

Mapeamento de vulnerabilidades decorrentes dos impactes dos sistemas de transportes rodoviários

Carlos SAMPAIO¹, Jorge Bandeira¹, Margarida C. Coelho¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia Mecânica e Automação, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

c.sampaio@ua.pt, jorgebandeira@ua.pt; margarida.coelho@ua.pt

Resumo

O transporte rodoviário individual tem cada vez mais relevância, principalmente em cidades de média dimensão como Aveiro. Tal relevância deve-se parcialmente, à complexidade em implementar um sistema de transportes públicos altamente eficiente e atrativo devido à dispersão populacional dos subúrbios limítrofes ao núcleo urbano. Com o mapeamento foi possível efetuar um inventário organizado espacialmente dos vários impactes considerados, tendo sido encontrados alguns hotspots como a Av. 5 de Outubro, com emissões de CO₂ e NO_x 90% e 114% superiores, respetivamente, ao valor médio verificado. Através do mapeamento dos acidentes entre veículos e utentes vulneráveis foram encontrados alguns pontos negros. Conclui-se que um inventário de impactes pode ser uma ferramenta útil na identificação de hotspots.

Introdução

A mobilidade recorrendo ao transporte rodoviário está intrinsecamente ligada ao dia-a-dia do Homem moderno, havendo como consequência o aparecimento de impactes recorrentes das várias vulnerabilidades associadas ao sistema de transportes rodoviários. Estes impactes sentem-se na forma de impactes ambientais como emissões de poluentes e exposição das populações a níveis elevados de ruído, assim como impactes sociais na forma de acidentes rodoviários e focos de congestionamento.

O setor dos transportes é o maior consumidor de energia final em Portugal, cerca de 36,5% em 2015¹ sendo que em cerca de 89% dos quilómetros percorridos associados ao transporte rodoviário é utilizado o veículo particular.²

Em cidades de média dimensão, como é o caso da cidade de Aveiro, que conta com uma densidade populacional de 389 hab/km² existem vários desafios à mobilidade devido à menor eficiência dos transportes públicos e à maior utilização do transporte individual³, sendo, portanto, necessário, não só melhorar o transporte público, mas também fomentar uma utilização sustentável do ponto de vista energético e ambiental do transporte individual.

Por sua vez, os sistemas de Informação Geográfica (SIG) podem ser utilizados como uma ferramenta de apoio na análise de um sistema de transportes⁴, permitindo uma

melhor organização e disponibilidade dos dados através do estudo da distribuição em termos espaço-temporais de vários fatores impactantes numa rede rodoviária.⁵ O objetivo principal deste trabalho é alocar aos vários segmentos da rede em estudo vários impactos do tráfego rodoviário, como emissões e ruído, assim como georreferenciar os acidentes entre veículos e utentes vulneráveis, de forma a identificar *hotspots*.

Revisão de literatura

Os SIG têm tido uma crescente popularidade na análise de emissões provenientes do tráfego rodoviário. Plataformas de SIG foram desenvolvidas e consistem em inventariar as emissões relacionadas com o tráfego rodoviário, nomeadamente o CO₂, HC e CO; esta informação é então organizada espacialmente podendo ser utilizada como uma ferramenta de planeamento. Através deste tipo de plataforma, foi possível verificar por exemplo, que no estado de Goa (Índia), o setor dos transportes é responsável por cerca de 25% das emissões totais de PM₁₀ e responsável por 2,6% das mortes prematuras em Goa.^{6,7,8} Na Grécia alguns trabalhos também têm sido realizados na aplicação de SIG de forma a organizar espacialmente as emissões provenientes do tráfego automóvel. Utilizando uma plataforma SIG, foi possível verificar que a região de Attica é responsável por cerca de 40% das emissões nacionais de CO₂, CO e NMVOC e 30% das emissões nacionais de NO_x.⁹

