

Abordagem integrada de escoamentos rodoviários em cenários de alterações climáticas

Integrated management of road runoff under climate change scenarios

Ana Estela BARBOSA¹ e João Nuno FERNANDES²

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, aestela@lnec.pt

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Brasil, jnfernandes@lnec.pt

RESUMO: A gestão da água em cenários de alterações climáticas é uma oportunidade para rever metodologias, criando soluções inovadoras e promotoras de resiliência e sustentabilidade. A concentração de poluentes em massas de água encontra-se associada à integração de variáveis hidrológicas e das origens e características da poluição pontual e difusa. Através de um exemplo concreto aplicado às estradas - uma fonte de poluição difusa - este trabalho pretende alertar para a necessidade de rever abordagens da gestão de recursos hídricos. Com base na revisão da literatura e na consulta a especialistas, quatro ferramentas para a previsão de poluentes em escoamentos de estradas, estabelecidas nos EUA e na Europa, foram selecionadas e testadas em 22 estradas, de 7 países europeus. Os resultados para as concentrações médias do lugar para os SST, Zn, Cu, Pb e Cd demonstraram que nenhuma das ferramentas foi eficaz na previsão das concentrações destes poluentes, exceto para o país onde a dita ferramenta foi calibrada. Mesmo para casos de estudo em regiões ou países com ferramentas de previsão é recomendável a realização de monitorizações periódicas para validação das concentrações. Este exemplo, a experiência dos autores e a revisão da literatura realçam a necessidade de rever expectativas e abordagens de controlo de fontes de poluição, incluindo também a incerteza gerada pelos cenários de alterações climáticas. Ainda há caminho a percorrer para melhorar a gestão de situações críticas, tanto em termos da disponibilidade de informação adequada à tomada de decisão, como à compreensão por parte dos utilizadores dos pressupostos e incertezas destas projeções. A boa comunicação e dinâmica colaborativa entre investigadores, *stakeholders* e decisores é também fundamental para promover melhorias na gestão de recursos hídricos.

Palavras-Chave: Poluição difusa; escoamentos rodoviários; ferramentas de previsão; gestão da qualidade da água; alterações climáticas

ABSTRACT: *The water management under climate change scenarios is an opportunity to review methodologies in order to create innovative solutions that promote resilience and sustainability. The concentration of pollutants in water bodies is associated with the integration of hydrological variables and the origins and characteristics of point and diffuse pollution. Through a concrete example applied to roads - a source of diffuse pollution - this work aims at alerting to the need of revisit approaches of water resources management. Based on literature review and consultation of experts, four tools from the USA and Europe were selected and tested at 22 road sites, from 7 European countries. The results for the site median concentrations of TSS, Zn, Cu, Pb and Cd showed that none of the tools could predict the road runoff pollutant concentrations, except for the country where it has been calibrated. Even for case studies in regions or countries with prediction tools, periodic monitoring is recommended to validate concentrations. This example, the authors' experience and the literature review highlight the need to review expectations and approaches to control pollution sources, including the uncertainty generated by climate change scenarios. There are still steps ahead to improve water management in the context of climate change, both in terms of the availability of information necessary for decision making and regarding the understanding by users of the assumptions and uncertainties of these projections. The good communication and collaborative dynamics between researchers, stakeholders and decision-makers is also essential to promote the necessary improvements in the management of water resources.*

Keywords: *Diffuse pollution; road runoff; prediction tools; water quality management; climate change*

1. INTRODUÇÃO

Cenários de alterações climáticas (CAC) consistem em aumentos de temperaturas e de eventos extremos de precipitação embora os valores médios anuais possam não ter grandes mudanças. A adaptação a esses cenários envolve a compreensão de fenómenos complexos que têm lugar em distintas escalas temporais e espaciais (Beier *et al.*, 2016). No caso da gestão da água, os impactos das alterações climáticas são intensificados por existirem cumulativamente pressões adicionais tais como a crescente urbanização e uma maior exigência de água para outros usos, como a irrigação, produção de energia elétrica e indústria. Neste contexto, é importante definir estratégias de gestão inovadoras por forma a encontrar soluções sustentáveis, sendo uma oportunidade para resolver questões pendentes e inovar no sentido de um futuro mais resiliente e sustentável. A importância de uma boa comunicação entre investigadores, *stakeholders* e decisores é fundamental. Em diferentes países, estudos multidisciplinares envolvendo ciências sociais, indicam que uma maior flexibilidade e experimentalismo na investigação e na tomada de decisão são cruciais para lidar com as questões das alterações climáticas (Barbosa e Matos, 2017).

Em regiões mediterrânicas como Portugal, a gestão da água e dos ecossistemas aquáticos em CAC requer abordagens atentas. A análise da concentração de poluentes em massas de água encontra-se, quase sempre, associada à integração de variáveis hidrológicas e das origens de poluição pontuais e difusas. Sendo um facto que, em climas mediterrânicos, a variação dos parâmetros hidrológicos é já por si elevada, a consideração de CAC leva ao aumento de cenários possíveis e de incertezas.

Um estudo nacional avaliou os potenciais impactes das escorrências do IP6 na qualidade da água da albufeira de S. Domingos (na zona de Peniche, usada para abastecimento público) tendo-se evidenciado que as descargas não apresentam impactos significativos devido ao efeito de diluição proporcionado pelo volume da albufeira (Vieira *et al.*, 2013). Todavia, foi demonstrado que as estradas podem, de forma subtil, afetar o estado de massas de água confinada. Considera-se que os métodos de gestão e proteção das massas de água superficiais e subterrâneas deverão ser revistos de forma a integrar novos conhecimentos científicos em CAC e proporcionar aos decisores ferramentas objetivas e consistentes.

Esta comunicação aborda especificamente o tema das escorrências rodoviárias através da análise

da aplicação de diferentes modelos a casos de estudo na Europa. Faz-se ainda uma abordagem de utilização de informação disponível online sobre projeções de cenários climáticos. Assim, discute-se a validade e pertinência de utilizar ferramentas para previsão de concentrações de poluentes nas escorrências de estradas, bem como o recurso a informação disponível online sobre projeções climáticas.

2. AS CARACTERÍSTICAS DAS ESCORRÊNCIAS RODOVIÁRIAS

A composição e concentração de poluentes em águas de escorrência de estradas são afetadas por vários fatores, como por exemplo o regime de precipitação, o tipo de tráfego ou o material do pavimento (e.g. Huber *et al.* 2016, Bakr, 2020). Procurar estabelecer relações de causa e efeito no que diz respeito ao tipo e concentração de poluentes é complexo e frequentemente inconclusivo. Mesmo entre os fatores de influência óbvios, como o tráfego diário, existem resultados contraditórios entre os vários estudos. Estas contradições surgem devido à variação significativa nas concentrações de poluentes entre os locais de estudo e dentro de cada local, entre diferentes eventos de escoamento ou efeitos adicionais que são difíceis de ser considerados.

