.
- Boulter, P., Barlow, T. (2005). “ARTEMIS: Average speed emission functions for heavy-duty road vehicles”.
- Brandt, Jørgen et al. (2011). “Assessment of Health–Cost Externalities of Air Pollution at the National Level using the EVA Model System”.
- Brandt, J. et al. (2010). “Marginal damage costs per unit of air pollution emissions”.
- Brandt, J. et al. (2013). “Contribution from the ten major emission sectors in Europe and Denmark to health-cost externalities of air pollution using the EVA model system - an integrated modelling approach”.
- CCE. (2001). “Comunicação da Comissão: Programa Ar Limpo para a Europa (CAFE) - Para uma Estratégia Temática em matéria de Qualidade do Ar”.
- Censos. (2011). “População – 2011”.
- Coutinho, M. et al. “Os custos externos como instrumento de apoio à decisão de políticas de transportes: o exemplo da rede ferroviária de alta velocidade em Portugal”. Aveiro
- Desconhecido. (2009). “Caraterização socioeconómica do distrito de Coimbra”.
- Doll, C., van Essen, H. (2008). “Road infrastructure cost and revenue in Europe”. Karlsruhe, Delft.
- EEA. (2003a). “TERM 2002 25 EU — External costs of transport - Indicator fact sheet”.
- EEA. (2012). “European Union emission inventory report 1990–2010 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP)”.
- EEA. (2013a). “Air quality in Europe — 2013 report”.
- EEA. (2013b). “EEA Signals 2013 — Every breath we take. Improving air quality in Europe”.
- EEA. (2013c). “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013”. Copenhagen. 978-92-9213-403-7/1725-2237.
- EEA. (2013d). “Road user charges for heavy goods vehicles (HGV)”. Copenhagen.
- EEA. 2010. “The European environment: State and outlook 2010 synthesis”. Copenhagen.
- Eichlseder, Helmut et al. (2009). “Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3”.

-
- European Commission. (2011). “Directive 2011/76/EU of the European Parliament and of the Council of 27 September 2011 amending Directive 1999/62/EC on the charging of heavy goods vehicles for the use of certain infrastructures”.
 - Gomes, Pedro et al. (2011). “Custos e Benefícios, à escala local, de uma Ocupação Dispersa - Anexo 8: Custos internos e externos de Mobilidade em Portugal”. Aveiro.
 - H. Sommer et al. “Economic evaluation of health impacts due to road traffic-related air pollution”.
 - Hagemann, G. (2013). “Delay and Environmental Costs of Truck Crashes”. Cambridge.
 - Hirschmann, Karin et al. (2010). “A New Method to Calculate Emissions with Simulated Traffic Conditions”. 13th International IEEE - Annual Conference on Intelligent Transportation Systems.
 - Holland, Mike et al. (2005). “Damages per tonne emission of PM2.5, NH3, SO2, NOx and VOCs from each EU25 Member State (excluding Cyprus) and surrounding seas”. AEA Technology Environment.
 - Instituto da Mobilidade e dos Transportes (IMT). (2014). “Relatório de Tráfego na rede nacional de auto-estradas - 4º trimestre de 2013”. Lisboa.
 - Instituto Nacional de Estatística. (2013). “Estatísticas dos Transportes e Comunicações 2012”. 978-989-25-0204-5/0377-2292.
 - Korzhenevych, A. et al. (2014). “Update of the Handbook on External Costs of Transport”. European Commission – DG Mobility and Transport.
 - Kouridis, et al. (2010). “Uncertainty Estimates and Guidance for Road Transport Emission Calculations”.
 - Levin, Tomas. (2012). “Developing a New Emission Model for Freight Transport”. Trondheim, NTNU.
 - Maibach, M. et al. (2008). “Handbook on estimation of external costs in the transport sector”. Delft.
 - Miola, A. et al. (2008). “Review of the measurement of external costs of transportation in theory and practice”. Luxembourg.
 - Moreira, Sandra. (2010). “Procedimentos regionais de informação e alerta no âmbito da qualidade do ar”. APA.
 - OECD. (2002). “Glossary of Statistical Terms”.
 - PORTAL. (2003). “Ambiente, Energia e Transportes”.
 - Publications Office of the European Union. (2013). “EU transport in figures - Statistical Pocketbook 2013”. Luxembourg. 978-92-79-28860-9.
 - Rexeis, M. et al. (2005). “Heavy duty vehicle emissions -Final Report for ARTEMIS WP 400”.
 - Santos, Georgina et al. (2010). “Part I: Externalities and economic policies in road transport. Research in Transportation Economics”.
 - Sjödin, Åke et al. (2008). “Evaluation of European road transport emission models against on-road emission data as measured by optical remote sensing”.
 - Small, Kenneth A. (1977). “Estimating the air pollution costs of transports modes”. Vol. Journal of Transport Economics and Policy.
 - Teixeira, Paulo. (2008). “Custos e externalidades associados à mobilidade”.
 - U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration. (2005). “HERS (Highways Economics Requirements System) - State Version”.
 - Universidade de Aveiro. “TREM- Modelo de Emissões dos Transportes para Fontes em Linha – Metodologia”.
-

