

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **AVALIAÇÃO DO APORTE DE CARGA POLUIDORA EM RIOS COM USO DE POLUTOGRAMAS E EVENTO MÉDIO DA CONCENTRAÇÃO**

*Caroline Kozak<sup>1</sup>, Mariane Kempka<sup>2</sup> & Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes<sup>3</sup>*

**Abstract:** Diffuse pollution associated with surface runoff during rainfall events is one of the main challenges for water quality and quantity management in urban and mixed watersheds. This study evaluated the pollutant load discharge at two monitoring points in the Barigui River Basin (Brazil), using pollutographs, Event Mean Concentration (EMC), and mass-volume curves. Physicochemical parameters were monitored during a rainfall event using automatic samplers. The results indicated the occurrence of the first-flush phenomenon, especially downstream, influenced by increased flow and incremental watershed contributions, including domestic effluent discharge. EMC values showed significant increases between the monitoring points, ranging between 1.5 and 44.4 times. EMC curves proved to be effective tools for identifying pollutant behavior during the event, supporting the assessment of mass transport dynamics. The findings highlight the need for management strategies that address diffuse pollution impacts and emphasize the importance of monitoring extreme hydrological events for the protection of water resources.

**Resumo:** A poluição difusa associada ao escoamento superficial durante eventos de chuva representa um dos principais desafios para a gestão da quali-quantitativa em bacias urbanas e mistas. Este estudo avaliou a descarga de carga poluidora em dois pontos da Bacia do Rio Barigui (PR), utilizando polutogramas, o Evento Médio de Concentração (EMC) e curvas massa-volume. Foram monitorados parâmetros físico-químicos em um evento de precipitação com uso de amostradores automáticos. Os resultados revelaram a ocorrência do fenômeno de first-flush, principalmente no ponto mais a jusante, associado ao aumento da vazão e à contribuição incremental da bacia, inclusive com influência de efluente doméstico. Os valores de EMC apresentaram aumentos significativos entre os pontos monitorados, variando entre 1,5 a 44,4 vezes. As curvas EMC demonstraram ser ferramentas importantes para a identificação do comportamento dos poluentes durante os eventos, auxiliando na avaliação da dinâmica de transporte de massa. Os achados ressaltam a necessidade de estratégias de gestão que considerem os impactos da poluição difusa e a importância do monitoramento de eventos hidrológicos extremos para proteção dos recursos hídricos.

**Palavras-Chave** – poluição difusa; eventos de precipitação; qualidade da água

1) Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental - [carolkozak05@gmail.com](mailto:carolkozak05@gmail.com)

2) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Coordenação de Engenharia Civil - [mariane.kempka@utfpr.edu.br](mailto:mariane.kempka@utfpr.edu.br)

3) Universidade Federal do Paraná. Departamento de Hidráulica e Saneamento - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – [cris.dhs@ufpr.br](mailto:cris.dhs@ufpr.br)

## INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada e a intensificação das atividades antrópicas nas bacias hidrográficas têm intensificado os problemas relacionados à qualidade da água, especialmente durante eventos de precipitação. A poluição difusa proveniente do escoamento superficial representa um desafio significativo para a gestão dos recursos hídricos, pois seu comportamento é altamente variável e dependente das características do uso e ocupação do solo, da intensidade das chuvas e da dinâmica hidrológica da bacia (Novotny, 2003; Sodré, 2012; Porto e Porto, 2008; Righetto, 2017).

Neste contexto, métodos de avaliação quali-quantitativa, como os polutogramas e o cálculo do Evento Médio de Concentração (EMC), têm se mostrado ferramentas eficazes para a compreensão do comportamento dos poluentes ao longo dos eventos de chuva, por permitirem visualizar as variações temporais da concentração de contaminantes em resposta ao hidrograma do evento. Já o EMC fornece uma média ponderada da concentração, integrando volume e carga transportada. Adicionalmente, as curvas EMC ou curvas massa-volume ( $M(V)$ ) possibilitam a análise do fenômeno de first-flush, fundamental para identificar os momentos críticos de aporte de carga poluidora aos corpos hídricos (McCarthy et al., 2018; Righetto, 2017; Metadier e Bertrand-Krajewski, 2012).

Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar a carga poluidora em dois trechos da Bacia do Rio Barigui, utilizando polutogramas, valores de EMC e curvas massa-volume para um evento de precipitação. A investigação visa contribuir para o entendimento do comportamento da poluição difusa e suas implicações para a gestão da qualidade da água em bacias urbanas e mistas, como inicialmente abordado nos estudos de Braga (2013), Kozak et al., (2019) e Kozak (2020).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

Este estudo foi realizado na Bacia do Rio Barigui, uma das sub-bacias que integram a Bacia do Alto Iguaçu. A Bacia do Rio Barigui possui uma área total de aproximadamente 260 km<sup>2</sup>, e o rio homônimo apresenta uma extensão de 67 km. O monitoramento da qualidade da água foi conduzido em dois pontos específicos da bacia, denominados BA1 e BA2.