A quantificação espaço-temporal do ruído em forma de mapas de ruído é também uma prática comum para avaliar *hotspots* de exposição a níveis elevados de ruído. Dados recolhidos por GPS e exportados para uma plataforma SIG, podem ser utilizados na elaboração de mapas de ruído. Relacionando a informação recolhida através do sistema GPS e a densidade de tráfego é possível utilizar o ruído proveniente por apenas um veículo, combinando o mesmo com um modelo de propagação do ruído obtendo-se assim os valores globais de ruído emitidos pelo tráfego rodoviário em análise¹⁰. Sensores de baixo custo são utilizados para apresentar em tempo real, numa plataforma SIG o impacto acústico da infraestrutura rodoviária.^{11,12}

Os SIG constituem igualmente uma ferramenta fulcral na identificação de *hotspots* de acidentes rodoviários, os mesmos têm um papel importante na prevenção de acidentes. Através de uma análise cuidada e precisa de uma base de dados espacialmente organizada de acidentes rodoviários é possível identificar as zonas onde se verifica maior incidência de sinistros, envolvendo peões, ciclistas e veículos.^{13,14,15} Usando SIG como ferramenta, um estudo do ponto de vista espacial e temporal identifica vários padrões existentes entre variáveis relacionadas com segurança rodoviária.¹⁶

Por outro lado, o congestionamento tem o efeito de deteriorar a qualidade do ar e fazer aumentar as emissões de CO₂. Dados de navegação que se encontram disponíveis em várias plataformas como o Google Maps, TomTom, Bing Maps, entre outros podem ser uma ferramenta útil para quantificar as emissões de CO₂. Um

exemplo da aplicação deste tipo de metodologias foi realizado por Kellner (2016)¹⁸, em que se constatou que o congestionamento aumenta as emissões de CO₂ numa gama entre os 2,5% e 50%.^{17,18}

Análise espacial e georreferenciação de fatores impactantes do tráfego rodoviário têm sido realizados em várias cidades de forma a inventariar impactes e identificar *hotspots*.

Metodologia

Como alvo de estudo foi considerada uma secção da rede urbana de Aveiro (ver Figura 1), em Portugal, tendo as estimativas sido realizadas para um veículo típico a *diesel* e a gasolina em Portugal.

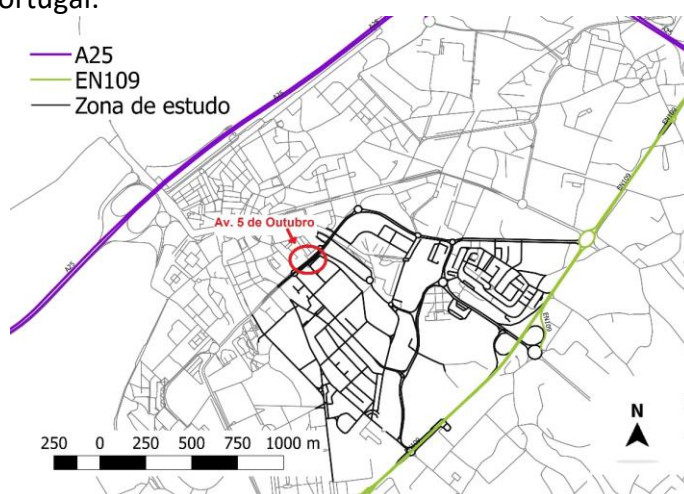


Figura 1 - Zona alvo de estudo.

Na zona de estudo considerada encontram-se vias de diferentes características, vias com maior velocidade de circulação (como a EN109 – limite de velocidade de 90 km/h) e vias com limite de velocidade inferior (como as várias ruas residenciais – limite de velocidade de 50 km/h).

A metodologia para cálculo de emissões variará consoante o método de recolha de dados: modelação microscópica no caso da utilização de dados instantâneos e modelação macroscópica nas vias onde não foi possível obter dados instantâneos.

Modelação microscópica de emissões de poluentes e de níveis de ruído

A modelação microscópica assenta na utilização de dados instantâneos obtidos através de dinâmica de veículos (ver figura 2 e figura 3). Consiste em obter dados GNSS (como velocidade, posição, tempo) realizando, numa rota pré-definida várias passagens em ambos os sentidos, com a recolha de dados a ser concretizada com recurso a um sistema GPS.