-
- van Essen, H. et al. (2012). “An inventory of measures for internalizing external costs in transport”. European Commission. Brussels.
 - van Essen, H.P. et al. (2001). “External Costs of Transport in Europe - Update Study for 2008”. Delft, INFRAS e Fraunhofer ISI.
 - van Essen, H.P. et al. (2007). “Methodologies for external cost estimates and internalization scenarios”.
 - van Essen, H.P., Boon, B.H. et al. (2008). “Internalization measures and policy for the external cost of transport”. Delft.
 - Victoria Transport Policy Institute. (2013). “Transportation Cost and Benefit Analysis II – Air Pollution Costs”.
 - WHO. (2006). “Air Quality guidelines – global update 2005”.
 - WHO. (2010). “Health and Environment in Europe: Progress Assessment”.
 - WHO. “Health effects of transport-related air pollution”. Denmark. 92-890-1373-7.
 - Winter, M. (2009). “Essays in Road Pricing - Modeling, Evaluation and Case Studies”. Berlin.
 - ACAP@ (2014) <http://www.acap.pt/pt/home> Associação Automóvel de Portugal (página internet oficial).
 - apambiente@ (2014) <http://www.apambiente.pt/>, Agência Portuguesa do Ambiente (página internet oficial), Portugal.
 - AUTOINFORMA@ (2014). <http://www.autoinforma.pt/estatisticas/estatisticas.html?MIT=36458> AUTO INFORMA (página internet oficial), Lisboa.
 - [cedelft@.http://www.cedelft.eu/publicatie/deliverables_of_impact_\(internalisation_measures_and_policies_for_all_external_cost_of_transport\)/702](http://www.cedelft.eu/publicatie/deliverables_of_impact_(internalisation_measures_and_policies_for_all_external_cost_of_transport)/702) CDelft (página internet oficial).
 - censos.ine@ (2011). http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos_equações Instituto Nacional de Estatística (página internet oficial).
 - ciencia viva@ (2014). <http://www.cienciaviva.pt/divulgacao/eventos/diasemcarros/ozono.asp> Ciência Viva (página internet oficial).
 - dgterritorio@ (2013) http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal_caop/_caop_em_vigor/, Direção Geral do Território (página internet oficial), Lisboa
 - DieselNet@ (2012a). <https://www.dieselnet.com/news/2012/06iarc.php> DieselNet (página internet oficial).
 - DieselNet@ (2012b). <http://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php> DieselNet (página internet oficial).
 - econlib@ (2008). <http://www.econlib.org/library/Enc/Externalities.html> Library of Economics and Liberty (página internet oficial).
 - eea@ (2013a). <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/exceedance-of-air-quality-limit-1/exceedance-of-air-quality-limit-5> Environmental European Agency. (página internet oficial). Copenhagen, Denmark
-