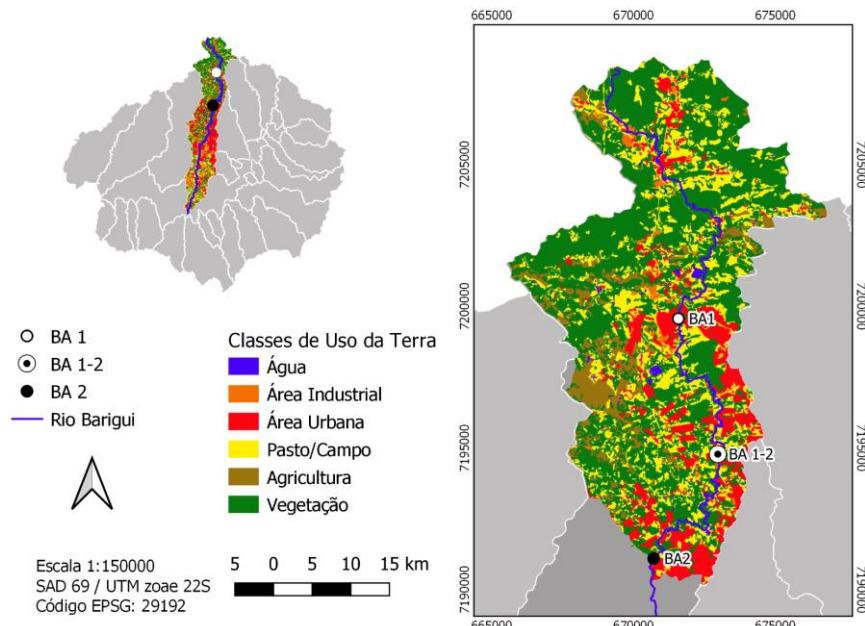
O ponto BA1 está localizado a montante, no município de Almirante Tamandaré, região metropolitana de Curitiba/PR (coordenadas UTM 671556 E, 7199322 N). Neste ponto, a área de drenagem é de cerca de 58 km<sup>2</sup> e o trecho do rio monitorado possui 14,8 km de extensão, abrangendo aproximadamente 22% da bacia. O ponto BA2 situa-se a jusante de BA1, no Parque Tingui, no município de Curitiba/PR (coordenadas UTM 670683 E, 7191046 N), ainda na porção norte da bacia. A área de drenagem incremental entre BA1 e BA2 é de aproximadamente 46 km<sup>2</sup>, com um acréscimo de 18 km na extensão do rio, o que representa mais 18% da área total da bacia. Somando-se as áreas de contribuição de ambos os pontos, obtém-se uma área drenada de 104 km<sup>2</sup>, correspondendo a 40% da Bacia do Rio Barigui.

Nessa porção monitorada da bacia, os principais usos do solo são vegetação (32,6%), área urbana residencial (29,9%) e pastagens (26,2%). Os usos industriais e agrícolas representam parcelas menores, com 5,8% e 4,7%, respectivamente. A Figura 1 apresenta o mapa de localização dos pontos de monitoramento, acompanhado do detalhamento dos usos da terra em cada área de contribuição.

O monitoramento dos eventos de chuva aconteceu simultaneamente nos pontos BA1 e BA2, com o uso de amostradores automáticos para coleta das amostras durante a ascensão e recessão do hidrograma (Kozak et al., 2019). Os amostradores eram programados para identificar as variações de coluna d'água provenientes dos eventos de chuva e, a partir de um gatilho inicial de acionamento, realizar a coleta de amostras de água do rio. O uso dessa ferramenta permitiu, portanto, uma

discretização quantitativa do hidrograma. Os dados de nível foram coletados usando um sensor instalado junto ao amostrador automático e posteriormente convertido em vazão usando a curva chave correspondente de cada ponto de monitoramento.

Figura 1 - Localização dos pontos de monitoramento BA1 e BA2 na Bacia do Rio Barigui e, em destaque, um perfil do uso da terra de cada área de contribuição dos pontos monitorados.



Foram analisados os parâmetros físico-químicos de qualidade da água de carbono orgânico dissolvido (COD), demanda química de oxigênio (DQO), fósforo total (PT), ortofosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ), turbidez e sólidos em suspensão (SS) de acordo com os protocolos definidos por APHA (2012), cujos dados estão em Kozak (2020).

## Evento médio de concentração

O evento médio da concentração (EMC) é a representação de amostragem ponderada pelo fluxo, que contém o fluxo de massa e volume de um evento de chuva (Novotny, 2002). O EMC pode ser calculado pela equação (1), e representado na forma de curvas, conforme representação da Figura 2.