Com os dados de velocidade instantânea obtém-se as emissões de CO₂, NO_x e HC através de um modelo de emissões VSP¹⁹ e o nível de propagação sonora através da metodologia adaptada de Lelong:²⁰



Figura 2 - Diagrama para obtenção das emissões seguindo modelação microscópica.

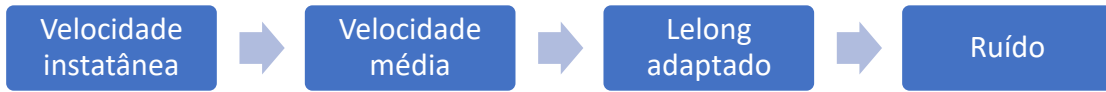


Figura 3 - Diagrama para obtenção dos níveis de propagação sonora seguindo modelação microscópica.

A expressão do VSP (Potência Específica do Veículo) é a seguinte:

$$VSP = v \cdot [1,1 \cdot \alpha + 9,81 \cdot \sin(\arctan(i)) + 0,132] + 0,000302 \cdot v^3 \quad (1)$$

Onde, VSP é a potência específica do veículo (kW/ton), v a velocidade do veículo (m/s), α é a aceleração/desaceleração do veículo (m/s²) e i a inclinação da via (%).

Lelong adaptado consiste numa adaptação do método de Lelong²⁰ onde em vez de ser utilizada a velocidade instantânea é utilizada a velocidade média. É também desprezado o fenómeno de aceleração até aos 25 km/h, de forma a tornar o cálculo do ruído mais prático numa rede rodoviária alargada:

$$\text{estado aceleração/desaceleração} = \begin{cases} \alpha + \beta \times \log(\bar{v}), & \bar{v} > 11,5 \text{ km/h} \\ 82, & \bar{v} < 11,5 \text{ km/h} \end{cases}$$

(2)

com $\alpha = 53,6 \pm 0,3$ dB(A) e $\beta = 26,8 \pm 0,2$ dB(A); \bar{v} a velocidade média. Segue-se o cálculo da potência sonora produzida pelo motor do veículo (L_w):

$$L_w = 10 \cdot \log\left(10^{\frac{\text{Estado aceleração/desaceleração}}{10}}\right) \quad (3)$$

Finalmente, a estimativa do nível de propagação sonora (L_p) a uma distância fixa do veículo é dada por:

$$L_p = L_w - 20 \cdot \log\left(\frac{r}{r_0}\right) - 11 \quad (4)$$

Onde r representa o raio a partir da fonte até onde se considera uma efetiva propagação sonora. O valor de r_0 representa a refletividade do pavimento, considera-se que o mesmo é completamente refletivo ($r_0 = 1$), pois ao longo de toda a rede em estudo, o tipo de pavimento é idêntico (alcatrão).

Modelação macroscópica de emissões de poluentes

A modelação macroscópica (ver figura 4) é utilizada para os segmentos da rede em estudo onde não foi possível obter dados GNSS. Consiste em utilizar velocidades

médias conforme o tipo de via, seguindo recomendações de OSM (2017).²¹ Estes dados podem ser ainda utilizados quando existem sistemas convencionais de monitorização de tráfego estimando a velocidade média de um determinado segmento em tempo real.



Figura 4 - Estimativa das emissões através de modelação macroscópica.

Com a utilização de dados do parque automóvel em Portugal é possível modelar para várias velocidades no COPERT4 as emissões de CO₂, NO_x e NMVOC para um veículo gasolina e *diesel* em Portugal, de forma a obter equações de regressão polinomial (equações obtidas expostas na tabela 1) onde a velocidade é a variável independente.

Tabela 1 - Equações e coeficiente de regressão para os poluentes considerados e respetiva tecnologia onde *v* representa a velocidade (em km/h).