De acordo com Kayhanian *et al.* (2012), os constituintes das águas de escorrência de estradas podem ser divididos em:

- (1) Parâmetros convencionais de qualidade da água (como sólidos suspensos totais, SST);
- (2) Metais (e.g. cádmio, Cd; cobre, Cu; chumbo, Pb ou zinco, Zn);
- (3) Nutrientes (por exemplo, nitratos ou azoto Kjeldal total);
- (4) Constituintes menos comuns, tais como: Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos ou herbicidas.

A variabilidade e a dificuldade de estimar a concentração de poluentes de águas de escorrência de estradas foi apresentada por Van Duijnhoven *et al.* (2013) ao efetuar monitorizações para várias estradas na Holanda e ao verificar que estabelecer um padrão a nível nacional seria inviável. No mesmo país, Tromp (2005) e van den Berg (2009) constataram que as concentrações de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, Cu e Zn no escoamento rodoviário eram superiores aos padrões nacionais de qualidade da água.

Após uma extensa campanha de monitorização realizada no Reino Unido, Crabtree *et al.* (2006)

concluíram que existe uma forte correlação entre a concentração de poluentes e a intensidade da precipitação. Na Irlanda, Higgins *et al.* (2008) e Desta *et al.* (2007) identificaram resultados semelhantes incluindo ainda o volume precipitado e o período seco antecedente como fatores relevantes, que influenciam as características das águas de escorrência de estradas.

Gan *et al.* (2008) identificaram os óleos e gorduras, SST e metais pesados como os poluentes dominantes nas águas de escorrência de estradas de uma região da China. Os autores compararam o escoamento de estradas de locais urbanos e rurais e descobriram que as concentrações de poluentes em estradas urbanas são até 73% superiores. Nesse estudo, o volume precipitado e o período seco antecedente foram as variáveis que mais influenciaram as concentrações observadas.

O conhecimento das características da poluição de escorrências rodoviárias é crucial para a avaliação de seus possíveis impactos nas massas de água e nos ecossistemas associados, bem como para fundamentar a necessidade de construção de sistemas de tratamento para mitigação de impactos. O método mais preciso para avaliar a qualidade da água das escorrências é a monitorização de escoamentos das estradas, incluindo amostragem automática de eventos de precipitação e escoamentos, análises caracterizadoras da qualidade das amostras e cálculo das Concentrações Médias de Eventos (CME), Concentração Média do Local (CML) e cargas de poluentes.

Geralmente, considera-se aceitável que a monitorização de pelo menos 10 eventos de precipitação independentes seja suficiente para se calcular uma CML robusta para um determinado local. O trabalho de monitorização requer recursos humanos e materiais consideráveis e está sujeito a variáveis não controladas, como problemas com equipamento, ausência de eventos de chuva apropriados, etc. Neste sentido, as ferramentas de previsão de concentração / carga de poluentes podem ser um método importante para a proteção do meio ambiente e dos recursos hídricos. A robustez das ferramentas de previsão é validada por registos de monitorização consistentes que servem tanto para o seu desenvolvimento como calibração. Importa destacar que a Concentração Média do Local pode carecer, ela própria, de revisão ao longo do tempo. Um exemplo clássico prende-se com a mudança nas propriedades dos combustíveis que causou, pela redução do chumbo, um impacto significativo nas características das águas de escorrência de estradas.

Barbosa *et al.* (2011) efetuou a comparação das

CML para o mesmo local da Auto-estrada A1, em Portugal, relativos a monitorizações efetuadas em dois anos diferentes (2002 e 2009). O trabalho foi realizado pela mesma equipa, utilizando os mesmos equipamentos e metodologias, sendo os eventos de precipitação diferentes em volume, intensidade e duração da chuvada. As diferenças observadas na gama de valores obtidos, apresentados no Quadro 1, é um exemplo prático que confirma que, mesmo para um determinado local com informações de monitorização consistentes, a CML será sempre um valor aproximado e indicativo, não devendo ser considerado um valor exato e imutável.

Quadro 1. Comparação dos resultados de monitorização para dois anos diferentes para a autoestrada A1 (Barbosa *et al.*, 2011)

	A1 TMA* = 30299 Monit. 2002	A1 TMA* = 27746 Monit. 2009
Total de amostras	5–93	37–73
Total de eventos	6	11
pH	6.3 – 7.4	5.8 – 7.2
Condutividade (µS/cm)	124 – 357	58.0 – 288.0
SST (mg/l)	10.0 – 872	0.3 – 350.0
Fe (mg/l)	0.086 – 3.030	0.024 – 7.192
Zn (µg/l)	62 – 736	13 – 834
Cu (µg/l)	27 – 76	6 – 51
Pb (µg/l)	2 – 58	2 – 58
Cd (µg/l)	< 0.5	0.09–0.32
Óleos e gorduras (mg/l)	3.2 – 40	0.04 – 16.00

* Tráfego diário médio anual

3. METODOLOGIA

3.1 Pesquisa na literatura internacional de ferramentas e dados de monitorização sobre escorrências rodoviárias

Para a identificação das ferramentas existentes, bem como de dados de monitorização de escorrências rodoviárias que posteriormente pudessem ser utilizados para testar as ferramentas selecionadas efetuou-se, no âmbito do projeto PROPER (*Road Runoff Pollution Management and Mitigation of Environmental Risks*), uma pesquisa na literatura internacional e a consulta a especialistas. A pesquisa identificou mais de uma centena de publicações. Para garantir a objetividade do estudo, foi implementado um procedimento de avaliação qualitativa de cada referência para auxiliar na seleção das informações relevantes, de acordo com a seguinte escala: i) Pouco relevante; ii) Relevante; iii) Relevante com

dados de monitorização; iv) Relevante com dados de monitorização e ferramentas de previsão; e v) Altamente relevante. No final, um conjunto de 103 referências bibliográficas contendo ferramentas de previsão e/ou dados de monitorização foram selecionadas como relevantes.

A caracterização dessas 103 referências quanto ao tipo e ao ano de publicação revelou que 80% eram artigos e relatórios científicos, redigidos em inglês. A maioria das publicações é posterior ao ano de 2001.