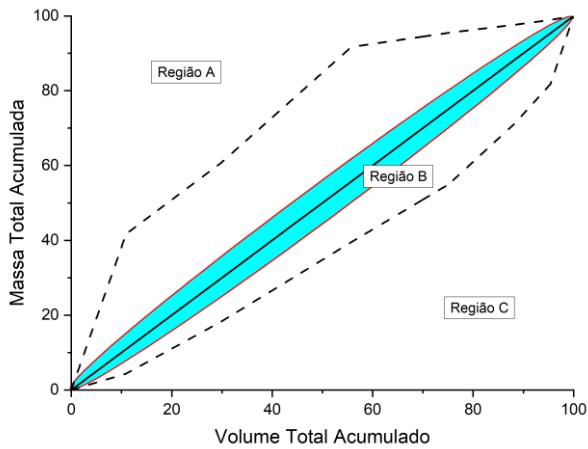
$$EMC = \frac{\sum Q_i * C_i}{\sum Q_i} \quad (1),$$

onde  $Q_i$  é o valor discreto da vazão medida durante a coleta da amostra  $i$ , e  $C_i$  é a concentração discreta da amostra  $i$ . Ambos os valores podem ser obtidos através dos polutogramas. O valor resultante do EMC representa a média ponderada de concentração do evento de chuva inteiro.

A curva de EMC é um gráfico adimensional com a carga de massa acumulada versus o total de volume escoado acumulado durante um evento de chuva. Também são conhecidas como curvas M(V), ou curvas massa-volume. Essas curvas são usadas para avaliar o comportamento dos poluentes durante um evento de chuva, permitindo que diferentes eventos de chuva em bacias hidrográficas diferentes possam ser comparados. Metadier and Bertrand-Krajewski (2012) propôs a classificação das curvas em três regiões diferentes, que indicam concentração, atenuação ou diluição de carga:

- Região A: indica que uma fração X da carga total de poluentes foi transportada em uma fração X-1 do volume total escoado, ou seja, há mais carga poluidora do que volume escoando. Tais curvas ficam acima da bissetriz e indicam a ocorrência do fenômeno de first-flush;
- Região B: indica que uma fração X da carga total de poluentes foi transportada em uma fração X do volume total escoado, sem diferenças significativas, ou seja, a carga poluidora inserida é equivalente a quantidade de volume escoado. Tais curvas são a própria bissetriz, com variação máxima de  $\pm 5\%$ ;
- Região C: indica que uma fração X da carga total de poluentes foi transportada em uma fração X+1 do volume total escoado, ou seja, há mais volume escoando do que carga poluidora sendo carreada. Tais curvas ficam abaixo da bissetriz e indicam a ocorrência de diluição.

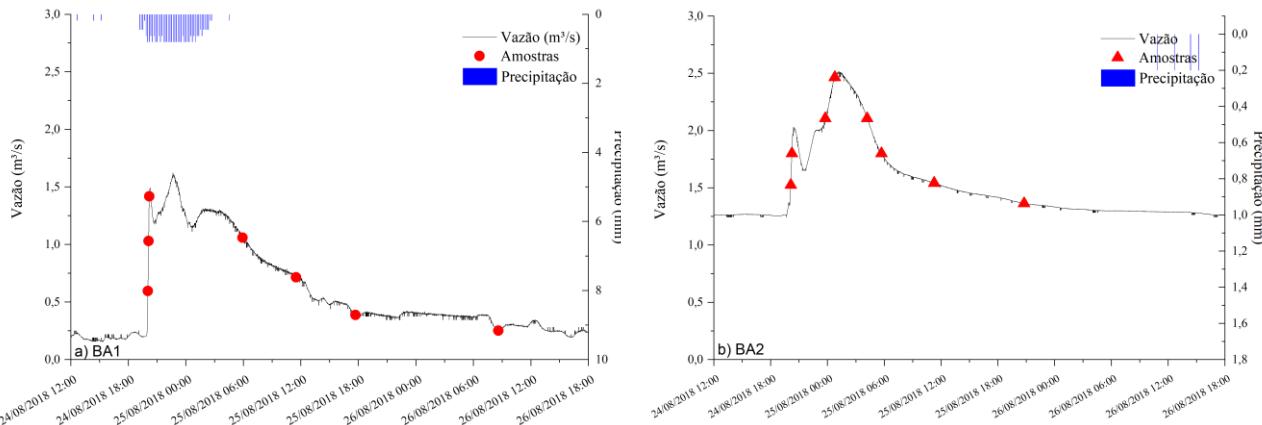
Figura 2 – Representação esquemática das curvas EMC



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra os hidrogramas resultantes do evento de precipitação de, aproximadamente, 4,8 horas e 23,60 mm, resultando em uma intensidade de 4,97 mm/h em BA1 e 7 amostras coletadas. Em BA2, a precipitação teve duração de 9,3 horas, aproximadamente, com 34,10 mm de chuva, resultando em um evento com intensidade de 3,65 mm/h e 8 amostras coletadas. A chuva foi moderada em ambos os pontos monitorados. Nesse evento de chuva, em BA1 foi transportado cerca de  $1,2 \text{ m}^3$  de volume de água, atingindo  $1,62 \text{ m}^3/\text{s}$  de vazão de pico. Já em BA2, o ponto mais a jusante na bacia e que recebe maiores quantidades de água e influências do entorno, o volume transportado foi o dobro ( $\sim 2,4 \text{ m}^3$ ) atingindo  $2,52 \text{ m}^3/\text{s}$  de vazão de pico.