-
- eea@ (2013b) <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eu-dem#tab-european-data>, Environmental European Agency. (página internet oficial). Copenhagen, Denmark.
 - eea@ <http://www.eea.europa.eu/media/newsreleases/reducing-the-20ac-45-billion>. Environmental European Agency. (página internet oficial). Copenhagen, Denmark
 - esri@ (2012) <http://blogs.esri.com/esri/supportcenter/2012/03/09/calculating-the-slope-of-a-hiking-trail/#sthash.tKYBeaKq.dpuf> Support Service Blog esri (página internet oficial).
 - estradasdeportugal@.(2012). <http://www.estradasdeportugal.pt/> , Estradas de Portugal (página internet oficial), Portugal.
 - europarl@Thomas,M.(2014).http://www.europarl.europa.eu/aboutparliament/pt/displayFtu.html?ftuId=FTU_5.6.1.html European Parliament (página internet oficial)
 - eurostat@ <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do?dvsc=0> Eurostat (página internet oficial).
 - eurovignettes@. <https://www.eurovignettes.eu/portal/en/welcome?reset=true>
 - greencarcongress@ (2013). <http://www.greencarcongress.com/2013/03/eea-20130304.html> Green Car Congress (página internet oficial)
 - IMTT@ (2014a). <http://www.imtt.pt/sites/IMTT/Portugues/EnsinoConducao/ManuaisEnsinoConducao/Paginas/FichasdoManualdoEnsinodaConducao.aspx> Instituto da Mobilidade e dos Transportes, I. P. (página internet oficial).
 - IMTT@(2014b)<http://www.imtt.pt/sites/IMTT/Portugues/Observatorio/Estatisticas/Mercadorias/Paginas/Mercadorias.aspx> Instituto da Mobilidade e dos Transportes, I. P. (página internet oficial)
 - INE@ http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_main Instituto Nacional de Estatística (página internet oficial).
 - INRETS@ (2010) <http://www.inrets.fr/ur/lte/publi-autresactions/fichesresultats/ficheartemis/artemis.html> Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (página internet oficial)
 - PORDATA@ (2011) <http://www.pordata.pt/Municipios/Densidade+populacional+segundo+os+Censos-591> PORDATA - Base de Dados de Portugal Contemporâneo (página internet oficial)
 - qualar.apambiente@. <http://qualar.apambiente.pt/INDEX.PHP?page=5&subpage=3> Agência Portuguesa do Ambiente – QualAr (página internet oficial).
 - quercus@ (2013). <http://www.quercus.pt/comunicados/2013/abril/2494-comissao-europeia-apresentou-ontem-proposta-legislativa-para-camioes-menos-poluentes-e-mais-seguros-nas-estradas-europeias> Quercus (página internet oficial).
-

ANEXO A

Quadro A.1 – Codificação das estradas, segmentos e subsegmentos em estudo

Estrada (r)	código	Segmento (s)	Código	Código Subsegmento ss
A1	1	Pombal – Condeixa	a	1 a 148
		Condeixa – Coimbra Sul	b	1 a 80
		Coimbra Sul – Coimbra Norte (A1/A14)	c	1 a 82
		Coimbra Norte (A1/A14) – Mealhada	d	1 a 107
A13	2	Avelar Norte / Penela - A13/EN342	a	1 a 161
		A13/EN342 - Condeixa (A13/A13-1)	b	1 a 38
		Condeixa (A13/A13-1) - Almalaguês	c	1 a 18
		Almalaguês - Condeixa (A13-1/IC2)	d	1 a 86
A14	3	Figueira da Foz – Zona Portuária	a	1 a 5
		Zona Portuária – Vila Verde	b	1 a 32
		Vila Verde – A14/A17	c	1 a 11
		A14/A17 – Santa Eulália	d	1 a 78
		Santa Eulália – Montemor-o-Velho	e	1 a 47
		Montemor-o-Velho – EN 335	f	1 a 80
		EN 335 – Ançã	g	1 a 95
		Ançã – Coimbra Norte	h	1 a 47
A17	4	Marinha das Ondas – A14/A17	a	1 a 171
		A14/A17 – Quiaios	b	1 a 111
		Quiaios – Tocha	c	1 a 145
		Tocha – Mira	d	1 a 104
		Mira – Mira Ponte Vagos	e	1 a 48
IC2	5	<i>Toda a estrada</i>	a	1 a 395
IC3	6	<i>Toda a estrada</i>	a	1 a 138
IC7	7	<i>Toda a estrada</i>	a	1 a 106
IC6	8	<i>Toda a estrada</i>	a	1 a 478
IP3	9	<i>Toda a estrada</i>	a	1 a 300
IC3	10	<i>Toda a estrada</i>	a	1 a 148