3.2 Seleção de ferramentas para a previsão da qualidade de escoamentos

Com base neste trabalho de pesquisa, foram identificadas seis ferramentas de previsão de concentrações de poluentes com potencial para a fase de avaliação experimental. Estabeleceram-se três critérios para determinar se estas ferramentas pré-selecionadas seriam adequadas a uma utilização geral, por *stakeholders* na Europa, a saber: (i) a necessidade de dados de input (de fácil obtenção); ii) a facilidade de utilização (interface simples) e (ii) a consistência dos resultados (de preferência que a CML seja diretamente calculada). Cada um destes critérios foi avaliado com base numa pontuação de 1 a 3 conforme esquematizado na Fig. 1. O Quadro 2 mostra a pontuação obtida em cada critério e a pontuação global para cada uma das seis ferramentas.

Com base nos resultados apresentados no Quadro 2, selecionaram-se as quatro ferramentas com maior pontuação para serem testadas experimentalmente, nomeadamente:

- HAWRAT (desenvolvido para o Reino Unido)
- SELDM (desenvolvido para os EUA)
- PREQUALE (desenvolvida para Portugal)
- Equação de Kayhanian et al. (desenvolvida para a Califórnia, EUA).

Pontuação	Dados de input	Utilização	Outputs	Pontuação global
1	Dados de difícil acesso	Utilização difícil	Output inconsistente	Somatório da pontuação dos 3 critérios
↓	↓	↓	↓	
3	Dados de fácil acesso	Utilização amigável	Output consistente	

Figura 1. Sistema de pontuação para seleção das ferramentas a testar experimentalmente.

3.3 Caracterização de dados de monitorização de estradas europeias para teste das ferramentas

Para testar as quatro ferramentas selecionadas, foram angariados e organizados dados de monitorização de 22 estradas, localizadas em 7 países diferentes da Europa, nomeadamente em Portugal, França, Holanda, Suíça, Inglaterra, Irlanda e Noruega. Estes dados resultaram da pesquisa descrita em 3.1. A localização destes casos de estudo é apresentada na Fig. 2, onde se evidenciam as diferentes regiões de precipitação da Europa.

As 22 estradas estão localizadas em diferentes regiões do território europeu, com uma precipitação média anual que varia entre 500 e 2000 mm. Os dados de França representam a mesma estrada e local, com dois pavimentos diferentes (asfalto poroso e convencional) pelo que foram considerados como 2 de casos de estudo diferentes. Estes 22 locais cobrem uma ampla gama de condições, como, por exemplo: (i) áreas de drenagem entre 290 m² e 58680 m² e (ii) Tráfego Diário Médio Anual de 2918 a 78.000 veículos. A menor fração impermeável de uma bacia hidrográfica rodoviária monitorizada diz respeito a uma estrada portuguesa (A1), com cerca de 41% da área impermeável. Os dois países que forneceram mais casos de estudo foram Portugal e Inglaterra (6 casos cada um).

Quadro 2. Avaliação quantitativa das seis ferramentas pré-selecionadas.

Critérios	Ferramentas pré-selecionadas					
	PREQUALE (Barbosa et al., 2011)	HAWRAT (Crabtree et al., 2008)	Kayhanian et al. (2007)	SELDM (Granato, 2013)	Higgins (2007)	RSS (Gardiner et al., 2016)
Dados de input	3	3	2	1	2	1
Utilização	3	3	3	2	2	2
Output	1	2	2	3	1	2
Global	7	8	7	6	5	5

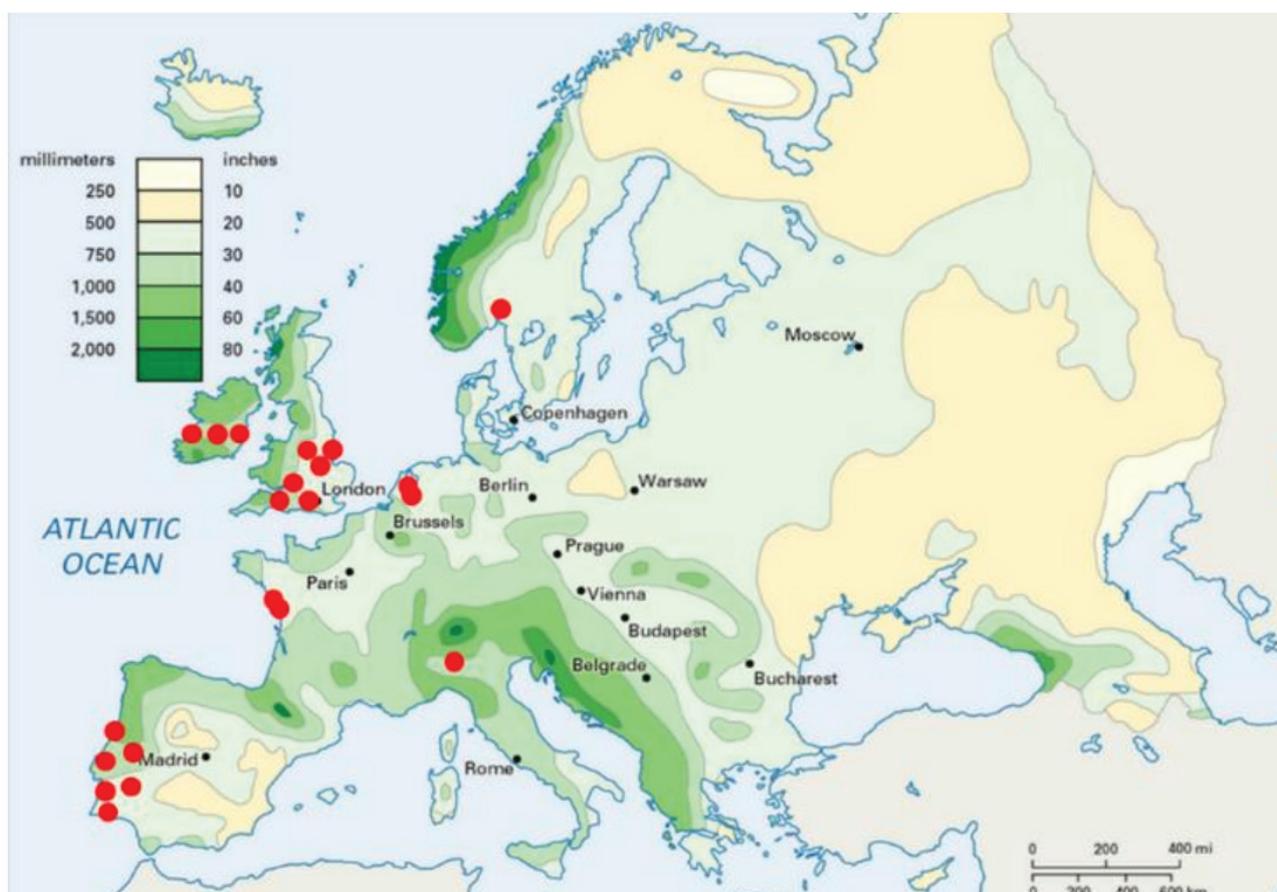


Figura 2. Localização dos casos de estudo (pontos a vermelho).