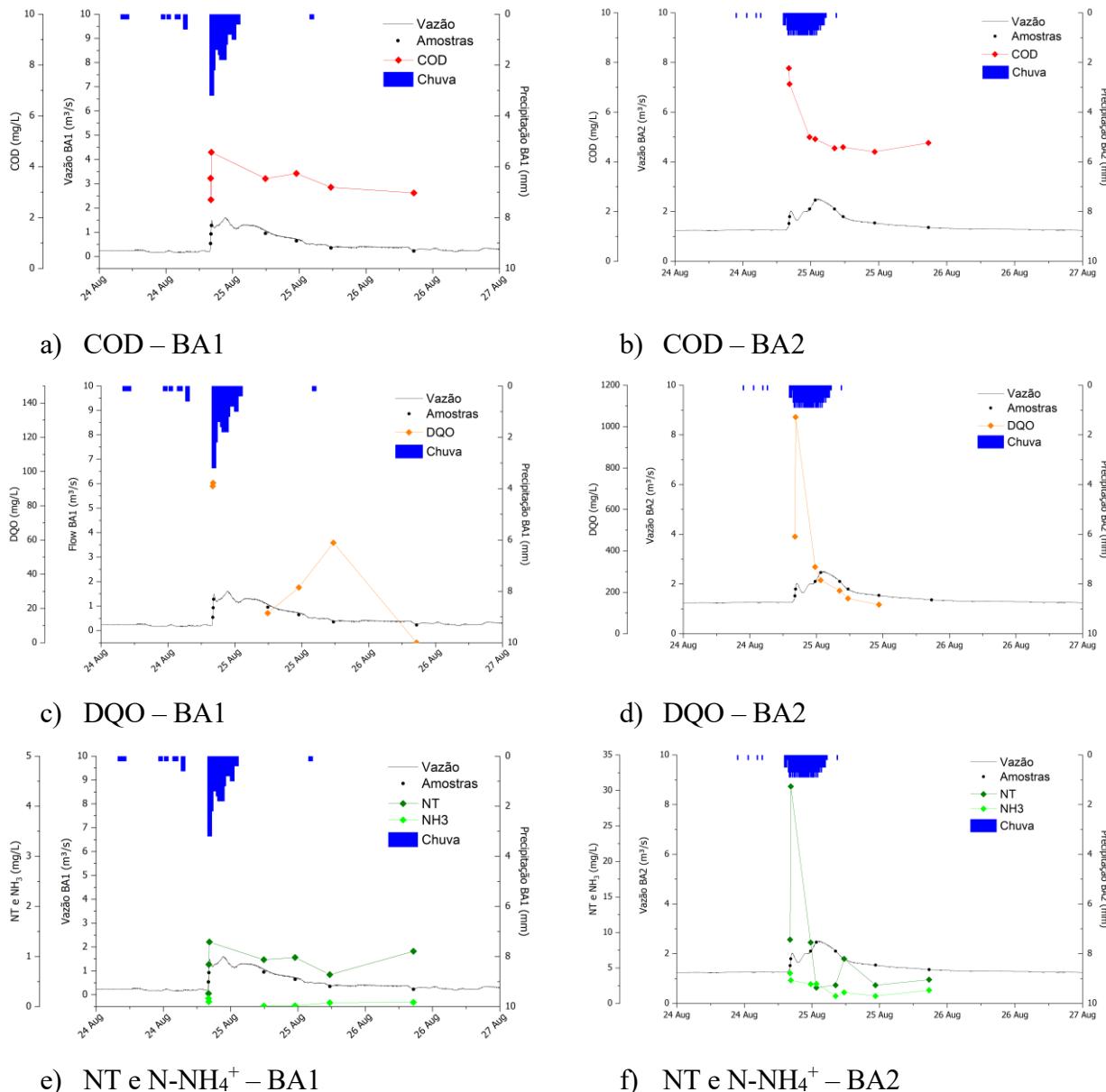
Figura 1 – Hidrograma nos pontos BA1 (a) e BA2 (b) e as respectivas amostras coletadas.