Quadro A.2 – Comprimento de cada segmento s

Código	l_s (km)
1a	14.833
1b	8.004
1c	8.165
1d	10.754
2a	16.191
2b	3.844
2c	1.759
2d	8.602
3a	0.495
3b	3.18
3c	1.115
3d	7.85
3e	4.708
3f	7.998
3g	9.515
3h	4.719
4a	17.055
4b	11.137
4c	14.476
4d	10.366
4e	4.805
IC2	39.407
IC3	13.802
IC7	10.578
IC6	53.796
IP3	30.154

Quadro A.3 – TMDA em segmentos s de estrada r do tipo $q=AE$, no ano de 2012 [Fonte:IMT e INE]

sr	$TMDA_{s,r,q}$	$\%PM_{s,r,q}$	$V_{s,r,q}$
a1	20 703	7.73	1601
b1	21 866	12.65	2765
c1	20 927	13.04	2728
d1	21 426	11.74	2516
a2	21 426	11.74	2516
b2	1 435	9.95	143
c2	1 687	9.95	168
d2	1 680	9.95	167
a3	1 768	9.95	176
b3	11 702	5.43	635
c3	11 702	5.43	635
d3	12 141	5.21	633
e3	11 380	5.23	595
f3	2 902	9.37	272
g3	3 033	9.54	289
h3	3 182	8.94	285
a4	12 787	9.17	1173
b4	4 667	9.59	447
c4	4 132	10.63	439
d4	4 768	13.18	628
e4	4 906	13.15	645

Quadro A.4 – TMDA em segmentos s de estrada r do tipo $q=IC/IP$ para o ano 2012
 [Fonte:Estradas de Portugal]

Estrada (r)	Troço de estrada	TMDA	Mediana = $V_{s,r,q}$
IC2	Circular Externa - Arco Pintado	4319	2097
	Fórum Coimbra- Circular Externa	4961	
	Coimbra - Fórum Coimbra	1806	
	Arco Pintado - Trouxemil Nascente	4546	
	Trouxemil Nascente - Mealhada (EN234)	1535	
	Barreira – Nó A1	2629	
	IC2 x IC8 – Venda Nova (IC2)	1411	
	Condeixa-a-Nova– Barreira	3232	
	Venda Nova– Condeixa-a-Nova	1308	
	Nó A1 – Coimbra	2097	
Venda Nova (IC2) – Venda Nova	1549		
IC3	Coimbra – IC2 x EN17	1183	821
	Vila Seca Nascente - Coimbra Sul	109	
	Antanhol (IC2/IC3) – Coimbra Sul	96	
	IC2 x EN17 – Boavista	821	
	Boavista – Ponte da Portela	892	
IC6	Carapinha – Sinda	157	157
	Porto da Raiva – Catraia dos Poços	269	
	Catraia dos Poços – Carapinha	367	
	Sinda – Sargudo	141	
	Sargudo – IC6 x EN337	103	
	EN17 x EN337 - Lourosa	238	
	Ponte das 3 Entradas – Vide (IC6/ER338)	117	
	Lourosa – Venda das Galizes	333	
	Venda das Galizes – Ponte das 3 Entradas	99	

Quadro A.5

Tipo de veículo e escalões de peso bruto	Número de veículos
TOTAL	45963
Camião	25333
3 501 – 10 000 Kg	9 408
10 001 – 16 000 Kg	4 366
16 001 – 19 000 Kg	4 715
19 001 – 26 000 Kg	4 634
Mais de 26 000 Kg	2 210
Comboio rodoviário	778
3 501 – 26 000 Kg	57
26 001 – 37 000 Kg	219
37 001 – 40 000 Kg	122
Mais de 40 000 Kg	379
Veículo articulado	19 853
3 501 – 26 000 Kg	19
26 001 – 29 000 Kg	54
29 001 – 38 000 Kg	1 665
38 001 – 40 000 Kg	12 166
Mais de 40 000 Kg	5 948

Quadro A.6 – Distribuição de veículos pesados de mercadorias em circulação em Portugal por idades no ano 2010 Fonte: (ACAP – Associação Automóvel de Portugal, 2010)