Quadro 3. Caracterização das 22 estradas/ casos de estudo.

Código	País	Id da estrada	Área de drenagem (m ²)	Fração impermeável (0-1)	Precipitação anual (Panual) ¹ (mm)	Tráfego diário médio anual (TDMA) (nº veículos)	Extensão drenagem (m)	Declive (%)	PME ² (mm)
P1	Portugal	A 1	22800	0.41	646	27746	814	2.95	7.80
P2		A 2	1287	1	528	16344	117	7.70*	6.00
P3		A 6	5580	1	744	2918	465	3.00*	5.50
P4		A 22	15422	0.85	518	24000	612	3.40*	7.00
P5		A 25	287.5	1	1014	15673	25	2.50	6.00
P6		IP 6	7280	1	709	6539	520	3.30*	6.00
N1	Holanda	A 27 permeável	48590	0.5	776	63000	1600	0.20*	3.67
N2		A 27 impermeável	30510	1	776	63000	2700	0.20*	6.00
N3	Noruega	E 6	22000	1	834	42000	1630*	3.40*	2.50
F1	França	A 11 permeável	3200	0.5	786	24103	275	2.50	9.00
F2		A 11 impermeável	3200	1	786	24103	275	2.50	9.00
I1	Irlanda	M 7 - Kildare	14184	1	731	27500	1200	0.94	3.80
I2		M 7 - Monasterevin	11368	1	731	27500	480	0.50	3.80
I3		M 7 - Portlaoise	9600	1	731	27500	800	0.50	3.80
E1	Inglaterra	M 4 - Brinkworth	8755	1	745	70000	724	1.10*	2.08
E2		M 4 - River Ray	4348	1	745	35000	303	0.66*	1.48
E3		M 40	58680	1	615	78000	1800	2.40*	3.27
E4		A 417	20232	1	843	24000	735	3.10*	1.55
E5		A 34 - Gallos Brook	2760	1	660	64000	250	0.80*	1.19
E6		A 34 - RioEnborne	19425	0.5	635	36000	1050	0.19*	5.90
S1	Suíça	A12 - Bümplizstrasse	42084	1	986	38985	1625	0.43*	2.15
S2		A1 - Gabelbach	12200	1	986	39500	4300	1.67*	2.60

¹ Estimado através da funcionalidade Google Earth Pro

² Precipitação Média por Evento (PME). As curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) usadas como auxiliar para o cálculo da PME para as diversas estradas estão disponíveis em: Brandão *et al.*, 2001; Korving *et al.*, 2009; <http://eklika.met.no>; EDF-DTG e Cemagref, 1993 e <https://www.met.ie>.

As informações disponíveis para algumas das 22 estradas não eram suficientes para cumprir todos os requisitos de input das ferramentas. Desta forma, foram assumidos pressupostos para permitir o teste das ferramentas, conforme explicado a seguir.

As regiões climáticas estabelecidas no HAWRAT referem-se à divisão do Reino Unido em quatro áreas de acordo com a temperatura (quente ou fria) e as condições de humidade (húmido ou seco). Seguindo as especificações do HAWRAT, uma região climática foi atribuída a cada uma das 22 estradas, aplicando o mesmo princípio definido pelos autores para o Reino Unido.

A área de drenagem e o comprimento do canal de drenagem eram conhecidos na maioria dos casos. Para um caso (E2, Quadro 3), o valor foi estimado multiplicando o comprimento da estrada pela sua largura. Quando o comprimento e o declive da estrada eram desconhecidos, eles foram calculados por meio do Google Earth - os casos em que essa abordagem foi usada são indicados com "*" na coluna "Declive" do Quadro 2.

A fração impermeável para as estradas N1, F2 e E6 foi assumida como sendo 0.5, uma vez que os relatórios do estudo apenas informam que as rodovias possuem asfalto permeável (Brongers, 2010, Higgins 2007 e Moy e Crabtree 2002).

A precipitação anual foi baseada na média dos registos anuais de precipitação para cada local. As curvas de intensidade-duração-frequência (IDF) foram utilizadas para calcular a precipitação média por evento (PME para o PREQUALE). Para alguns casos, essas curvas não estavam disponíveis e a PME foi estimada como a média do volume de precipitação para os eventos identificados na série temporal de precipitação.

A implementação das ferramentas de previsão exigiu métodos e abordagens diferentes. O SELDM possui interface gráfica e todos os cálculos foram feitos no próprio software. O PREQUALE é uma equação multiparamétrica que calcula diretamente a CML e foi facilmente implementada numa folha Excel. O mesmo foi feito para a equação de Kayhanian *et al.* (2007) embora neste caso os resultados sejam estimativas de CME. O HAWRAT é, em si mesmo, uma folha de cálculo estabelecida para o contexto do Reino Unido. Assim, essa folha usada diretamente para as 6 estradas localizadas em Inglaterra (E1 a E6). Para a utilização desta ferramenta nos demais 16 locais, implementou-se as equações HAWRAT numa folha Excel criada para esse fim.

Para cada caso de estudo apresentado no Quadro 3, as CMLs foram calculadas pela média das CMEs, tanto para os eventos monitorizados quanto para

os estimados. A exceção foi o caso da ferramenta PREQUALE que fornece diretamente a CML. Após comparar os parâmetros de monitoração de qualidade das escorrências disponíveis para os 22 casos com a lista de poluentes prevista pelas 4 ferramentas em estudo, foram selecionados 5 constituintes para a avaliação, nomeadamente: sólidos suspensos totais (SST), cobre (Cu), zinco (Zn), chumbo (Pb) e cádmio (Cd). Esses poluentes são relevantes e considerados poluente-chave na caracterização das escorrências de estradas, sendo mencionados na maioria das referências bibliográficas.

4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

A comparação entre a CML real (monitorizada) e a calculada através da implementação dos 4 modelos encontra-se na Fig. 3, para as 22 estradas e os 5 poluentes selecionados como parâmetros chave neste estudo. Os resultados demonstraram que nenhuma das quatro ferramentas testadas é capaz de prever as concentrações de poluentes no escoamento de cada estrada (Fernandes e Barbosa, 2019).