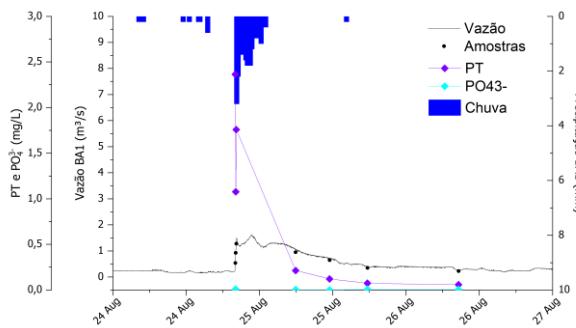


23 a 28 de novembro de 2025 - Vitória - ES

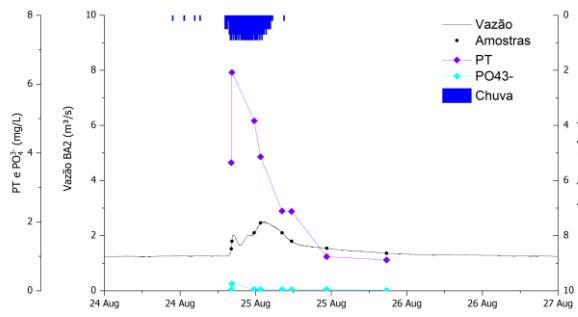
A Figura 2 mostra os polutogramas resultantes em BA1 e BA2 para os parâmetros de COD (Figura 2a e 2b), DQO (Figura 2c e 2d), NT e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Figura 2e e 2f), PT e PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (Figura 2g e 2h) e turbidez e SS (Figura 2i e 2j). É possível observar que os polutogramas dos parâmetros de qualidade das frações totais, como NT e PT, DQO, turbidez e SS possuem comportamento semelhante ao fluxo de vazão, com concentrações aumentando à medida que a vazão aumenta. Contrariamente, os parâmetros de COD e as frações dissolvida dos nutrientes, não apresentam comportamento definido pelo regime de vazões, provavelmente associado ao fato de que tais elementos não possuem aderência às partículas sólidas que são arrastadas durante os eventos de chuva.

Figura 2 – Polutogramas dos parâmetros de qualidade da água analisados em BA1 e BA2.

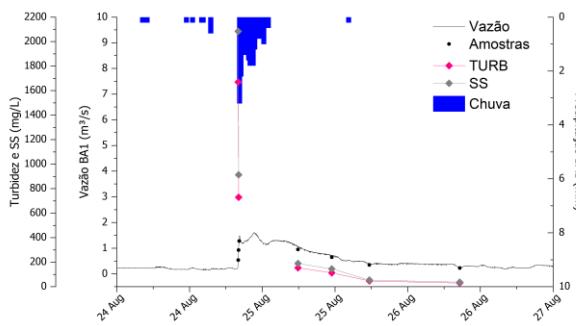




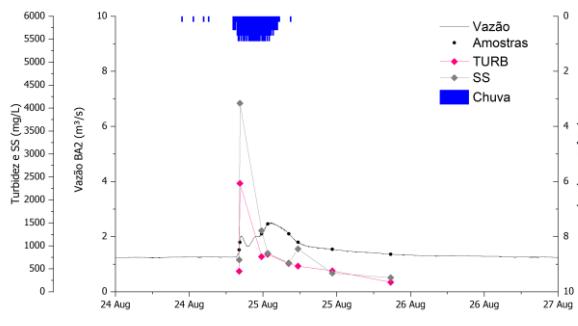
g) PT e PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - BA1



h) PT e PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - BA2



i) Turbidez e SS - BA1



j) Turbidez e SS - BA2

A Tabela 1 apresenta as maiores concentrações medidas nos pontos BA1 e BA2 e as amostras correspondentes, bem como os valores de EMC calculados para os eventos indicados.

Tabela 1 – Maiores concentrações medidas em BA1 e BA2, amostra correspondente e valores de EMC com o respectivo aumento entre os pontos.

Parâmetros	BA1			BA2			Aumento EMC
	Concentração máxima	Nº da Amostra	EMC	Concentração máxima	Nº da Amostra	EMC	
COD (mg/L)	4,6	03 <sup>a</sup>	3,63	7,8	01 <sup>a</sup>	5,34	~ 1,5
DQO (mg/L)	93,4	02 <sup>a</sup>	39,38	1.046,0	02 <sup>a</sup>	331,59	~ 8,4
NT (mg/L)	1,30	03 <sup>a</sup>	1,03	30,6	02 <sup>a</sup>	8,87	~ 8,6
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	0,2	01 <sup>a</sup>	0,05	4,3	01 <sup>a</sup>	2,32	~ 44,4
PT (mg/L)	1,8	03 <sup>a</sup>	0,98	6,3	02 <sup>a</sup>	3,32	~ 3,4
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	0,009	06 <sup>a</sup>	0,005	0,20	02 <sup>a</sup>	0,06	~11,1
Turbidez (NTU)	1670,0	01 <sup>a</sup>	369,70	2.360,0	02 <sup>a</sup>	805,65	~ 2,2
SS (mg/L)	2084,0	01 <sup>a</sup>	461,62	4.105,0	02 <sup>a</sup>	1181,95	~ 2,6

As maiores concentrações foram medidas nas amostras logo do início do evento em BA1, que possui tempo crítico de 2,4h. Os parâmetros de COD, NT e PT tiveram o pico de concentração na terceira amostra coletada, com valores respectivos de 4,57 mg/L, 1,29 mg/L e 1,76 mg/L. DQO teve o pico de concentração na amostra 2, com valor de 93,42 mg/L, enquanto SS e turbidez tiveram os maiores valores medidas na primeira amostra, com concentrações medidas de 2084 mg/L e 1670 NTU. Esse comportamento dá indícios dos efeitos de primeira lavagem, principalmente devido ao carreamento de material particulado para o corpo hídrico. Para as frações dissolvidas de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> e N-

$\text{NH}_4^+$ , as concentrações foram baixas e sem comportamento análogo as variações da vazão, com valores médios do evento de  $0,01 \pm 0,002 \text{ mg/L}$  e  $0,08 \pm 0,06 \text{ mg/L}$ , respectivamente. As baixas concentrações medidas podem indicar a não ocorrência desses elementos de forma dispersa na bacia no ponto BA1, que possui uso do solo mais preservado e menos influência antrópica.