Poluente	Tecnologia	Equação	R ²	<i>p-value</i>
g CO ₂ /km	<i>Diesel</i>	$0,0456v^2-5,712v+332,44$	0,9856	0,000030
	Gasolina	$0,0465v^2-5,9451v+340,29$	0,9902	0,000060
g NO _x /km	<i>Diesel</i>	$0,0002v^2-0,0229v+1,2698$	0,9919	0,000018
	Gasolina	$2 \cdot 10^{-6}v^3+0,0003v^2+0,0104v+0,149$	0,7056	0,008646
g NMVOC/km	<i>Diesel</i>	$2 \cdot 10^{-5}v^2-0,0021v+0,0899$	0,9910	0,000001
	Gasolina	$0,0002v^2-0,0199v+0,8539$	0,9955	0,002254

Em todas as funções, os parâmetros de regressão são estatisticamente significativos. No caso do nível de propagação sonora, o procedimento é idêntico ao apresentado na figura 3, mas utiliza-se diretamente uma estimativa da velocidade média.

Acidentes rodoviários

Alguns sinistros não tinham as coordenadas GPS associadas, tendo sido necessário realizar a georreferenciação dos mesmos, pois só com esta informação é possível importar para a plataforma SIG. O processo é o seguinte:

- Recolha e tratamento dos dados (georreferenciação de sinistros sem coordenadas definidas);
- Importação dos dados para a plataforma SIG;
- Catalogação da informação por anos, gravidade do sinistro e número de feridos.

Resultados e discussão

Mapeamento de impactes ambientais

Na figura 5 encontra-se o mapa de ruído obtido.

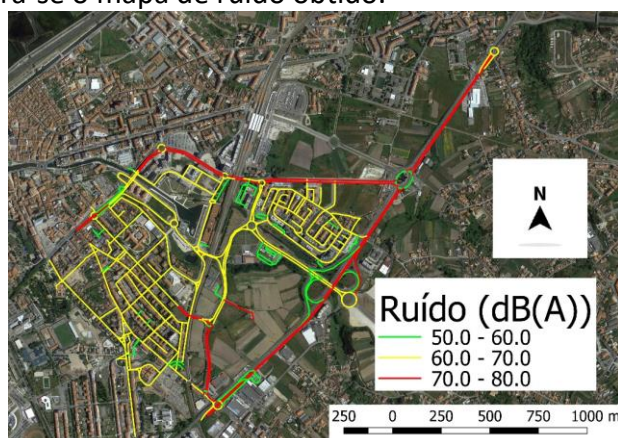


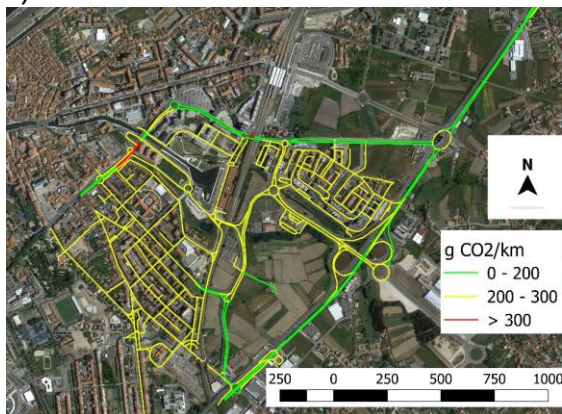
Figura 5 - Mapa de ruído.

As vias onde as velocidades praticadas tendem a ser superiores são aquelas onde se assinalam maiores níveis de propagação sonora. Salienta-se a EN 109 e a Alameda Silva Rocha com níveis de ruído superiores a 70 dB(A). As zonas residenciais caracterizam-se por níveis de ruído entre os 60 e os 70 dB(A).