5. DISCUSSÃO

5.1 Discussão dos resultados e da eficácia das ferramentas

Tendo em conta que o uso corrente destas ferramentas por parte de utilizadores finais é diferente do seu uso para trabalhos de investigação, uma questão relevante a ser discutida é a facilidade do seu uso e a disponibilidade dos dados de entrada.

Em relação ao PREQUALE quase todos os dados encontram-se facilmente disponíveis. Nesse caso, apenas a precipitação média precisa de cálculos adicionais e de uma curva IDF calibrada para o local. A aplicação do HAWRAT é bastante simples para locais situados no Reino Unido, ao passo que fora deste contexto geográfico é necessário muito trabalho extra, nomeadamente a obtenção de séries horárias de precipitação. Verificou-se ainda que o HAWRAT é bastante sensível ao mês do evento de precipitação (que pretende representar a sua sazonalidade). Da mesma forma, a implementação do SELDM fora dos EUA é complicada e trabalhosa, mais uma vez devido à necessidade de obter os dados das variáveis climáticas e inseri-los manualmente.

O segundo critério para avaliar as ferramentas foi a consistência dos resultados obtidos, em

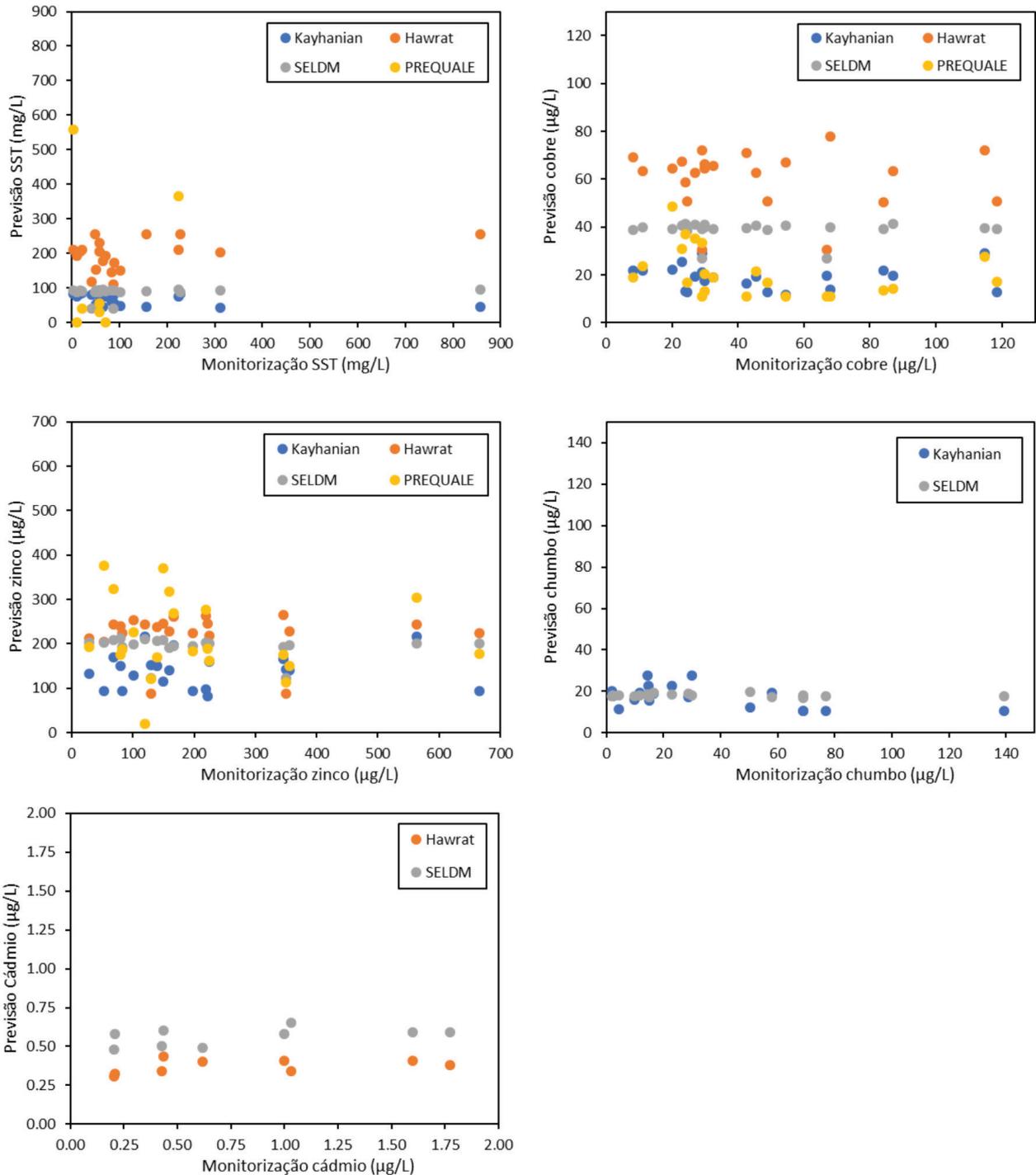


Figura 3. Comparação da CML monitorizada e da estimada pelas ferramentas para (a) SST; (b) cobre; (c) zinco; (d) chumbo e (e) cádmio.

comparação com os dados de monitorização. Os resultados apresentados na Fig. 3 apoiam a tese de que não é viável que uma ferramenta seja adequada para prever as concentrações de poluentes em águas de escorrência de estradas para uso global. A estimativa de concentrações de poluentes está correlacionada com o conjunto de dados que apoiou o estabelecimento das ferramentas e à respetiva variabilidade temporal. Assim, embora possa parecer útil, a tarefa de estabelecer uma

concentração média “constante” para um local específico de determinada estrada será inviável tendo em conta, entre outros, a variabilidade dos eventos de precipitação, o volume de tráfego ou o uso do solo circundante. Relativamente à precipitação, há ainda a considerar a sua variabilidade em cenários de alterações climáticas. Adicionalmente, as concentrações de poluentes são também influenciadas por mudanças causadas pelo desenvolvimento de novos motores e materiais

dos pavimentos. Desta forma, o conhecimento preciso da CML, um valor variável no tempo, só pode ser alcançado por trabalho de monitorização periódico, não se esperando que uma ferramenta determinística, que tenha sido calibrada e validada para um determinado local, região ou país, possa ser amplamente utilizada no contexto de um continente, ou internacionalmente.

5.2 As fontes de poluição difusa e os cenários de alterações climáticas

É sabido que os desafios de adaptação às alterações climáticas são, em última análise, enfrentados por quem está no terreno a assegurar a gestão de recursos hídricos, em situações correntes e críticas, a sua monitorização e o controlo de fontes de poluição. Esses atores necessitam de ser capacitados com ferramentas e informações que permitam o planeamento e a adequada decisão estratégica.