Em BA2, o mesmo padrão se repete. As maiores concentrações são observadas até as primeiras três amostras coletadas durante o evento de chuva. COD teve concentração máxima medida na primeira amostra de  $7,78 \text{ mg/L}$ , enquanto PT foi de  $6,34 \text{ mg/L}$  na segunda amostra. NT, por sua vez, teve valores bem acima das demais amostras, com concentração máxima de  $30,58 \text{ mg/L}$ , provavelmente associado a influência do despejo da ETE localizada a montante do ponto BA2. Isso porque, o valor máximo de  $\text{N-NH}_4^+$  foi medido na primeira amostra, com concentração de  $4,26 \text{ mg/L}$ , e as concentrações de DQO e SS foram de  $1046 \text{ mg/L}$  e  $4105 \text{ mg/L}$ , respectivamente, corroborando com concentrações características de amostras de esgoto sanitário (SPERLING, 2017).

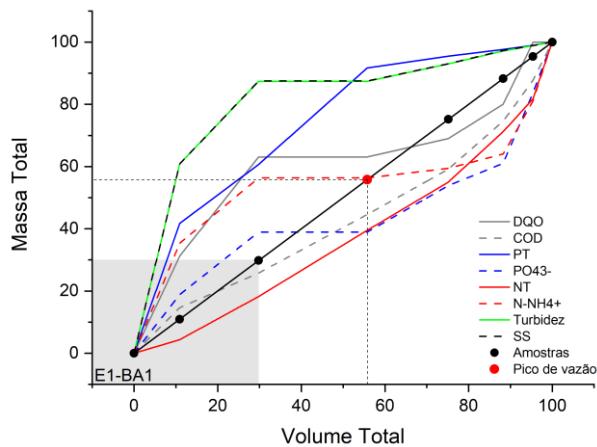
Após o pico de concentração, as demais amostras, em ambos os pontos monitorados, apresentam ainda concentrações elevadas, porém abaixo do valor máximo mencionado. Os valores de EMC possibilitam a comparação entre os eventos e os parâmetros analisados. Em geral, é possível observar que os valores de EMC sofrem aumentos expressivos no ponto BA2, em relação ao ponto BA1, com acréscimos variando entre 1,5 a 44,4 vezes. Tal aumento está diretamente relacionado com a influência da área de contribuição incremental do ponto BA2, com mudanças no uso do solo que incluem a diminuição de área vegetada e aumento da área urbanizada, além da presença de descarga de efluentes. As concentrações de DQO, PT, NT e  $\text{N-NH}_4^+$  aumentam substancialmente, conferindo características similares a de esgoto sanitário. Além disso, todos os valores de EMC são menores do que a concentração máxima medida no evento, indicando que ao longo do evento, o aporte total de massa pode ter sido amenizado após a ocorrência dos picos de concentração pelo volume de água que escoa após o fim da precipitação apesar de ainda ocorrer a entrada de massa. Esse fato, pode favorecer os efeitos de diluição desses parâmetros, contudo, não diminui o aporte de carga total realizado no corpo hídrico, que continua a se propagar a jusante, ainda com potencial de decréscimo da qualidade da água.

As frações de nitrogênio e fósforo ( $\text{N-NH}_4^+$  e  $\text{PO}_4^{3-}$ ), possuem os menores valores de EMC, em ambos os pontos monitorados, apesar de representarem os maiores aumentos entre os pontos observados. A proporção de COD é a que tem o menor aumento registrado entre os pontos monitorados, com cerca de 1,5 vezes. Apesar disso, o EMC de COD mantém-se maior que o EMC do PT nos dois pontos, e maior que o EMC do NT no ponto BA1, o que sugere uma inserção mais constante desse elemento no meio, que pode ocorrer por vias autóctones ou alóctones de contribuição. O aumento de DQO e  $\text{N-NH}_4^+$  está associado com o despejo de efluentes a montante do ponto BA2, afetando a qualidade da água inclusive durante os eventos de precipitação.

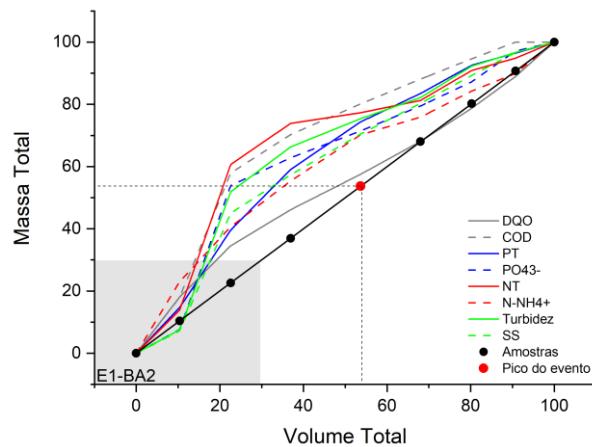
Considerando os critérios de enquadramento dos corpos hídricos, onde essa porção da Bacia do Rio Barigui se enquadra como Classe 2, apenas o ponto BA1 para o parâmetro de  $\text{N-NH}_4^+$  atende aos valores máximos previstos na Resolução CONAMA nº 357/2005. Todos os demais parâmetros, tanto as concentrações máximas medidas e os valores de EMC estão acima dos limites propostos (CONAMA, 2005). Isso demonstra o quanto um evento de precipitação pode afetar a qualidade da água em bacias mistas, e mesmo que o decréscimo de qualidade aconteça momentaneamente, é de suma importância avaliar os efeitos a longo prazo da entrada de massa no ecossistema.