A figura 6 descreve os fatores de emissão obtidos para o CO₂, NO_x e NMVOC. Grande parte da rede em estudo caracteriza-se por ter um fator de emissão entre os 200 e os 300 g CO₂/km, com as vias propícias a velocidades mais elevadas a obterem um fator de emissão inferior a 200 g CO₂/km. Salienta-se a Av. 5 de Outubro como o segmento de rede a obter piores resultados com um fator de emissão superior a 300 g CO₂/km. Os valores não variam muito entre veículos a *diesel* (média de 220 g CO₂/km) e gasolina (média de 230 g CO₂/km). A emissão de NO_x nos veículos a gasolina é pouco significativa, situando-se o fator de emissão em valores inferiores a 0,50 g NO_x/km, com um valor médio de 0,23 g NO_x/km. No entanto no caso de veículos a *diesel*, este poluente tem bastante importância. Grande parte da rede em estudo tem um fator de emissão associado entre os 0,50 e 1,00 g NO_x/km, tendo as vias onde a velocidade de circulação é mais baixa a obterem um fator de emissão superior a 1,00 g NO_x/km. O valor médio é de 0,84 g NO_x/km. A emissão de NMVOC é pouco significativa nos veículos a *diesel*, tendo um fator de emissão menor que 0,25 g NMVOC/km em toda a rede em estudo, sendo o valor médio de 0,05 g NMVOC/km. No caso dos veículos a gasolina, maior parte da rede em estudo tem um fator de emissão associado entre os 0,25 e os 0,50 g NMVOC/km. As vias onde a velocidade de circulação é mais baixa têm tendência a registar um fator de emissão superior a 0,50 g NMVOC/km. O valor médio obtido para veículos a gasolina é de 0,44 g NMVOC/km.

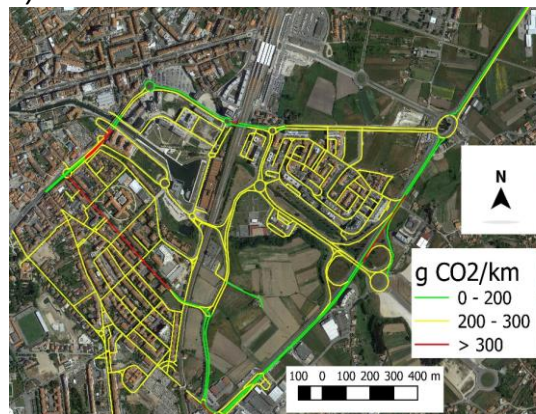
Diesel

a)

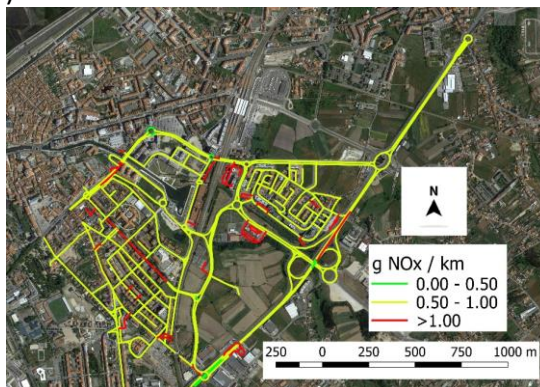


Gasolina

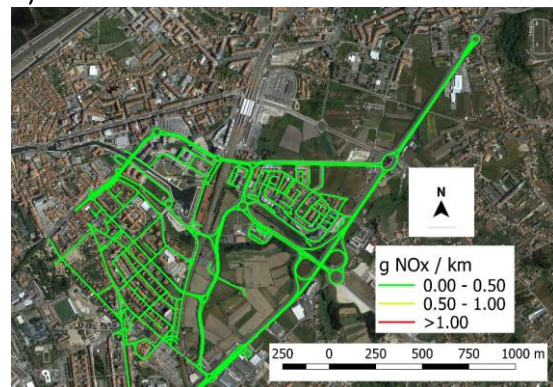
b)