Está-se numa fase de acentuado desenvolvimento de modelos de previsão de cenários climáticos, bem como numa aprendizagem da sociedade de como os utilizar, incluindo a compreensão dos pressupostos e limitações associados à projeção de cenários futuros. Há que ter claro que entre a informação meteorológica - facultada a uma escala de semanas, até um mês - e projeções mais alargadas, encontram-se previsões sazonais, decadais e multi-decadais. Cada horizonte temporal apoia determinados tipos de decisões e está imbuído de distintos pressupostos e incertezas. Soares *et al.* (2018) referem a importância de informar adequadamente os setores sensíveis ao clima, de forma a potenciar o planeamento e a tomada de decisões. Estes autores, com base numa pesquisa online e entrevistas com potenciais utilizadores identificam os requisitos da informação para diversos setores, entre eles a agricultura, a silvicultura, a energia e a água. Os resultados revelaram que os aspetos mais importantes são: o formato das informações climáticas, a compatibilidade destes dados com os sistemas de cada organização utilizadora da informação, e ainda a credibilidade dos provedores da informação (Soares *et al.*, 2018).

No momento presente ainda não existem serviços climáticos que possam ser consultados a qualquer momento e que facultem a informação necessária sobre projeções climáticas, no formato e linguagem adequados às necessidades dos utilizadores. Entre as plataformas de acesso livre com informação climática - tanto de dados históricos como futuros - podem citar-se, como exemplo, o *Copernicus Climate Change Service (C3S)* (<https://climate.copernicus.eu/>) da União Europeia

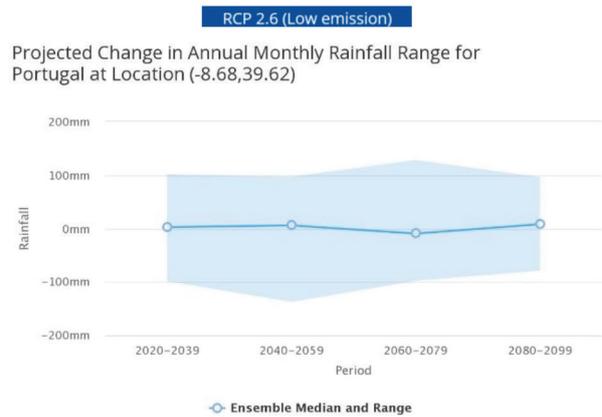
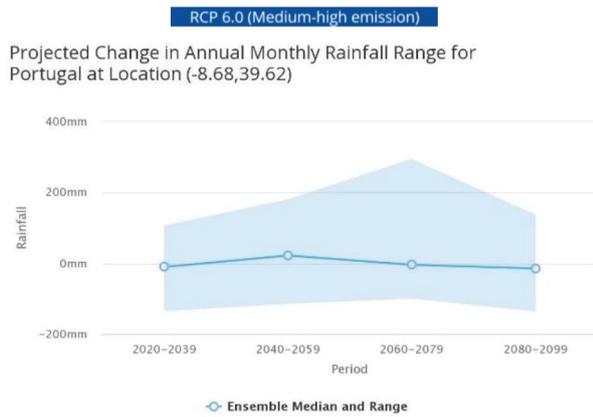
e o *Climate Knowledge Portal* do Banco Mundial (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>).

A título ilustrativo das potencialidades atuais da utilização deste tipo de plataforma para avaliar impactos das alterações de precipitação na gestão de fontes de poluição difusa, fez-se uma pesquisa no site do Banco Mundial para a região de Fátima, Portugal. A escolha recaiu sobre este local por terem sido efetuadas pelos autores monitorizações das escorrências da auto-estrada A1 (cf. Quadro 1 e Fig. 2) nos anos de 2002 e 2009. Na monitorização efetuada em maio de 2002, os eventos de precipitação tiveram volumes entre 1.4 e 12.2 mm. A segunda monitorização teve lugar de abril a junho de 2009, registando-se volumes de precipitação de 2.0 a 17.6 mm.

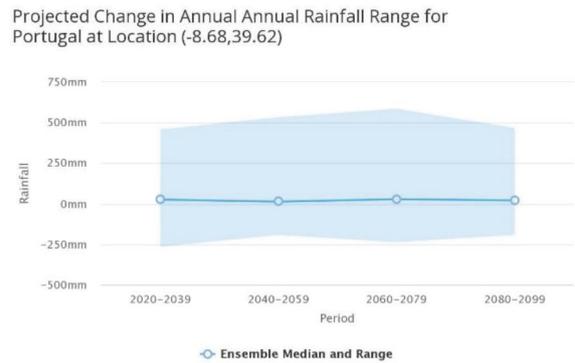
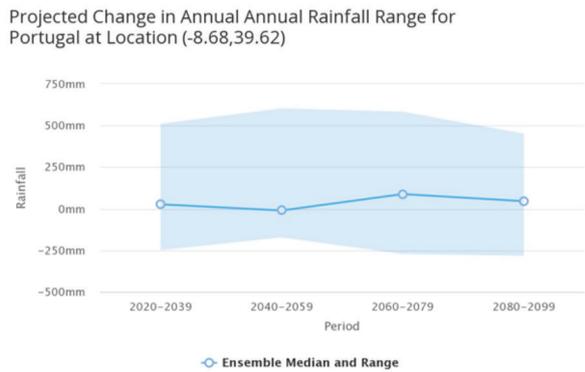
Ao entrar no portal (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/portugal/climate-data-projections>), há que selecionar o país e o local - este último através do posicionamento do cursor no mapa do país selecionado (Fátima: localização com as coordenadas -8.68, 39.62).

O segundo passo foi a escolha dos cenários de emissão e dos indicadores. Para o caso do presente exercício foram escolhidos dois cenários de emissões, para efeitos comparativos: o RCP6.0 (emissões médias-altas) e o RCP2.6 (emissões baixas). Relativamente aos indicadores, selecionaram-se os seguintes três: i) Projeção da alteração da precipitação média mensal (*Projected Change in Annual Monthly Rainfall Range*); ii) Projeção da alteração da gama de precipitação anual (*Projected Change in the Annual Rainfall Range*) e iii) Projeção da alteração da sazonalidade da precipitação (*Projected Change in the Rainfall Seasonality*). Notar que este último é um indicador que o Banco Mundial destina ao setor da agricultura. Estes indicadores foram escolhidos no sentido de perceber potenciais efeitos das alterações da precipitação sobre fontes de poluição difusas. Apresentam-se na Fig. 4 os seis gráficos extraídos desta consulta para a média do "ensemble" (conjunto de cenários gerados) e para horizontes temporais agrupadas a 19 anos, até 2099. A sua observação permite elaborar os seguintes comentários:

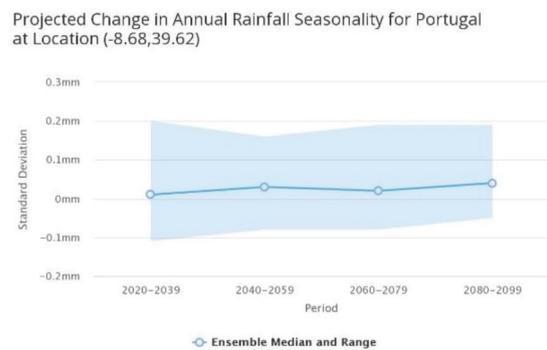
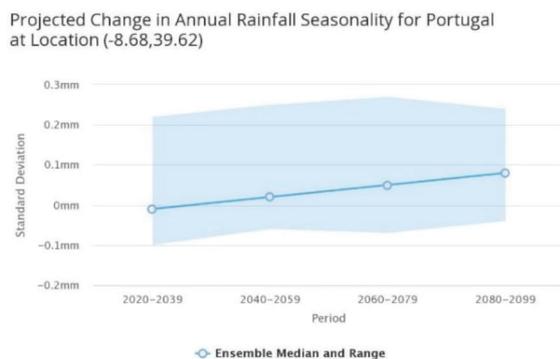
- É visível a diferença entre os gráficos da esquerda e da direita, sendo patente e expectável que os cenários de emissões baixas (RCP 2.6) provocam menores alterações futuras que o RCP 6.0, para qualquer dos indicadores;
- As alterações projetadas até 2040-2059 não diferem significativamente do cenário atual. A partir dessa data, para os indicadores ii) e iii) e cenário RCP 6.0 verificam-se variações com algum significado;



a) Projecção da alteração da precipitação média mensal- gráficos em cima, para os dois cenários de emissões



b) Projecção da alteração da gama de precipitação anual - gráficos em cima, para os dois cenários de emissões



c) Projecção da alteração da sazonalidade da precipitação - gráficos em cima, para os dois cenários de emissões

Figura 4. Gráficos de projeções climáticas para a precipitação em Fátima, Portugal (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/portugal/climate-data-projections>).

- Apenas o indicador de alteração da sazonalidade de precipitação aparenta uma tendência constante de subida, desde 2020-2039 até 2080-2099;
- A análise qualitativa corrobora que são esperadas alterações na sazonalidade e na concentração da precipitação em eventos de maior intensidade, sem que se esperem alterações significativas dos valores médios anuais.
- A consulta online permite saber o valor de cada

- ponto do gráfico através do posicionamento do cursor sobre o mesmo. Por exemplo, para o indicador i), o valor da mediana do ensemble para 2060-2079, RCP=6.0, é de -9,37mm. Da mesma forma se tem acesso aos valores da gama de variação; para este mesmo ponto essa variação (percentil 10 a 90) varia entre -98.03mm e 128,58mm;
- Como se observa dos gráficos, a leitura do *ensemble* proporciona uma base de decisão que é bem distinta das gamas de valores

que as diferentes projeções abarcam (área sombreada a azul).

6. CONCLUSÕES

Vários estudos confirmam que as escorrências de estradas podem causar impactos cumulativos e agudos na qualidade química e no estado ecológico das massas de água recetoras (por exemplo, Vieira *et al.*, 2013; Kayhanian *et al.*, 2003). De acordo com Hvitved-Jacobsen *et al.* (2010), os efeitos agudos resultantes da descarga de águas pluviais ocorrem a escalas temporais de menos de 1 hora até 1 dia e estão relacionados com impactos hidráulicos, a descarga de matéria orgânica biodegradável ou de sólidos em suspensão. O conhecimento das características da poluição das escorrências rodoviárias, juntamente com a avaliação da vulnerabilidade dos sistemas hídricos fundamentam a decisão de implementar medidas de mitigação de impactos e proteção do meio recetor, como a construção de sistemas de tratamento (ex. Barbosa e Fernandes 2009).

Com base na revisão da literatura e na consulta de especialistas, quatro ferramentas dos EUA e da Europa foram usadas na previsão de Concentrações Médias do Local (CML) de 22 estradas, em 7 países europeus, incluindo Portugal. Os resultados para as CML de SST, Zn, Cu, Pb e Cd mostraram que nenhuma das ferramentas foi eficaz, exceto o PREQUALE e o HAWRAT, para as estradas dos respetivos países onde foram calibradas. As ferramentas SELDM e HAWRAT foram ainda consideradas pouco amigáveis para uma utilização corrente.

Este trabalho evidencia que não existem ferramentas imediatas, simples e eficazes para lidar com as fontes de poluição rodoviária. Assim, não é recomendável tomar decisões de gestão da poluição de escorrências rodoviárias utilizando ferramentas de previsão que não foram estabelecidas para o local / região ou país ou que estão desatualizadas. É importante notar que apenas uma monitorização periódica permite que uma dada CML possa ser validada ou atualizada.

Por outro lado, há que avaliar adequadamente a vulnerabilidade das massas de águas superficiais e subterrâneas que recebam descargas de estradas (p.ex., Revitt *et al.*, 2018). Tendo em conta não só a elevada variabilidade hidrológica típica dos climas Mediterrânicos, como os CAC, a concentração de poluentes em massas de água deve ser sempre avaliada ao longo de um período de tempo significativo. É relevante atender a registos históricos de qualidade da água, como no estudo de Vieira *et al.* (2013) que usou 12 anos de registos históricos de qualidade da água da albufeira de S. Domingos. O estudo concluiu que a diluição

de poluentes rodoviários no volume de água da albufeira mitigava impactos; permanece a questão de possíveis alterações em CAC.

As características específicas do local ou região climática das massas hídricas, bem como as práticas administrativas e de governança dos países deverão ser tidas em conta para estabelecer um método objetivo e simples para controlar os impactos da poluição de escorrências de estradas no meio hídrico e ecossistemas. A importância de uma boa comunicação e dinâmica colaborativa entre investigadores, *stakeholders* e decisores é também fundamental (Barbosa e Matos, 2017).

Para a previsão de situações críticas para as massas de água, em cenários de alterações climáticas, constata-se que ainda há caminho a percorrer em termos de disponibilidade da informação adequada à tomada de decisão. Projeções de cenários climáticos disponíveis, por exemplo no portal do Banco Mundial, requerem uma capacidade de seleção dos cenários de emissão, dos indicadores relevantes e ainda, identificar qual a base da tomada de decisão: se os valores medianos do conjunto de projeções (*ensemble*) ou as projeções extremas.