Assim, para entender o comportamento da entrada de carga no corpo hídrico, as curvas EMC são apresentadas na Figura 3. É possível observar que no ponto BA1, há diferentes tipos de curva para os parâmetros medidos (Figura 3a), enquanto em BA2, todas as curvas se encontram na Região A - acima da bissetriz (Figura 3b) -, indicando, portanto, a predominância da ocorrência de *first-flush* nessa porção da bacia para todos os parâmetros monitorados. O hachurado cinza nas imagens indicam a

proporção de 30% do transporte de massa e volume do evento, que é considerada a proporção do evento onde há o maior transporte de massa (Stenstrom e Kayhanian, 2005). O ponto em vermelho na reta bissetriz indica a amostra onde ocorreu o pico de vazão do evento.



a) Curva EMC – BA1



b) Curva EMC – BA2

Em BA1, as curvas de SS, turbidez e PT encontram-se na Região A, indicando a ocorrência de acúmulo de carga durante a lavagem inicial da bacia, enquanto para NT a curva encontra-se na Região C, sugerindo a menor presença e eventual diluição deste elemento ao longo do evento. Para os demais parâmetros, as curvas se alternam da região A do início do evento para a região C ao final do evento, o que indica que houve um aporte de massa mais expressivo no início do evento, mas que cessou ao longo da ocorrência do evento, diminuindo as concentrações no volume total de água transportado. Como pode ser observado na Tabela 2, o aporte de massa no momento mais próximo do pico de vazão foi acima de 50% para todos os parâmetros, com exceção do COD, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> e NT, que tiveram as curvas alternadas. Um destaque se dá para Turbidez, SS e PT, cujas curvas estiveram integralmente na região A, e possuem 88%, 88% e 92%, respectivamente, do aporte de massa total antes do pico de vazão, indicando o fenômeno de *first-flush*.

Similarmente, no estudo de Mamoon et al., (2019) foram identificadas curvas EMC de SS, nitrogênio Kjedahl e carbono orgânico total na Região A, as quais os autores sugerem a ocorrência de *first-flush*. Além disso, para PT e alguns metais medidos, as curvas foram variadas, indicando um menor efeito *first-flush*, provavelmente associado a influência das chuvas de alta intensidade no transporte de poluentes.

Tabela 3 – Aporte de massa pelo EMC no ponto BA1

Amostra BA1	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	EMC Acumulado (%)							
		COD (mg/L)	DQO (mg/L)	PT (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	NT (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	Turbidez (NTU)	SS (mg/L)
1	0,54	14,6	31,2	41,7	18,8	4,4	35,3	60,8	60,8
2	0,93	25,8	63,1	60,7	39,0	18,2	56,4	87,4	87,5
3	1,28	44,6	63,1	91,7	39,0	39,5	56,4	87,4	87,5
4	0,95	59,2	69,0	95,5	53,9	55,0	59,4	93,0	93,1
5	0,64	74,6	80,0	97,6	61,0	71,2	64,1	97,2	97,3
6	0,35	87,8	100,0	99,0	83,8	81,8	81,1	98,9	98,9
7	0,23	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Em BA2, todas as curvas se encontram na Região A do gráfico, que indica a maior concentração de massa em relação do volume escoado e corrobora com o aporte de massa, conforme mostrado na Tabela 4. Todos os parâmetros possuem aporte maior que 50% antes do pico da vazão do evento, que ocorreu próximo a quarta amostra coletada. Alguns deles, como COD, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NT e SS tiveram mais de 60% do aporte total da massa transporte ainda no início do evento de chuva, observados nas amostras 2 e 3. Nesse ponto, o fenômeno do *first-flush*, ou carga de primeira lavagem, já é melhor evidenciado. As diferenças de uso do solo nessa porção incremental da bacia, inclusive a existência de descarga de esgoto doméstico que reforçam os processos de poluição no corpo hídrico, tanto de origem difusa, quanto com a sua mistura com a poluição de origem pontual. No trabalho de Alias et al., (2014) os resultados mostraram que a maior parcela dos poluentes foi carreada para o corpo hídrico nos primeiros 40% do evento de chuva, com porcentagens de 61,22% para SS, 60,74% para PT e 52,43% para NT, similar aos resultados encontrados nesse estudo.