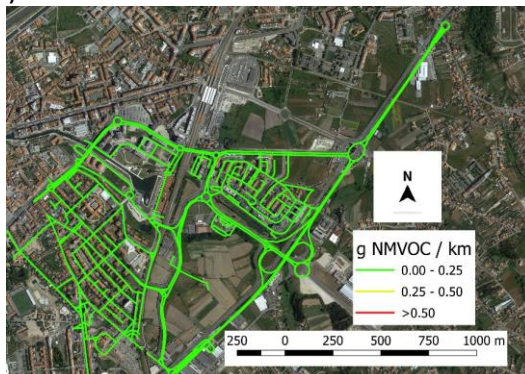
c)



d)



e)



f)

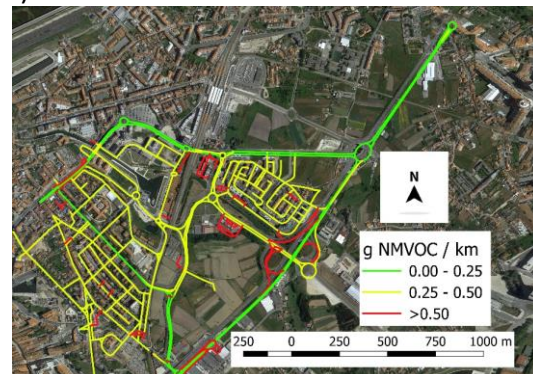


Figura 6 - Fatores de emissão para a rede em estudo: a) e b) g CO₂/km; c) e d) g NO_x/km; e) e f) g NMVOC/km.

Mapeamento de acidentes rodoviários

Nesta secção apresenta-se o mapeamento de acidentes rodoviários entre veículos e utentes vulneráveis. A figura 7 representa a incidência de acidentes entre veículos e utentes vulneráveis enquanto que na figura 8 é realizado um mapa de calor de forma a verificar as zonas onde existiram mais ocorrências.

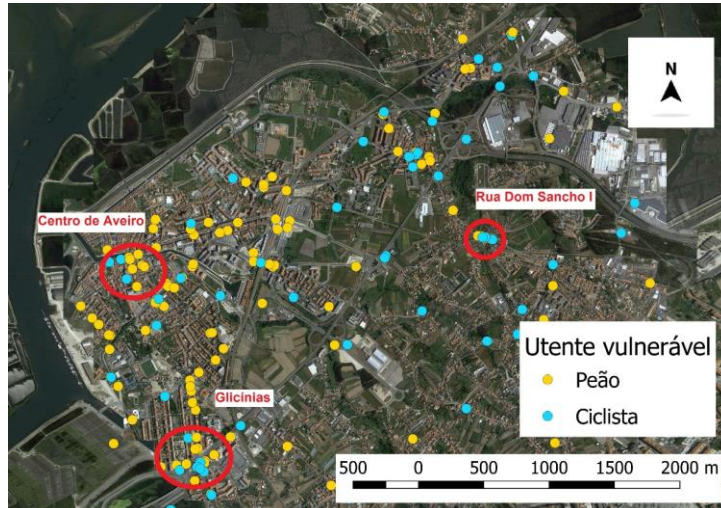


Figura 7 - Acidentes entre veículos e utentes vulneráveis entre 2012 e 2015.

Como esperado, existe uma maior incidência de acidentes entre peões e veículos, pois a sua frequência também é bastante superior.

Com base na análise espacial realizada por Vilaça et al. (2017)¹⁷, procedeu-se a uma análise espacial com base no nível de *kernel*, onde cada pixel do mapa em estudo é influenciado pelos dados que estamos a fornecer à função *kernel*. Quanto mais baixo for o nível de *kernel* (neste caso, nível 1 existem muitos acidentes próximos, nível 5 poucos) mais influência o pixel recebe.