Entende-se que o trabalho aqui apresentado é importante em termos de conclusões, abrindo perspetivas para a prática futura e abordagens inovadoras para a gestão de fontes de poluição difusa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração do Eng. Duarte Galhardo na análise das ferramentas de previsão, no âmbito da sua tese de mestrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bakr, A.R., Fua, G.Y., Hedeend, D., 2020. Water quality impacts of bridge stormwater runoff from scupper drains on receiving waters: A review. *Science of the Total Environment*, 726 (2020) 138068. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138068>

Barbosa A.E., Matos R., 2017. Water Management in a changing climate: Research at the service of society. 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage 11-15 September, Prague, Czech Republic.

Barbosa, A.E., Fernandes, J.N., 2009. Assessment of treatment systems for highway runoff pollution control in Portugal. *Water Science and Technology* 59(9), 1733-1742.

Barbosa A.E., Telhado A., Caliço J., Fernandes J., Vieira J., Almeida L., Whitehead M., Ramísio P., Antunes P.,

- Baguinho R., 2011. Guidelines for integrated road runoff pollution management in Portugal, G-Terra Project, Portugal.
- Beier P., Hansen L.J., Helbrecht L., Behar D. 2016. A How-to Guide for Coproduction of Actionable Science. Conservation Letters, 9 pp. doi/10.1111/conl.12300
- Brandão, C., Rodrigues, R., Costa, J. P. 2001. Análise de fenómenos extremos. Precipitações intensas em Portugal Continental. Instituto Nacional da Água, Lisboa, Portugal.
- Brongers, I. 2011. Jaarverslag 2010 monitoring WVO-vergunning A27. Report. Ministry of the Infrastructures and the Environment. Government of the Netherlands.
- Cemagref 1993. Etude des Courbes Intensite-Duree-Frequence de Precipitations dans les Alpes. EDF-DTG, Rhône-Alpes.
- Crabtree B., Dempsey P., Johnson I., Whitehead M., 2008. The development of a risk assessment approach to manage pollution from highway runoff. Proc. 11th Int. Conf. Urban Drainage. Edinburgh, Scotland UK, IWA Publishing.
- Crabtree, B., Moy, F., Whitehead, M., Roe, A., 2006. Monitoring pollutants in highway runoff. Water and Environment Journal 20(4), 287-294.
- Desta, M., Bruen, M., Higgins, N., Johnston, P., 2007. Highway Runoff Quality in Ireland, Journal of Environmental Monitoring 9(4), 366-371.
- Fernandes J.N., Barbosa A.E., 2019 Assessment of tools to predict road runoff water quality. Report D1.4 of the Project Road Runoff Pollution Management and Mitigation of Environmental Risks (PROPER). CEDR project. 29 pp.
- Gan H., Zhuo M., Li D., Zhou Y., 2007. Quality characterisation and impact assessment of highway runoff in urban and rural area of Guangzhou, China, Environmental Monitoring and Assessment, 140, 147-159
- Gardiner, L.R., Moores J., Osborne, A. e Semadeni-Davies, A., 2016. Risk assessment of road stormwater runoff. New Zealand Transport Agency research report 585, 146 pp.
- Granato G.E., 2013. Stochastic empirical loading and dilution model (SELDM) version 1.0.0, U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 4, chap. C3, 112 pp.
- Higgins, N., 2007. Analysis of Highway Runoff in Ireland. Trinity College. Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, 2007, 443 pages.
- Higgins N., Johnson P., Gill L, Bruen M., Desta M., 2008. Highway Runoff in Ireland and Management with a French Drain System. Proc.11th Int. Conf. Urban Drainage, Edinburgh, Scotland
- Huber M., Welker A., Helmreich B., 2016. Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: Occurrence, influencing factors, and partitioning. Science of the Total Environment, 541, 895–919
- Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J., Nielsen, A.H., 2010. Urban and Highway Stormwater Pollution. Concepts and Engineering. CRC Press. Taylor and Francis Group. 347 pages.
- Kayhanian, M., Singh, A., Suverkropp, C., Borroum, S., 2003. Impact of annual average daily traffic on highway runoff pollutant concentrations. Journal of Environmental Engineering 129(11), 975–990.
- Kayhanian M., Suverkropp C., Ruby A., Tsay K., 2007. Characterisation and prediction of highway runoff constituent event mean concentration, Journal of Environmental Management, vol. 85(2), 279-295.
- Kayhanian M., Fruchtmann B., Gulliver J., Montanaro C., Ranieri E., Wuertz S., 2012. Review of highway runoff characteristics: Comparative analysis and universal implications. Water Research 46(20), 6609-6624.
- Korving, H., Noortwijk, J., Van Gelder, P., Clemens, F., 2009. Risk-based design of sewer system rehabilitation. Structure and Infrastructure Engineering. 5(3). 215-227. <https://doi.org/10.1080/15732470601114299>
- Moy, F., Crabtree, R. 2002. Monitoring of pollution from highway runoff. A34-River Enborne. Environment Agency R&D Report
- Revitt M., Ellis B., Lundy L., Fernandes J.N., Barbosa A.E. 2018. D2.2 Construction, operation and maintenance of roads: parameters to assess surface and ground water vulnerabilities and associated risks. <http://proper-cedr.eu/onewebmedia/D2.2%20final%20revised.pdf>
- Soares M.B., Alexander M., Dessai, S. 2018.) Sectoral use of climate information in Europe: A synoptic overview. Climate Services 9 (5–20). <http://dx.doi.org/10.1016/j.cliser.2017.06.001>.

Tromp 2005. Helofyteninfiltratiesystemen voor zuivering van wegwater. Onderzoek naar het milieurendement van een Helofyteninfiltratiesloot langs de A1 in 't Gooi. Utrecht University, July, 2005

van den Berg, G.A., Hunneman, H., Langemeijer, H.D., 2009. Emissie van verontreinigingen door run-off en verwaaiing van dunne deklagen. Pilot Noordoostpolder. KWR 09.072. December 2009.

van Duijnhoven, N. and den Hamer, D., 2013. Case studie afstromend wegwater. Vergelijking metingen met de EmissieRegistratie. Deltares Report 1208038-000-ZWS-0005.

Vieira R., Fernandes J. N., Barbosa A.E. 2013. Evaluation of the impacts of road runoff in a Mediterranean reservoir in Portugal, Environ Monit Assess 185: 7659-7673. DOI 10.1007/s10661-013-3126-2.

Fontes de dados climáticos: snirh.apambiente.pt; www.climatedata.eu; fr.climate-data.org; www.meteoffice.gov.uk; www.meteosuisse.admin.ch.