Tabela 4 – Aporte de massa pelo EMC no ponto BA2

Amostra BA2	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	EMC Acumulado (%)							
		COD (mg/L)	DQO (mg/L)	PT (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	NT (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	SS (mg/L)	Turbidez (NTU)
1	1,52	17,9	18,0	14,7	7,7	13,8	23,0	7,5	7,2
2	1,80	57,9	34,5	39,6	53,9	60,7	40,7	51,9	45,1
3	2,11	70,3	46,1	59,0	62,8	73,9	55,3	66,3	57,4
4	2,46	80,2	57,5	74,4	71,5	77,3	70,2	75,4	70,4
5	2,11	88,1	68,1	83,5	79,5	81,3	75,9	82,2	80,3
6	1,80	94,6	78,7	92,6	87,3	90,9	84,3	92,3	89,3
7	1,54	100,0	89,0	96,5	97,1	94,9	89,9	96,7	96,6
8	1,36	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Dessa forma é possível observar que os eventos de chuva que produzem escoamento superficial contribuem para o aporte de carga nos corpos hídricos, causando a introdução de carga poluidora do ecossistema aquático. Os valores medidos e calculados pelo EMC encontram-se fora dos limites previstos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, e indicam a perda de qualidade da água durante a precipitação, mesmo que momentaneamente. Por isso, ações de combate e mitigação da descarga de poluição na bacia são importantes, para diminuir os efeitos a longo prazo nos corpos hídricos.

## CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que os eventos de chuva representam indutores do transporte de poluição difusa em bacias urbanas e mistas, como a do Rio Barigui. A análise dos polutogramas permitiu identificar comportamentos distintos entre os parâmetros avaliados, especialmente em relação à dinâmica das frações dissolvidas e particuladas. A ocorrência do fenômeno de *first-flush* foi identificada com destaque nas curvas EMC do ponto BA2, indicando elevada concentração de massa poluidora nas fases iniciais do evento.

O cálculo do EMC revelou aumentos expressivos entre os pontos monitorados, refletindo a influência da área incremental e da descarga de efluentes urbanos a montante do ponto BA2. Todos os parâmetros analisados apresentaram valores acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, com exceção do N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no ponto BA1, ressaltando os riscos à qualidade da água mesmo durante episódios pontuais de precipitação.

As curvas EMC se mostraram ferramentas eficazes para a identificação do momento de maior aporte de massa, contribuindo para a compreensão da dinâmica da poluição durante os eventos. Os

resultados reforçam a importância de ações integradas de controle da poluição difusa e do manejo adequado das áreas urbanas e fontes pontuais, bem como a necessidade de monitoramentos contínuos e estratégias adaptativas de gestão da qualidade da água.

Recomenda-se que estudos adicionais sejam realizados em diferentes condições hidrológicas e de uso do solo, para ampliar o entendimento sobre a variabilidade espacial e temporal da carga poluidora, contribuindo para uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos urbanos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALIAS, N. et al. (2014) *Time as the critical factor in the investigation of the relationship between pollutant wash-off and rainfall characteristics*. Ecological engineering, Elsevier, v.64, p.301–305.
- BRAGA, S. M. (2013) *Uma nova abordagem para integração entre quantidade e qualidade da água para a avaliação da poluição difusa*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental
- CONAMA, Conselho Nacional de Meio Ambiente (2005) *Resolução nº 357 de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.
- KOZAK, C. (2020) *Non-point source pollution assessment based on event driven influence*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.
- KOZAK, C., et al. (2019). *Water quality dynamic during rainfall episodes: Integrated approach to assess diffuse pollution using automatic sampling*. Environmental Monitoring and Assessment, 191(6), 402.
- MCCARTHY, D. T. et al. (2018) *Assessment of sampling strategies for estimation of site mean concentrations of storm water pollutants*. Water research. Elsevier, v.129, p.297–304.
- MAMOON, A.A. et al. (2019) *First-flush analysis using a rainfall simulator on a micro catchment in an arid climate*. Science of The Total Environment, Elsevier, v.693, p.133552,2019.
- METADIER, M.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L. (2012) *The use of long-term on-line turbidity measurements for the calculation of urban storm water pollutant concentrations, loads, pollutographs and intra-event fluxes*. Water research, Elsevier, v.46, n.20, p.6836–6856.
- NOVOTNY, V. (2003) *Water quality: Diffuse pollution and watershed management*. [S.l.]: John Wiley & Sons.
- PORTO, M.; PORTO, R. (2008) *Gestão de bacias hidrográficas*. Estudos avançados, SciELO Brasil, v.22, n. 63, p.43–60.
- RIGHETTO, A.M.; GOMES, K.M.; FREITAS, F.R.S. (2017). *Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana*. Eng. Sanit. Ambient. 22(06) Nov-Dec 2017.
- SODRÉ, F.F. (2012). *Fontes Difusas de Poluição da Água: Características e métodos de controle*. AQQUA. 1:9-16
- STENSTROM, M.K.; KAYHANIAN, M. (2005) *First Flush Phenomenon Characterization*. California Department of Transportation Division of Environmental Analysis. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo recurso financeiro investido no desenvolvimento desta pesquisa.