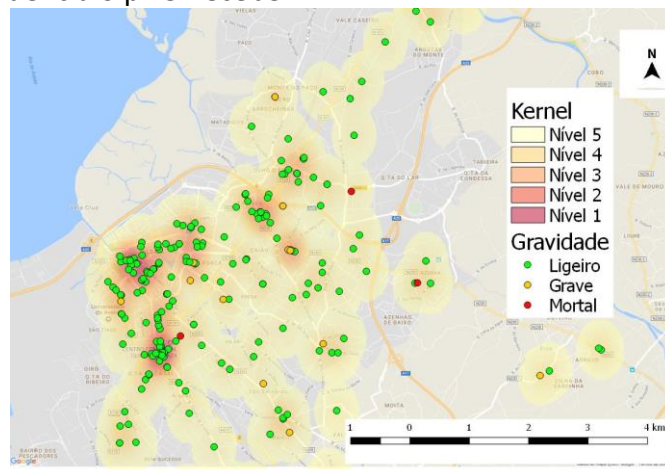


Figura 8 - Mapa de calor obtido por tipo de gravidade do acidente.

A zona do centro de Aveiro e a zona perto das Glicínias (ver figura 7) são aquelas onde existiu maior ocorrência de acidentes entre veículos e utentes vulneráveis.

Conclusão

O objetivo principal deste trabalho consistiu em alocar vários indicadores de desempenho ambiental (como emissões de CO₂, NO_x e NMVOC e os níveis de

propagação sonora) aos vários segmentos da rede rodoviária em estudo, bem como realizar uma análise espacial dos acidentes entre veículos e utentes vulneráveis.

Através de análise espacial dos impactes conclui-se que existem algumas vias da rede em estudo com um fator de emissão mais preocupante, como a Av. 5 de Outubro (ver na figura 1 a sua localização) que obteve um fator de emissão de CO₂ cerca de 90% superiores ao valor médio verificado e um fator de emissão de NO_x cerca de 114% superior ao valor médio.

No caso dos acidentes entre veículos e utentes vulneráveis, verificou-se que existe um segmento de rede particularmente vulnerável, a Rua Dom Sancho I (ver figura 7), com uma via de apenas 200 metros onde ocorreram cerca de 6 acidentes entre 2012 e 2015. Esta via caracteriza-se por ter 4 intersecções e ter um elevado tráfego rodoviário, visto pertencer à EN 230.

Como conclusões, salienta-se:

- A eficácia de uma base de dados de impactes para identificação de *hotspots* e inventário de emissões;
- A necessidade de ter em conta as condições de tráfego numa futura otimização da plataforma SIG, sendo essencial a obtenção de dados de volume de tráfego e velocidade;
- Dado o comportamento não linear em função da velocidade dos diversos parâmetros analisados, é necessário ter em conta qual(ais) o(s) poluente(s) mais críticos em tempo real e num determinado local para maximizar o benefício ambiental decorrente do uso da plataforma desenvolvida.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos projetos @CRUISE (PTDC/EMS-TRA/0383/2014), financiado no âmbito do Projeto 9471 – Reforçar a Investigação, o Desenvolvimento Tecnológico e a Inovação (Projeto 9471 – RIDTI) e participado pelo Fundo Comunitário Europeu FEDER, e no âmbito do Projeto Estratégico UID-EMS-00481-2013; Projeto PGI01611 INTERREG EUROPE CISMOB financiado pelo Programa Europeu Interreg.

Referências

1. Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2016). Relatório do Estado do Ambiente em Portugal 2016. Recuperado de <http://sniamb.apambiente.pt/infos/geoportaldocs/REA/REA2016/REA2016.pdf>
2. European Environment Agency (EEA). (2016). Air quality in Europe — 2016 report — European Environment Agency. Acedido a 6 de Fevereiro de 2017, em <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2016>
3. Direção Geral do Território (DGT). (2016). Habitat III – National Report Portugal. Recuperado de http://habitat3.org/wp-content/uploads/PT_UN-HabitatIII_NationalReport_2016_08_04_EN.pdf
4. Gianpiero, M., Andrea, B., Massimiliano, C., Matteo, S., Mirko, C., Luca, C., & Roberto, K. (2015). GIS-based decision support system for multi criteria analysis of intermodal transport networks.