	Número Veículos	% veículos
Até 1 ano	6 126	4.6
De 1 a 2 anos	5 726	4.3
De 2 a 3 anos	7 866	6.0
De 3 a 4 anos	7 751	5.9
De 4 a 5 anos	7 068	5.4
De 5 a 10 anos	27 016	20.5
De 10 a 15 anos	25 309	19.2
De 15 a 20 anos	15 976	12.1
Mais de 20 anos	29 162	22.1
Total	132 000	100.0

Quadro A.7 - Distribuição percentual usada para distribuir os dados estatísticos de TMDA para veículos pelas categorias de peso n e pelas classes de emissão i . Veículos do tipo $t=RT$

	$\leq 7.5t$	$>7,5-12t$	$>12-14t$	$>14-20t$	$>20-26t$	$>26-28t$	$>28-32t$	$>32t$
Euro0	0.278	0.244	0.070	0.328	0.191	0.042	0.042	0.021
EuroI	3.724	3.264	0.936	4.395	2.555	0.569	0.569	0.284
EuroII	1.271	1.114	0.319	1.500	0.872	0.194	0.194	0.097
EuroIII	2.996	2.625	0.753	3.535	2.055	0.457	0.457	0.229
EuroIV	1.706	1.495	0.429	2.013	1.170	0.260	0.260	0.130
EuroV	2.621	2.297	0.659	3.093	1.798	0.400	0.400	0.200

Quadro A.8 - Distribuição percentual usada para distribuir os dados estatísticos de TMDA para veículos pelas categorias de peso n e pelas classes de emissão i . Veículos do tipo $t=AT$

	$>14-20t$	$>20-28t$	$>28-34t$	$>34-40t$	$>40-50t$	$>50-60t$
Euro0	0.003	0.016	0.046	0.623	0.152	0.152
EuroI	0.036	0.218	0.615	8.331	2.035	2.035
EuroII	0.012	0.074	0.210	2.843	0.695	0.695
EuroIII	0.029	0.175	0.495	6.702	1.637	1.637
EuroIV	0.016	0.100	0.282	3.816	0.932	0.932
EuroV	0.025	0.153	0.433	5.864	1.432	1.432

Nota: A distribuição apresentada nas tabelas A.7 e A.8 considera que a soma das percentagens dos veículos do tipo RT e AT perfaz 100%. A contribuição de cada um destes tipos de veículos foi considerada de $M_{t=RT}=55.1\%$ e $M_{t=AT}=44.9\%$.

Quadro A.9 - Frequência relativa com que cada categoria de inclinação f existe num segmento s de uma estrada r

		Frequência relativa			
		6	4	2	0
s,r	f				
a1		0.40	0.30	0.28	0.02
b1		0.44	0.35	0.22	0.00
c1		0.39	0.11	0.45	0.05
d1		0.33	0.39	0.24	0.03
a2		0.60	0.25	0.14	0.01
b2		0.71	0.21	0.08	0.00
c2		0.56	0.33	0.11	0.00
d2		0.51	0.29	0.20	0.00
a3		0.40	0.60	0.00	0.00
b3		0.44	0.44	0.13	0.00
c3		0.73	0.09	0.18	0.00
d3		0.09	0.31	0.53	0.08
e3		0.45	0.34	0.21	0.00
f3		0.48	0.26	0.26	0.00
g3		0.55	0.38	0.07	0.00
h3		0.49	0.36	0.15	0.00
a4		0.56	0.26	0.16	0.01
b4		0.40	0.44	0.15	0.01
c4		0.21	0.41	0.35	0.03
d4		0.23	0.36	0.39	0.02
e4		0.27	0.38	0.33	0.02
IC2		0.48	0.31	0.20	0.01
IC3		0.46	0.34	0.20	0.00
IC7		0.43	0.42	0.13	0.02
IC6		0.66	0.23	0.11	0.00
IP3		0.45	0.45	0.09	0.02

ANEXO B

Quadro B.1 - Modelos de regressão utilizados

Modelo	Forma da função
1	$y = a.x^3 + b.x^2 + c.x + d$
2	$y = a.x^2 + b.x + c$
3	$y = a.b^x . x^c$
4	$y = a.x^b + c.x^d$
5	$y = (a + b.x)^{-c}$
6	$y = a + b.x + \{[c-b][1-\exp(-d.x)]/d\}$
7	$y = e + a.\exp(-b.x) + c.\exp(-d.x)$
8	$y = 1/(c.x^2 + b.x + a)$
9	$y = 1/(a + b.x^c)$
10	$y = 1/(a + b.x)$
11	$y = a - b.\exp(-c.x^d)$
12	$y = a/[1 + b.\exp(-c.x)]$
13	$y = a + \{b/[1 + \exp(-c + d.\ln(x) + e.x)]\}$
14	$y = c + a.\exp(-b.x)$
15	$y = c + a.\exp(b.x)$
16	$y = \exp[(a + b/x) + c.\ln(x)]$

Nota: y = emissões (g.km^{-1}); x = velocidade (km.h^{-1}); a, b, c, d, e = coeficientes

Os coeficientes a, b, c, d, e diferem para combinação de sub-grupo (veículo), inclinação e carga transportada, uma vez que são estas as condições que influenciam as emissões de cada poluente.

ANEXO C

Quadro C.1 – Custo da poluição atmosférica, por NO_x e PM, $PCV_{t,n,i}$, em cent.km⁻¹.veíc⁻¹, para $t=RT$ (preço atualizado ao valor de 2014)

$i \backslash n$	$\leq 7.5t$	$>7,5-12t$	$>12-14t$	$>14-20t$	$>20-26t$	$>26-28t$	$>28-32t$	$>32t$
Convencional	3.64	6.38	7.07	8.80	10.38	10.96	12.46	12.78
Euro I	2.34	3.79	4.28	5.33	7.09	7.48	8.51	8.67
Euro II	1.99	2.99	3.60	4.50	6.03	6.09	7.21	7.42
Euro III	1.55	2.48	2.83	3.53	4.73	5.00	5.64	5.91
Euro IV	0.88	1.42	1.62	2.03	2.70	2.72	3.15	3.23
Euro V	0.50	0.79	0.89	1.15	1.50	1.50	1.75	1.83

Quadro C.2 – Custo da poluição atmosférica, por NO_x e PM, $PCV_{t,n,i}$, em cent.km⁻¹.veíc⁻¹, para $t=AT$ (preço atualizado ao valor de 2014)

$i \backslash n$	$>14-20t$	$>20-28t$	$>28-34t$	$>34-40t$	$>40-50t$	$>50-60t$
Convencional	8.86	10.87	11.84	13.16	14.00	14.00
Euro I	5.31	7.46	8.17	8.99	9.50	9.50
Euro II	4.50	6.23	6.77	7.61	8.00	8.00
Euro III	3.51	4.90	5.34	6.24	6.50	6.50
Euro IV	1.99	2.81	3.04	3.37	3.50	3.50
Euro V	1.11	1.56	1.66	1.96	2.14	2.41

Quadro C.3 –Custo externo total da poluição, $I_{(s,r,q)}$, em €.UnidadeTempo⁻¹

	€.dia ⁻¹	€.mês ⁻¹	€.ano ⁻¹
a1	956.7	29656.9	355883.3
b1	875.1	27127.5	325530.5
c1	897.5	27823.4	333880.9
d1	1090.0	33791.0	405492.0
a2	93.1	2886.7	34640.9
b2	26.0	805.7	9668.5
c2	11.8	367.2	4405.9
d2	61.0	1889.6	22674.7
a3	12.7	392.7	4712.9
b3	81.4	2523.1	30276.6
c3	28.4	881.5	10577.9
d3	188.3	5836.5	70038.4
e3	51.6	1598.2	19178.5
f3	93.2	2890.4	34684.9
g3	109.1	3381.6	40578.8
h3	101.1	3132.7	37592.9
a4	307.5	9531.8	114382.2
b4	197.0	6107.5	73290.1
c4	366.4	11358.6	136303.7
d4	269.5	8355.9	100270.8
e4	131.6	4079.6	48955.6
IC2	3698.2	114645.7	1375747.8
IC3	507.5	15731.8	188781.4
IC7	74.2	2300.1	27601.1
IC6	377.3	11697.5	140369.6
IP3	211.5	6556.6	78679.7
Total q=AE	5949.0	184418.3	2213020.0
Total q=IC/IP	4868.8	150931.6	1811179.7
Total	10817.7	335350.0	4024199.6