- Apresentado em 2015 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation/ International Technology Management Conference, ICE/ITMC 2015. <https://doi.org/10.1109/ICE.2015.7438674>
5. Luo, X., Dong, L., Dou, Y., Zhang, N., Ren, J., Li, Y., Yao, S. (2017). Analysis on spatial-temporal features of taxis' emissions from big data informed travel patterns: a case of Shanghai, China. *Journal of Cleaner Production*, 142, 926–935. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.161>
 6. Rao, R. S., Swargam, S., & Rao, G. V. (2017). Mapping Of spatial variations of different vehicular emissions in urban roads - A case study. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(9), 572–579.
 7. Singh, D., Shukla, S. P., Sharma, M., Behera, S. N., Mohan, D., Singh, N. B., & Pandey, G. (2016). GIS-based on-road vehicular emission inventory for Lucknow, India. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 20(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000244](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000244)
 8. Sharma, S., & Patil, K. V. (2016). Emission scenarios and health impacts of air pollutants in Goa. *Aerosol and Air Quality Research*, 16(10), 2474–2487. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.12.0664>
 9. Fameli, K. M., & Assimakopoulos, V. D. (2015). Development of a road transport emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: Effects of important parameters. *Science of The Total Environment*, 505, 770–786. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.015>
 10. Cai, M., Zou, J., Xie, J., & Ma, X. (2015). Road traffic noise mapping in Guangzhou using GIS and GPS. *Applied Acoustics*, 87, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.06.005>
 11. Bellucci, P., Peruzzi, L., & Cruciani, F. R. (2016). Implementing the Dynamap system in the suburban area of Rome (pp. 6396–6407). Apresentado em Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future.
 12. Bellucci, Patrizia, Peruzzi, L., & Zambon, G. (2017). LIFE DYNAMAP project: The case study of Rome. *Applied Acoustics*, 117, Part B, 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.04.022>
 13. Selvasofia, A. S. D., & Arulraj, P. G. (2016). Accident and traffic analysis using GIS. *Biomedical Research (India)*, 2016(Special Issue 2), S103–S106.
 14. Mohaymany, A. S., Shahri, M., & Mirbagheri, B. (2013). GIS-based method for detecting high-crash-risk road segments using network kernel density estimation. *Geo-Spatial Information Science*, 16(2), 113–119. <https://doi.org/10.1080/10095020.2013.766396>
 15. Rankavat, S., & Tiwari, G. (2016). Pedestrians risk perception of traffic crash and built environment features - Delhi, India. *Safety Science*, 87, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.009>
 16. Vilaça, M., Macedo, E., Tafidis, P., & Coelho, M. C. (2017). Occurrence and severity of crashes involving vulnerable road users – An integrated spatial and temporal analysis. Atas do 97th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 7-11, 2018.
 17. Kellner, F. (2016). Exploring the impact of traffic congestion on CO2 emissions in freight distribution networks. *Logistics Research*, 9(1), 21. <https://doi.org/10.1007/s12159-016-0148-5>
 18. Chrupa, L., Magazzeni, D., McCabe, K., McCluskey, T. L., & Vallati, M. (2015). Automated planning for urban traffic control. Presented at the 6th Italian Workshop on Planning and Scheduling, IPS 2015. Recuperado de [https://kclpure.kcl.ac.uk/portal/en/publications/automated-planning-for-urban-traffic-control\(cc05a23c-1545-4ecd-80a6-f82722fc296d\)/export.html](https://kclpure.kcl.ac.uk/portal/en/publications/automated-planning-for-urban-traffic-control(cc05a23c-1545-4ecd-80a6-f82722fc296d)/export.html)
 19. Coelho, M.C., Frey, H.C., Roupail, N.M., Zhai, H., Pelkmans, L., (2009). Assessing methods for comparing emissions from gasoline and diesel light-duty vehicles on microscale measurements. *Transportation Research Part D* 14, 91 - 99.
 20. Bandeira, Jorge M., Guarnaccia, C., Fernandes, P., & Coelho, M. C. (2016). Advanced Impact Integration Platform for Cooperative Road Use. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13177-016-0133-z>
 21. Open Street Maps. (OSM) (2017). Routing. Acedido a 20 de Setembro de 2017 em <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Routing>